

In der Kreislaufwirtschaft spielt der Werterhalt sowohl endlicher als auch erneuerbarer Ressourcen eine zentrale Rolle, indem diese über möglichst lange Zeiträume im Wirtschaftskreislauf gehalten werden. Vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels und des Ziels der Europäischen Union, bis 2050 klimaneutral zu werden, steht insbesondere die produzierende Industrie vor der Verpflichtung, ihre Investitionsgüter nachhaltiger und ressourcenschonender einzusetzen. Eine zentrale Herausforderung, der Unternehmen dabei begegnen, ist das begrenzte Angebot an Informationen über gebrauchte und aufbereitete Investitionsgüter, obwohl diese im Vergleich zu Neuprodukten oft günstiger und umweltfreundlicher sind. Ein Lösungsansatz ist der digitale Produktpass, der durch eine verbesserte Digitalisierung von Produktdaten die lückenlose und effiziente Informationsverfügbarkeit über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts gewährleisten soll. Dies ist besonders relevant, da bestehende Informationsdefizite zwischen Herstellern und Nutzern die Implementierung von Kreislaufstrategien erheblich erschweren.

Obwohl digitale Produktpässe in der wissenschaftlichen Diskussion zunehmend Beachtung finden, fehlt es bislang an klaren, domänen spezifischen Definitionen ihres Inhalts. In der vorliegenden Dissertationsschrift wird ein Modell entwickelt, welches die erforderlichen Informationsbestandteile entlang des Lebenszyklus von Investitionsgütern im Maschinen- und Anlagenbau definiert. Dadurch wird eine Grundlage für die Gestaltung digitaler Produktpässe geschaffen.

Im ersten Schritt werden Kreislaufstrategien identifiziert, die für Investitionsgüter im Rahmen digitaler Produktpässe anwendbar sind. Diese Strategien, zusammengefasst unter der Kategorie unternehmensübergreifender Werterhalt, umfassen Reuse, Remanufacturing und Repurposing. Darauf aufbauend wird ein ökosystembasierter Ansatz verwendet, um das Unternehmensnetzwerk zu beschreiben, das am Lebenszyklus einer Maschine beteiligt ist. Im Rahmen einer Klassifikation wird festgelegt, welche Daten für einen digitalen Produktpass erforderlich sind, um insbesondere die Nachhaltigkeitsziele zu unterstützen. Zu den wesentlichen Datenkategorien gehören Produkt-, Nutzungs-, Netzwerk- und Nachhaltigkeitsdaten.

Die Ergebnisse führen schließlich zu einem Erklärungsmodell, das die Informationsentitäten in das zugrunde liegende Ökosystem integriert und die Verantwortlichkeiten für die Bereitstellung der erforderlichen Daten definiert.



Lukas Stratmann

Informationsmodell für Kreislaufstrategien von Investitionsgütern im Maschinen- und Anlagenbau



Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh

Informationsmodell für Kreislaufstrategien von Investitionsgütern im Maschinen- und Anlagenbau

Information Model for Circular Strategies of Capital Goods in the Manufacturing Industry

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Lukas Stratmann

Berichter/in:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Boos

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Januar 2025

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

SCHRIFTENREIHE RATIONALISIERUNG

Lukas Stratmann

Informationsmodell für Kreislaufstrategien
von Investitionsgütern im Maschinen- und
Anlagenbau

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh

Band 193



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

Lukas Stratmann:

Informationsmodell für Kreislaufstrategien von Investitionsgütern im Maschinen- und Anlagenbau

1. Auflage, 2025

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Copyright Apprimus Verlag, Aachen, 2025

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen, Deutschland
Internet: www.aprimus-verlag.de, E-Mail: info@aprimus-verlag.de

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany

ISBN 978-3-98555-264-1

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2025)

Zusammenfassung

In der Kreislaufwirtschaft spielt der Werterhalt sowohl endlicher als auch erneuerbarer Ressourcen eine zentrale Rolle, indem diese über möglichst lange Zeiträume im Wirtschaftskreislauf gehalten werden. Vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels und des Ziels der Europäischen Union, bis 2050 klimaneutral zu werden, steht insbesondere die produzierende Industrie vor der Verpflichtung, ihre Investitionsgüter nachhaltiger und ressourcenschonender einzusetzen. Eine zentrale Herausforderung, der Unternehmen dabei begegnen, ist das begrenzte Angebot an Informationen über gebrauchte und aufbereitete Investitionsgüter, obwohl diese im Vergleich zu Neuprodukten oft günstiger und umweltfreundlicher sind. Ein Lösungsansatz ist der digitale Produktpass, der durch eine verbesserte Digitalisierung von Produktdaten die lückenlose und effiziente Informationsverfügbarkeit über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts gewährleisten soll. Dies ist besonders relevant, da bestehende Informationsdefizite zwischen Herstellern und Nutzern die Implementierung von Kreislaufstrategien erheblich erschweren.

Obwohl digitale Produktpässe in der wissenschaftlichen Diskussion zunehmend Beachtung finden, fehlt es bislang an klaren, domänenspezifischen Definitionen ihres Inhalts. In der vorliegenden Dissertationsschrift wird ein Modell entwickelt, welches die erforderlichen Informationsbestandteile entlang des Lebenszyklus von Investitionsgütern im Maschinen- und Anlagenbau definiert. Dadurch wird eine Grundlage für die Gestaltung digitaler Produktpässe geschaffen.

Im ersten Schritt werden Kreislaufstrategien identifiziert, die für Investitionsgüter im Rahmen digitaler Produktpässe anwendbar sind. Diese Strategien, zusammengefasst unter der Kategorie *unternehmensübergreifender Werterhalt*, umfassen *Reuse*, *Remanufacturing* und *Repurposing*. Darauf aufbauend wird ein ökosystembasierter Ansatz verwendet, um das Unternehmensnetzwerk zu beschreiben, das am nachhaltigen Lebenszyklus einer Maschine beteiligt ist. Im Rahmen einer Klassifikation wird festgelegt, welche Daten für einen digitalen Produktpass erforderlich sind, um insbesondere die Nachhaltigkeitsziele zu unterstützen. Zu den wesentlichen Datenkategorien gehören Produkt-, Nutzungs-, Netzwerk- und Nachhaltigkeitsdaten.

Die Ergebnisse dieser Vorarbeiten führen schließlich zu einem Erklärungsmodell, das die Informationseinheiten und das zugrunde liegende Ökosystem integriert und die Verantwortlichkeiten für die Bereitstellung der erforderlichen Daten definiert. Die Validierung des Modells erfolgte anhand von Fallstudien mit den Unternehmen Schaeffler, BMW, Reifenhäuser und PTC, welche die praktische Anwendbarkeit des Modells bestätigten.

Summary

In the circular economy, maintaining the value of finite and renewable resources for as long as possible is of utmost importance, ensuring their continuous circulation within the economy. Given the ongoing challenges of climate change and the European Union's goal of achieving climate neutrality by 2050, the manufacturing industry is particularly obligated to use its capital goods more sustainably and efficiently. A key challenge faced by companies during investment decisions is the limited availability of information on used and refurbished capital goods, despite their often lower costs and more resource-efficient nature compared to new acquisitions. One approach to addressing this issue is the digital product passport. It aims to ensure seamless and efficient access to product information across the entire product lifecycle through improved digitalization. This is especially critical as current information gaps between manufacturers and users significantly hinder the implementation of circular strategies.

Although digital product passports are increasingly discussed in academic research, there is a lack of clear, domain-specific definitions regarding their content. In this dissertation, a model is developed defining the required informational components throughout the lifecycle of capital goods. This provides a foundational framework for the creation of digital product passports.

The first step involves identifying circular strategies applicable to capital goods in the context of digital product passports. These strategies, classified under the category of *cross-company value preservation*, include reuse, remanufacturing, and repurposing. A business ecosystem approach is used to describe the network involved in the lifecycle of a machine. A classification framework is proposed to outline the data requirements for a digital product passport, especially in relation to achieving sustainability goals. Key data categories include product data, usage data, network data, and sustainability data.

These efforts result in the central model of this dissertation, which integrates the information entities with the ecosystem roles and defines responsibilities for providing the required data. The model's validation was conducted through case studies with the companies Schaeffler, BMW, Reifenhäuser, and PTC, which confirmed its practical applicability.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung.....	4
1.3 Wissenschaftstheoretische Einordnung und Struktur der Untersuchung	5
1.4 Aufbau der Dissertationsschrift	7
2 Begriffliche Grundlagen	11
2.1 Produktlebenszyklus von Investitionsgütern.....	11
2.2 Kreislaufwirtschaft.....	12
2.2.1 Begriffsherkunft und -definition	13
2.2.2 Konzept der Kreislaufwirtschaft	14
2.2.3 Kreislaufstrategien.....	17
2.2.4 Zirkuläre Ökosysteme der produzierenden Industrie	18
2.3 Informationssysteme und -modelle	22
2.3.1 Abgrenzung von Informationen und Daten	22
2.3.2 Informationssysteme im Produktlebenszyklus	23
2.3.3 Begriffsdefinitionen der Modellierung von Informationen	27
2.4 Zusammenfassung und Eingrenzung des Untersuchungsbereichs	30
3 Stand der Erkenntnisse	33
3.1 Methodik einer systematischen Literaturrecherche	33
3.2 Analyse ausgewählter Ansätze aus der Literatur	37
3.2.1 Kreislaufstrategien im industriellen Kontext	37
3.2.2 Wissenschaftliche Ansätze zirkulärer Ökosysteme	51
3.2.3 Informationsmodellierung für die Kreislaufwirtschaft	66
3.3 Ableitung des Forschungsbedarfs.....	73
4 Herleitung des Konzeptansatzes.....	77
4.1 Anforderungen an die zu entwickelnden Modelle	77
4.1.1 Formale Anforderungen	77
4.1.2 Inhaltliche Anforderungen	78
4.1.3 Zusammenführen der Anforderungen	80
4.2 Methodische Grundlagen	80
4.2.1 Systemdenken.....	80
4.2.2 Allgemeine Modelltheorie.....	82
4.2.3 Klassifizierung und Typisierung	84

4.2.4	Fallstudienforschung	85
4.2.5	Ökosystemmodellierung.....	88
4.2.6	Informationsmodellierung.....	91
4.3	Konkretisierung der Vorgehensweise	94
4.4	Zwischenfazit	96
5	Detaillierung des Informationsmodells	99
5.1	Identifikation und Auswahl praxisrelevanter Kreislaufstrategien.....	100
5.1.1	Literaturbasierte Ableitung von Kreislaufstrategien	101
5.1.2	Definition und Kategorisierung der Kreislaufstrategien.....	103
5.1.3	Fallstudienbasierte Analyse der Kreislaufstrategien	110
5.1.4	Auswahl praxisrelevanter Kreislaufstrategien	116
5.1.5	Zusammenfassung und Reflexion	118
5.2	Beschreibungsmodell zirkulärer Ökosysteme	119
5.2.1	Methodisches Vorgehen zur Beschreibung des Ökosystems	120
5.2.2	Auswahl und Analyse der ausgewählten Fallstudien.....	123
5.2.3	Beschreibung des zirkulären Ökosystems für Investitionsgüter ...	126
5.2.4	Rollenbeschreibungen im zirkulären Ökosystem.....	137
5.2.5	Zusammenfassung und Reflexion	150
5.3	Beschreibungsmodell kreislaufrelevanter Produktinformationen	152
5.3.1	Methodisches Vorgehen zur Entwicklung des Beschreibungsmodells	153
5.3.2	Anforderungen an kreislaufrelevante Produktinformationen	154
5.3.3	Informationsverfügbarkeit in Unternehmen	158
5.3.4	Klassifizierung von Produktinformationen	159
5.3.5	Zusammenfassung und vollständige Klassifizierung	168
5.4	Wirkmodell zur Erklärung rollenspezifischer Produktinformationen.....	171
5.4.1	Methodisches Vorgehen der Informationsmodellierung	172
5.4.2	Erklärung kreislaufrelevanter Produktinformationen in zirkulären Ökosystemen.....	173
5.4.3	Zusammenfassung und Reflexion	189
5.5	Rollen- und strategiespezifische Informationsmodellierung	190
5.5.1	Ableitung des rollenspezifischen Informationsmodells	190
5.5.2	Anwendung des Informationsmodells	209
5.5.3	Zusammenfassung und Reflexion	212
6	Validierung	213
6.1	Vorgehensweise der Validierung	213
6.2	Fallbeispiel der Schaeffler AG	215
6.3	Fallbeispiel der BMW AG	219
6.4	Fallbeispiel der Reifenhäuser GmbH & Co. KG Maschinenfabrik	222
6.5	Fallbeispiel der Parametric Technology GmbH	229
6.6	Überprüfung der Anforderungen	233
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	237

7.1	Zusammenfassung	237
7.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf.....	241
Literaturverzeichnis	243	
Anhang	265	
A1	Literatur zur Anforderungsanalyse aus Kapitel 5.3	265
A2	Definitionen der Informationsentitäten aus Kapitel 5.3.....	267
A3	Beschreibung der Fallstudien zirkulärer Ökosysteme	271

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Analyse bestehender Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft in der produzierenden Industrie	2
Abbildung 1-2: Metaanalyse von wissenschaftlichen Artikeln im Themenbereich <i>Circular Economy</i>	3
Abbildung 1-3: Wissenschaftssystematik nach ULRICH U. HILL	6
Abbildung 1-4: Lernprozess der explorativen Forschung	7
Abbildung 1-5: Aufbau und Inhaltsgliederung dieser Dissertationsschrift	8
Abbildung 2-1: Lebenszyklusphasen eines Produkts	12
Abbildung 2-2: Der <i>Value Hill</i> in der Kreislaufwirtschaft.....	14
Abbildung 2-3: Konzept der Kreislaufwirtschaft.....	16
Abbildung 2-4: Übersicht von interorganisationalen Netzwerktypen	21
Abbildung 2-5: Die <i>Data-Information-Knowledge-Wisdom-Hierarchie</i>	22
Abbildung 2-6: Informationssystemlandschaft.....	25
Abbildung 2-7: Einordnung des Informationsmodells	29
Abbildung 2-8: Eingrenzung des Untersuchungsbereichs	31
Abbildung 3-1: Eingrenzung des Untersuchungsbereichs der Literaturrecherche nach Cooper	34
Abbildung 3-2: PRISMA-Konzept nach MOHER ET AL.	36
Abbildung 3-3: Zusammenfassung der Literaturauswahl zu Strategien der Kreislaufwirtschaft.....	38
Abbildung 3-4: Multidimensionales Entscheidungsinstrument zur Analyse von EoL-Strategien	39
Abbildung 3-5: Circular Strategies Scanner nach BLOMSMA ET AL.	40
Abbildung 3-6: Ordnungsrahmen zur Einführung von Kreislaufstrategien nach KLENK ET AL.....	41
Abbildung 3-7: Auszug aus der <i>Smart CE Matrix</i>	43
Abbildung 3-8: Neun Strategien zur Lebenszyklusverlängerung nach LINTON U. JAYARAMAN	45
Abbildung 3-9: Strategische Aktivitäten zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft in kleinen und mittleren Unternehmen	48
Abbildung 3-10: Ergebnis der Konzeptionalisierung von Kreislaufstrategien.....	49
Abbildung 3-11: Taxonomie nach SIHVONEN U. RITOLA im Vergleich zur Abfallhierarchie der EU.....	50

Abbildung 3-12: Beschreibung der systematischen Literaturrecherche zu zirkulären Ökosystemen	53
Abbildung 3-13: Übersicht zirkulärer Ökosystemtypen	54
Abbildung 3-14: Übersicht der Treiber und Barrieren von zirkulären Ökosystemen am Beispiel des Kartonrecyclings	55
Abbildung 3-15: Ökosystemvisualisierung des Kreislaufs von Kunststofffolien für die industrielle Landwirtschaft.....	57
Abbildung 3-16: Einflüsse der Kreislaufwirtschaft auf das Supply-Chain-Management.....	58
Abbildung 3-17: Übersicht der wirtschaftlichen Zusammenhänge im zirkulären Ökosystem der Biogasherstellung, -vertrieb und -nutzung	59
Abbildung 3-18: Übersicht der Prinzipien zur Förderung von Innovationen in zirkulären Ökosystemen nach KONIETZKO ET AL.	60
Abbildung 3-19: Übersicht der Ökosystem-Assessments und Mechanismen zur Orchestrierung zirkulärer Ökosysteme	61
Abbildung 3-20: 38 Muster der Kreislaufwirtschaft nach TAKACS ET AL.	64
Abbildung 3-21: Konzeptioneller Ordnungsrahmen eines zirkulären Ökosystems nach TREVISON ET AL.	65
Abbildung 3-22: Datenaustausch über das PCDS	67
Abbildung 3-23: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)	68
Abbildung 3-24: Fachlich-inhaltliches Konzept des digitalen Batteriepasses	70
Abbildung 3-25: Politische Informationsanforderungen an den digitalen Produktpass i. A. a. Götz et al. (2021).....	71
Abbildung 3-26: Schematische Darstellung des Materialpasses im Hochbau	73
Abbildung 3-27: Übersicht und Prüfung der untersuchten Literatur	76
Abbildung 4-1: Formale und inhaltliche Anforderungen an das Informationsmodell	80
Abbildung 4-2: Aufbau und Begriffe eines komplexen Systems	81
Abbildung 4-3: Beschreibung von expliziten Modellarten	83
Abbildung 4-4: Abgrenzung von Typisierung, Klassifizierung und Morphologie	84
Abbildung 4-5: Prozess der Fallstudienforschung nach EISENHARDT	86
Abbildung 4-6: Übersicht der Rollen zur Ökosystemmodellierung	89
Abbildung 4-7: Beispiel eines <i>Value Flow Models</i> anhand eines Dienstleisters für gesunde Ernährung.....	91
Abbildung 4-8: Modellierungsbeispiel des Entity-Relationship-Modells	92

Abbildung 4-9: Alternative Notationen für Entity-Relationship-Modelle	93
Abbildung 4-10: Konkretisierung der Vorgehensweise	95
Abbildung 5-1: Aufbau von Kapitel 5 und Modellübersicht	99
Abbildung 5-2: Identifikation und Auswahl praxisrelevanter Kreislaufstrategien...	100
Abbildung 5-3: Forschungsmethodik nach BOCKEN ET AL.	101
Abbildung 5-4: Übersicht wissenschaftlich beschriebener Kreislaufstrategien	102
Abbildung 5-5: Übersicht der kategorischen Einordnung und Definitionen der Kreislaufstrategien	104
Abbildung 5-6: Fallstudienbasierte Bewertung von Kreislaufstrategien	112
Abbildung 5-7: Auswahl der Kategorie von Kreislaufstrategien für den Maschinen- und Anlagenbau.....	118
Abbildung 5-8: Einordnung des zirkulären Ökosystems in die Grundstruktur der Dissertation.....	119
Abbildung 5-9: Modell der Wertkette nach PORTER.....	121
Abbildung 5-10: Die Wertkette nach PORTER ergänzt um die Rollenbeschreibung im Ökosystem	123
Abbildung 5-11: Übersicht der abgeleiteten Rollen in zirkulären Ökosystemen	128
Abbildung 5-12: Waren- und Dienstleistungsfluss des zirkulären Ökosystems	129
Abbildung 5-13: Waren- und Dienstleistungsfluss im zirkulären Ökosystem für die Kreislaufstrategie <i>Reuse</i>	130
Abbildung 5-14: Waren- und Dienstleistungsfluss des zirkulären Ökosystems für die Kreislaufstrategien <i>Refurbish</i> und <i>Remanufacture</i>	131
Abbildung 5-15: Waren- und Dienstleistungsfluss des zirkulären Ökosystems für die Kreislaufstrategie <i>Repurpose</i>	133
Abbildung 5-16: Fluss von monetären Mitteln des zirkulären Ökosystems.....	134
Abbildung 5-17: Fluss von Informationen und immateriellen Gütern des zirkulären Ökosystems	136
Abbildung 5-18: Rollenbeschreibung des Nutzers	138
Abbildung 5-19: Rollenbeschreibung des OEM	140
Abbildung 5-20: Rollenbeschreibung des Händlers	141
Abbildung 5-21: Rollenbeschreibung des OER	143
Abbildung 5-22: Rollenbeschreibung des unabhängigen Remanufacturers	145
Abbildung 5-23: Rollenbeschreibung des Repurposers	146
Abbildung 5-24: Rollenbeschreibung des Servicedienstleister	148

Abbildung 5-25: Zuordnung der Rollen im zirkulären Ökosystem abhängig von der betrachteten Kreislaufstrategie und Transaktionsart	151
Abbildung 5-26: Klassifizierung von Produktinformationen des unternehmensübergreifenden Werterhalts von Maschinen und Anlagen	152
Abbildung 5-27: Methodisches Vorgehen zur Entwicklung der Klassifizierung von Produktinformationen	153
Abbildung 5-28: Systematische Literaturrecherche der inhaltlichen Anforderungen des Informationsmodells	154
Abbildung 5-29: Übersicht der identifizierten Anforderungen für das Informationsmodell aus der systematischen Literaturrecherche ..	156
Abbildung 5-30: Übersicht der untersuchten Informationssysteme und identifizierten Datenpunkte	158
Abbildung 5-31: Hauptkategorien der Klassifizierung von Produktinformationen ...	159
Abbildung 5-32: Unterkategorien der Klassifizierung von Produktinformationen	160
Abbildung 5-33: Informationsentitäten der Unterkategorie <i>statische Produktinformationen</i>	161
Abbildung 5-34: Informationsentitäten der Unterkategorie <i>dynamische Zustandsinformationen</i>	164
Abbildung 5-35: Informationsentitäten der Unterkategorie <i>Wertschöpfungsnetzwerkinformationen</i>	166
Abbildung 5-36: Informationsentitäten der Unterkategorie <i>Nachhaltigkeitsinformationen</i>	167
Abbildung 5-37: Klassifizierung von Produktinformationen zur Lebensdauerverlängerung von Investitionsgütern	170
Abbildung 5-38: Wirkmodell der klassifizierten Produktinformation und Rollen im zirkulären Ökosystem	171
Abbildung 5-39: Struktur der Assoziationsmatrix	173
Abbildung 5-40: Legende der CRUD-/Assoziationsmatrix	173
Abbildung 5-41: Assoziationsmatrix der statischen Produktinformationen und Ökosystemrollen (1/2)	175
Abbildung 5-42: Assoziationsmatrix der statischen Produktinformationen und Ökosystemrollen (2/2)	176
Abbildung 5-43: Assoziationsmatrix der dynamischen Zustandsinformationen und Ökosystemrollen	182
Abbildung 5-44: Assoziationsmatrix der Wertschöpfungsnetzwerkinformationen und Ökosystemrollen	185

Abbildung 5-45: Assoziationsmatrix der Nachhaltigkeitsinformationen und Ökosystemrollen	187
Abbildung 5-46: Rollenspezifische Informationsmodellierung zur Umsetzung eines unternehmensübergreifenden Werterhalts	190
Abbildung 5-47: Legende der folgenden Informationsmodellierung	191
Abbildung 5-48: Informationsmodell der Rolle <i>Nutzer</i>	192
Abbildung 5-49: Informationsmodell der Rolle <i>OEM</i>	194
Abbildung 5-50: Informationsmodell der Rolle <i>Händler</i>	196
Abbildung 5-51: Informationsmodell der Rolle <i>OER</i>	197
Abbildung 5-52: Informationsmodell der Rolle <i>unabhängiger Remanufacturer</i>	199
Abbildung 5-53: Informationsmodell der Rolle <i>Repurposer</i>	201
Abbildung 5-54: Informationsmodell der Rolle <i>Servicedienstleister</i>	202
Abbildung 5-55: Informationsmodell der Rolle <i>Komponentenlieferant</i>	204
Abbildung 5-56: Informationsmodell der Rolle <i>Recycler</i>	205
Abbildung 5-57: Informationsmodell der Rolle <i>Logistikunternehmen</i>	206
Abbildung 5-58: Informationsmodell der Rolle <i>Politik</i>	207
Abbildung 5-59: Informationsmodell der Rolle <i>Neue Nutzergruppe</i>	208
Abbildung 5-60: Vorgehensweise zur Anwendung des Informationsmodells	211
Abbildung 6-1: Bewertungslogik für die Validierung der Dissertationsergebnisse	214
Abbildung 6-2: Strategic framework for the sustainability strategy – Nachhaltigkeitsprogramm Sustainability & Engagement der Schaeffler AG.....	216
Abbildung 6-3: Beschreibung des Wertversprechens der Catena-X-Initiative	220
Abbildung 6-4: Screenshot des digitalen Materialpasses der R-Cycle-Initiative ...	225
Abbildung 6-5: Überprüfung der Anforderungen dieser Dissertationsschrift	235
Abbildung 7-1: Systematisches Vorgehen zur Beantwortung der zentralen Forschungsfrage dieser Dissertationsschrift	238

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Suchbegriffsmatrix zu Strategien der Kreislaufwirtschaft	37
Tabelle 3-2:	Suchbegriffsmatrix zu zirkulären Ökosystemen	52
Tabelle 5-1:	Auswahl der Fallstudienunternehmen.....	111
Tabelle 5-2:	Auswahl der Fallstudien zu zirkulären Ökosystemen	125

Abkürzungsverzeichnis

AAS	Asset Administration Shell
BIM	Building Information Modeling
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CRM	Customer Relationship Management
EoL	End-of-Life
ER-Modell	Entity-Relationship-Modell
ERP	Enterprise Resource Planning
OEM	Original Equipment Manufacturer
OER	Original Equipment Remanufacturer
PCDS	Product Circularity Data Sheet
PDM	Product Data Management
PIM	Product Information Management
PLM	Product Lifecycle Management
PRISMA	Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses
PTC	Parametric Technology GmbH
RAMI 4.0	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Wirtschaft steht vor der Herausforderung, ihre traditionell linear orientierten Geschäftsmodelle zu transformieren, sodass nachhaltige und geschlossene Ressourcenkreisläufe entstehen, um langfristig den Wohlstand der Gesellschaft unter Wahrung der Nachhaltigkeitsziele sichern zu können (s. RIESENER ET AL. 2023, S. 1; s. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 3). Der Kreislaufwirtschaft (engl. *Circular Economy*) kommt dabei die entscheidende Rolle zu, den Wert endlicher und erneuerbarer Ressourcen so lange wie möglich zu erhalten und in einen Kreislauf zu überführen (s. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 4; s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2015, S. 5). Insbesondere vor dem europäischen Ziel eines klimaneutralen Europas bis 2050 hat die Europäische Kommission den *European Green Deal* beschlossen, der u. a. Ziele und Vorschläge zur Kreislaufwirtschaft umfasst (s. EUROPEAN COMMISSION 2019, S. 2ff.). Im *Circular Economy Action Plan* wird darauf aufbauend die industrielle Transformation zur zirkulären Wertschöpfung präsentiert, die mit konkreten Maßnahmen in unterschiedlichen Industriesektoren einhergeht (s. EUROPEAN COMMISSION 2020a, S. 2ff.). Dies umfasst sowohl Maßnahmen zur Einmalnutzung von Produkten als auch zur Integration von Sekundärrohstoffen und zum Einsatz von digitalen Produktpässen (s. EUROPEAN COMMISSION 2020a, S. 4). Neben den ökologischen Vorteilen ergeben sich aus der Kreislaufwirtschaft allerdings auch ökonomische Potenziale. Eine Studie des WORLD ECONOMIC FORUM ist für den Automobilsektor zu dem Ergebnis gekommen, dass sich die Profitabilität entlang der Supply-Chain um das 1,5-fache steigern kann (s. BEN DROR ET AL. 2022, S. 4). Insbesondere das kontinuierliche Angebot von Dienstleistungen entlang des Fahrzeuglebenszyklus sowie ein Ausbau von „As-a-Service“-Leistungen führen zu einem Umsatz pro Fahrzeug, der das 20-fache des ursprünglichen Verkaufspreises erzielen kann (s. BEN DROR ET AL. 2022, S. 4). Auch wenn sich diese Potenziale nicht unmittelbar auf den deutschen Maschinen- und Anlagenbau übertragen lassen, kann festgehalten werden, dass spezialisierte Branchen wie ebendieser überproportional von der Kreislaufwirtschaft profitieren, da aufgrund ihrer geringen Stückzahlen Skaleneffekte einen geringeren Einfluss entfalten (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 6). Die positiven Umweltauswirkungen, deren Material- und Energieeinsparungspotenzial in der wissenschaftlichen Literatur auf bis zu 80 % geschätzt wird, sind dabei bisher nicht berücksichtigt (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 1). Diese Erkenntnisse spiegeln sich in der unternehmerischen Praxis wider, wonach 70 % der Supply-Chain-Verantwortlichen im Jahr 2020 Budget für Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft reserviert haben (s. GARTNER, INC. 2020).

Obwohl die politischen Direktiven und die ökonomischen Potenziale eine baldige Transformation der produzierenden Industrie versprechen, ergeben sich in der Praxis Herausforderungen, die einer schnellen Umsetzung entgegenwirken (s. Abbildung 1-1). Eine Studie der Universität Bologna aus dem Jahr 2020 hat ergeben, dass bisher nur 21 % der 254 kleinen und mittleren Unternehmen aus Italien, die befragt wurden,

die Kreislaufwirtschaft über eine reine Abfallverwertung hinaus nutzen (s. MURA ET AL. 2020, S. 14).

Kategorien	Herausforderungen
Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Informationsweitergabe und -verfügbarkeit gebrauchter Produkte ▪ Vernetzung von Wertschöpfungspartnern ▪ Unsicherheit über die Produktqualität von Gebrauchtwaren ▪ Rückgabeprozesse, Reverse-Logistics und Kapazitätsplanung ▪ Fachkräftemangel und Unternehmenskompetenzen ▪ Kontradiktoriale Unternehmensstrategie
Technologie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produktkomplexität und Eignung für Aufbereitungsprozesse ▪ Restriktionen aufgrund geistigen Eigentums ▪ Produktdesign und Einsatz von Sekundärrohstoffen
Marktnachfrage	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kosten von Aufbereitungsprozessen ▪ Unsicherheit über die Stabilität der Nachfrage ▪ Kundenakzeptanz aufbereiteter Produkte
Regulatorik	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definitionen und Standards in der Kreislaufwirtschaft ▪ Komplexität der Rechtslage und Restriktionen im Im- und Export von Gebrauchtwaren

Abbildung 1-1: Analyse bestehender Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft in der produzierenden Industrie (eigene Darstellung i. A. a. BIANCHINI ET AL. 2019, S. 2; RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 4; WALDEN ET AL. 2021, S. 1717)

Ein Konzept, das von der Europäischen Kommission im *Circular Economy Action Plan* vorgeschlagen wird und als Katalysator einer volumnfassenden Kreislaufwirtschaft gilt, ist der digitale Produktpass (s. EUROPEAN COMMISSION 2020a, S. 4). Mit dem Ziel, die Digitalisierung von Produktinformationen zu verbessern und ein digitales Abbild des Produkts zu produzieren, verfolgt der digitale Produktpass einen generalistischen Ansatz (s. EUROPEAN COMMISSION 2020a, S. 4; s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 9). Das Konzept zielt darauf ab, den Mangel eines konsistenten und effizienten Informationsflusses zwischen den Akteuren entlang des Produktlebenszyklus zu beheben (s. WALDEN ET AL. 2021, S. 1717f.; s. O'CONNOR ET AL. 2016, S. 5884). Dies beruht auf dem Praxisproblem, dass die Kommunikation der Stakeholder, insbesondere zwischen Hersteller und Recycler, substanzelle Defizite aufweist (s. O'CONNOR ET AL. 2016, S. 5884). CAGNO ET AL. unterstützen diese Erkenntnis und ergänzen, dass bisher kein ausreichender Fokus auf interorganisationale Beziehungen und entsprechende Entscheidungsprozesse in der Kreislaufwirtschaft gelegt wurde (s. CAGNO ET AL. 2021, S. 27). Am Beispiel der Aufbereitung von Gebrauchtmaschinen lassen sich die Folgen dieses Informationsdefizits abschätzen. Demnach hat die Unsicherheit über die Quantität und Qualität von Gebrauchtmaschinen und deren Komponenten einen nachteiligen Effekt auf die Produktivität und Profitabilität umsetzender Unternehmen (s. RIDLEY ET AL. 2019, S. 263; s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 4). Obwohl aufbereitete Maschinen und Komponenten in der Regel nur 50 % bis 70 % des Neupreises kosten, sind Kunden oft skeptisch und haben einen höheren Beratungsbedarf vor ihrer Kaufentscheidung (s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 6; s. BOOTSMA 2016). Daraus wird ersichtlich, dass die Informationsgrundlage ein kritischer Faktor für den Erfolg kreislauffähiger Geschäftsmodelle ist darstellt. LINTON U. JAYARAMAN haben den Mehrwert von

Produktinformationen insbesondere für Anwendungsfälle aus den Bereichen des Produktrückrufs, der Reparaturdienstleistungen, der Instandhaltung und des Retrofits als hoch eingestuft (s. LINTON U. JAYARAMAN 2005, S. 1816). Laut den Autoren ist erfolgskritisch, ob Unternehmen es schaffen, den Informationswert zu extrahieren und in ihre Unternehmung zu integrieren (s. LINTON U. JAYARAMAN 2005, S. 1816). Deutschland bietet sich als Heimat traditioneller Maschinenbau- und aufstrebender Softwareunternehmen zur Entwicklung eines digitalen Produktpasses an. Bis 2030 stellt der Markt für die Kreislaufwirtschaft ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 5,9 % und für die Umweltechnik und Ressourceneffizienz sogar 8,1 % in Aussicht (s. BÜCHELE ET AL. 2021, S. 25). In einer günstigen Marktlage verspricht ein digitaler Produktpass folglich auch unternehmensübergreifende Potenziale. Wirtschaftliche Akteure können entlang der vollständigen Wertschöpfungskette auf relevante technische und nachhaltige Informationen zugreifen und neue Geschäftsmodelle zur Werterhaltung fördern (s. BERG ET AL. 2020, S. 19ff.).

Das wissenschaftliche Interesse an der Betrachtung der Kreislaufwirtschaft lässt sich auch quantitativ anhand der Anzahl von Veröffentlichungen im zeitlichen Verlauf belegen. Eine durch den Autor durchgeführte Metaanalyse im Zeitraum von 2004 bis 2023 bestätigt diese Erkenntnis. Seit Mitte der letzten Dekade steigt die Anzahl der Publikationen beinahe exponentiell an und erreicht im Jahr 2022 mit 6325 wissenschaftlichen Artikeln auf der Datenbank **Scopus** ihren vorläufigen Höhepunkt (s. Abbildung 1-2).

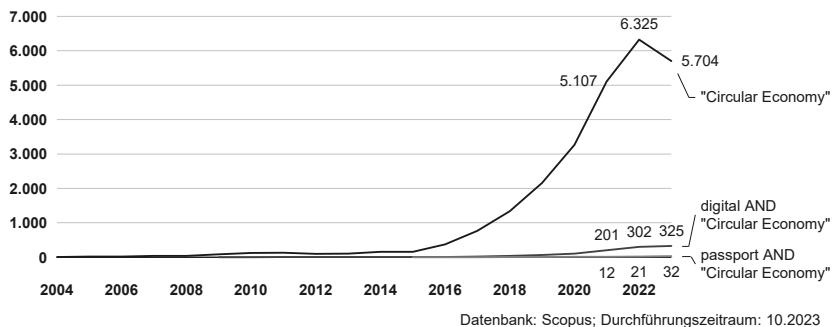


Abbildung 1-2: Metaanalyse von wissenschaftlichen Artikeln im Themenbereich Circular Economy (eigene Darstellung)

In den Themenbereichen der *Digital Circular Economy* und des digitalen Produktpasses steht das wissenschaftliche Interesse noch am Anfang. Dies hat zur Folge, dass zum Austausch von Produktinformationen in der Kreislaufwirtschaft bislang nur Lösungsansätze, die auf Partikularziele (z. B. Schadstofftransparenz oder Materialrückführung) abzielen sowie in spezifischen Branchen (z. B. Schiffsbau oder Bauwirtschaft) Anwendung finden, bestehen, die also meist keine holistische Perspektive besitzen (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 4ff.). Zudem besteht nach REIKE ET AL. ein gewisser Dringlichkeitscharakter in der Validierung und Detaillierung von Konzepten (s. REIKE ET AL. 2018, S. 249). Demnach gab es in der Wissenschaft wenig Bemühungen,

Konzepte zu gestalten; stattdessen wurden Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft sowie Vergleiche mit anderen Konzepten veröffentlicht (s. REIKE ET AL. 2018, S. 249). Es fehlen daher weiterhin eindeutige und wissenschaftlich anerkannte Definitionen für einen digitalen Produktpass, inhaltlich hinsichtlich der zu erfüllenden Anwendungsfälle (s. BERGER ET AL. 2022, S. 1). Daraus kann gefolgert werden, dass in Wissenschaft und Praxis noch keine publikationsfähigen Diskussionen über die inhaltlichen Bestandteile des digitalen Produktpasses und deren erforderliche Datengrundlage bestehen. Auf Basis dieser theoriegeleiteten und praxisorientierten Erkenntnisse ergibt sich, dass der Erfolg der Kreislaufwirtschaft, insbesondere für komplexe und digitalisierte Produkte wie Maschinen und Anlagen, in direkter Abhängigkeit von der wechselseitigen Bereitstellung umfassender Informationen und der individuellen Integration von Kreislaufstrategien auf Unternehmensebene steht. In Verbindung mit der Herausforderung, die erforderlichen Wertschöpfungspartner der Kreislaufwirtschaft entlang des Produktlebenszyklus zu vernetzen, ergibt sich die Motivation dieses Dissertationsvorhabens.

1.2 Zielsetzung

In Bezug auf die vorgestellte Ausgangssituation zielt der Inhalt dieser Dissertationschrift darauf ab, einen wissenschaftlich fundierten Vorschlag für den Inhalt eines digitalen Produktpasses für Investitionsgüter in Form eines Informationsmodells zu entwickeln. Dazu wird der Fokus auf die Untersuchung relevanter Kreislaufstrategien und deren kohärenter Unternehmensnetzwerke gelegt, die in einem übergreifenden Modell mit Produktinformationen der Kreislaufwirtschaft zusammengeführt werden.

Zu Erreichung dieser Zielsetzung wird der zentralen Forschungsfrage nachgegangen:

Wie lassen sich Produktinformationen mit den Rollen für die Umsetzung von Kreislaufstrategien verknüpfen und in einem Informationsmodell zusammenführen?

Die zentrale Forschungsfrage wird durch vier detaillierte Unteforschungsfragen ergänzt:

- Welche Kreislaufstrategien existieren für Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus?
- Welche Rollen sind für die Umsetzung der Kreislaufstrategien notwendig und in welchen Beziehungen müssen diese zueinander stehen?
- Welche Produktinformationen werden für die Umsetzung der Kreislaufstrategien benötigt und wie können diese klassifiziert werden?
- Wie lassen sich die Produktinformationen mit den Rollen verknüpfen und in einem Informationsmodell vereinen?

Innerhalb der ersten Unteforschungsfrage wird sich der Frage gewidmet, welche Strategien für Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus in der Kreislaufwirtschaft nutzbar sind. Ergänzt um eine Analyse der ökonomischen Potenziale ergibt sich eine Übersicht relevanter Kreislaufstrategien für Investitionsgüter. Die zweite Unteforschungsfrage bezieht sich auf ein interorganisationales Wertschöpfungsnetzwerk, das

für die Umsetzung ausgewählter Kreislaufstrategien etabliert und durch Rollen charakterisiert ist. Der Erkenntnisgewinn ergibt sich aus den identifizierten Rollen und deren Beziehungen im Wertschöpfungsnetzwerk. Die dritte Forschungsfrage betrifft Produktinformationen, deren Informationsgehalt für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft erforderlich ist. Im Rahmen einer Klassifizierung werden die Informationen für die Anwendung in einem digitalen Produktpass bewertet und geordnet. Die vierte und zentrale Forschungsfrage fokussiert das Vereinen der Rollen im Wertschöpfungsnetzwerk mit den vorhandenen Produktinformationen in einem Erklärungsmodell. Das Modell stellt den zentralen Erkenntnisgewinn dieser Dissertationsschrift dar. Mit dem Erklärungsmodell wird die Beziehungsintensität zwischen den Rollen für die Umsetzung von Kreislaufstrategien und den relevanten Produktinformationen für die Kreislaufwirtschaft bewertet. Im anschließenden Informationsmodell wird das Erklärungsmodell praxisorientiert aufbereitet und visualisiert.

1.3 Wissenschaftstheoretische Einordnung und Struktur der Untersuchung

Die zentrale Motivation dieses Dissertationsvorhabens resultiert aus der Diskrepanz, existierende theoretische Ansätze in die betriebswirtschaftliche Praxis zu übertragen, um interorganisationale Strukturen im Zuge der Nachhaltigkeitsentwicklungen für die Zukunft vorzubereiten. Mit der Arbeit wird daher das Ziel verfolgt, Gestaltungsmodelle zu entwickeln, die einen möglichst effizienten Informationsaustausch zwischen Organisationen in Wertschöpfungsnetzwerken für die Kreislaufwirtschaft sicherstellen.

Im Gegensatz zu den Grundlagenwissenschaften, die einzig der Steigerung des Erkenntnisgewinns dienen, wird in dieser Unternehmung im Rahmen der angewandten Wissenschaften nach praktisch nützlichem Wissen gestrebt: „*(D)er angewandte For- scher wählt Probleme der praktisch handelnden Menschen aus, für deren Lösung kein befriedigendes Wissen zur Verfügung steht*“ (ULRICH 1981, S. 5). Der systemtheoretische Ansatz von Hans ULRICH, der 1968 erstmals in *Die Unternehmung als produktives soziales System* eingeführt wurde (vgl. ULRICH 1970), liefert ein geeignetes Konstrukt für die vorliegende Problemstellung, da die angewandte Unternehmenslehre, vergleichbar der Ingenieurwissenschaften, die Gestaltung von produktiven sozialen Systemen ermöglicht (s. ULRICH u. HILL 1976, S. 308; s. ULRICH 1970, S. 53).

Um ein Grundverständnis des zugrunde liegenden Forschungsansatzes zu schaffen, wird zunächst eine Einordnung in die Wissenschaftssystematik vorgenommen (s. Abbildung 1-3).

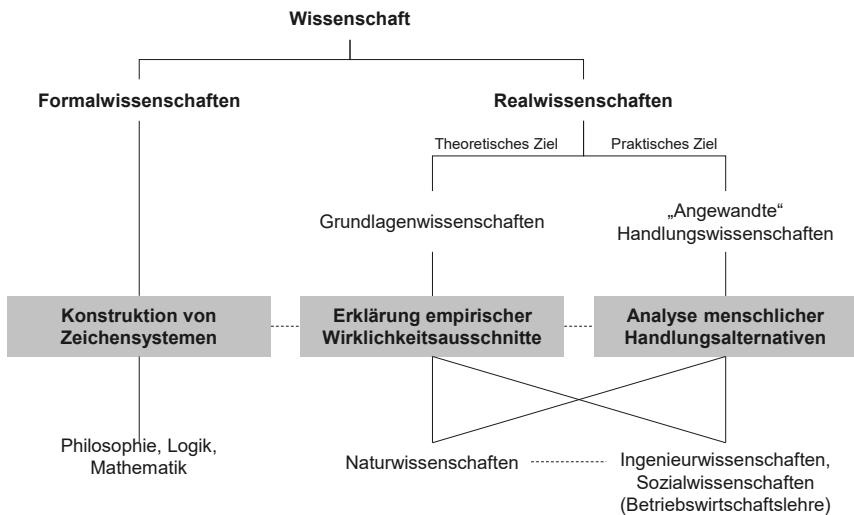


Abbildung 1-3: Wissenschaftssystematik nach ULRICH u. HILL (ULRICH u. HILL 1976, S. 305)

ULRICH u. HILL unterscheiden in ihrem Beitrag zu den *wissenschaftstheoretischen Grundlagen* die Wissenschaft in die Formal- und Realwissenschaften (s. ULRICH u. HILL 1976, S. 305). „Die Formalwissenschaften bemühen sich um die Konstruktion von Sprachen, d. h. von Zeichensystemen mit Regeln zur Verwendung dieser Zeichen“ (ULRICH u. HILL 1976, S. 305). Dazu werden vor allem die Philosophie, Logik und Mathematik gezählt. „Die Realwissenschaften bemühen sich um die Beschreibung, Erklärung und Gestaltung empirisch (...) wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte“ (ULRICH u. HILL 1976, S. 305). Darunter fallen die Grundlagenwissenschaften, die ein theoretisches Ziel zur Erklärung empirischer Wirklichkeitsausschnitte verfolgen und zu denen die Naturwissenschaften gezählt werden und die angewandten Handlungswissenschaften (s. ULRICH u. HILL 1976, S. 305). Deren praktisches Ziel verfolgt die Analyse menschlicher Handlungsalternativen zur Gestaltung sozialer und technischer Systeme. Im technischen Bereich zählen dazu die Ingenieurwissenschaften und im gesellschaftlichen Bereich die angewandten Sozialwissenschaften inklusive der Betriebswirtschaftslehre (s. ULRICH u. HILL 1976, S. 305). Daraus ergibt sich die Aufgabe der Realwissenschaften, subjektiv aufgenommene Wirklichkeitsausschnitte zu explizieren, zu abstrahieren und Gestaltungsmöglichkeiten zu entwerfen (s. ULRICH u. HILL 1976, S. 306). Der Fokus der vorliegenden Arbeit umfasst die Gestaltung von einem Informationsmodell zwischen Organisationen und kann daher in die angewandten Handlungswissenschaften eingeordnet werden.

Um praxisorientierte Problemstellungen in einem wissenschaftlichen Rahmen untersuchen zu können, zielt die angewandte Wissenschaft auf die Prüfung entwickelter

Gestaltungsmodelle im betrachteten Anwendungszusammenhang ab (s. ULRICH 1981, S. 10). Die Grundlage dieses Einsatzes sind stets komplexe Systeme, da für vermeintlich einfache Fragestellungen kein wissenschaftliches Vorgehen vonnöten ist (s. ULRICH 1981, S. 7–8). Eine ordentliche Untersuchung der komplexen Problemstellung erfordert daher eine adäquate forschungsmethodische Vorgehensweise, die ein iteratives Vorgehen aus datengestütztem Erkenntnisgewinn und kritischer Reflexion erfordert (s. KUBICEK 1977, S. 15). Im Forschungsfeld der Aktionsforschung wird dazu ein Praxisproblem durch einen gemischten Kreis aus Wissenschaft und Praxis gelöst (s. WILDE U. HESS 2007, S. 282). Dieser Lernprozess ist in Abbildung 1-4 visualisiert.

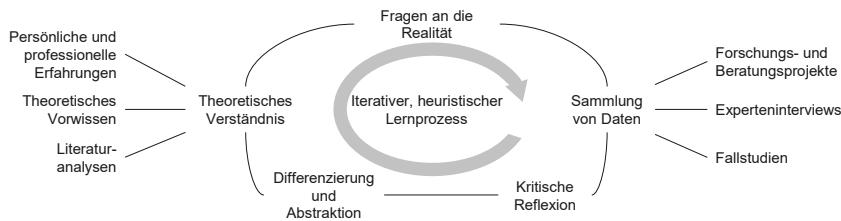


Abbildung 1-4: Lernprozess der explorativen Forschung (SIEGERS 2016, S. 7 i. A. a. KUBICEK 1977, S. 14 u. TOMCZAK 1992, S. 83f.)

Der Lernprozess der explorativen Forschung beschreibt eine iterative, heuristisch geprägte Vorgehensweise, die auf den Hauptelementen des *theoretischen Verständnisses*, den *Fragen an die Realität*, der *Sammlung von Daten*, der *kritischen Reflexion*, und der *Differenzierung und Abstraktion*, beruht (s. KUBICEK 1977, S. 15). Dazu baut der Lernprozess auf der iterativen Heuristik auf, die als Möglichkeit verstanden wird, sehr komplexe Probleme unter der Bedingung eines begrenzten Erkenntnisstands zu verstehen und zu beherrschen (s. KUBICEK 1977, S. 14). Zum Aufbau des theoretischen Verständnisses greift der Forschende auf persönliche und professionelle Erfahrungen, theoretisches Vorwissen und Literaturanalysen zurück, um über Fragen an die Realität erweiternde Fragen und Problemstellungen zu identifizieren (s. KUBICEK 1977, S. 14). Die Überprüfung und Weiterentwicklung der entwickelten Hypothesen über Datensammlung aus der Praxis, kritische Reflexion und Abstraktion erweitern den Forschungsprozess um eine konzeptionelle Komponente, die als Erkenntnisgewinn aus dem Wechselspiel zwischen Theorie und Praxis resultiert (s. KUBICEK 1977, S. 14f.).

1.4 Aufbau der Dissertationsschrift

Auf Basis der wissenschaftstheoretischen Einordnung und der Zielsetzung dieser Dissertationsschrift erfolgt die Gliederung in sieben Kapiteln entlang der Grundlagen, Modellentwicklung und Anwendung (s. Abbildung 1-5).

Grundlagen	1 Einleitung
	2 Begriffliche Grundlagen
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Terminologische Grundlagen ▪ Eingrenzung des Untersuchungsbereichs
Modellentwicklung	3 Stand der Erkenntnisse
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erfassung und Bewertung problemrelevanter Aktivitäten aus Wissenschaft und Praxis ▪ Ableitung des Forschungsbedarfs
	4 Herleitung des Konzeptansatzes
Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definition der formalen und inhaltlichen Modellanforderungen ▪ Vorstellung und Beschreibung der methodischen Grundlagen ▪ Konkretisierung der Vorgehensweise
	5 Detaillierung des Informationsmodells
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erfassung und Auswahl praxisrelevanter Kreislaufstrategien ▪ Entwicklung des Beschreibungsmodells zirkulärer Ökosysteme ▪ Entwicklung des Beschreibungsmodells kreislaufrelevanter Produktinformationen ▪ Entwicklung des Wirkmodells rollenspezifischer Produktinformationen ▪ Modellierung der abgeleiteten Wirkungszusammenhänge
Anwendung	6 Validierung
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abgleich der erzielten Ergebnisse mit den Modellanforderungen ▪ Evaluation der entwickelten Modelle in der Anwendung
7 Zusammenfassung und Ausblick	

Abbildung 1-5: Aufbau und Inhaltsgliederung dieser Dissertationsschrift (eigene Darstellung)

Die Arbeit beginnt im ersten Kapitel mit einer Einleitung und Vorstellung der Motivation und Relevanz des Themenbereichs. Auf deren Grundlage wird die Zielsetzung abgeleitet und es werden die zentralen Forschungsfragen gestellt. Die wissenschaftstheoretische Einordnung bildet anschließend die Basis für den Aufbau und die inhaltliche Gliederung dieser Arbeit.

Im zweiten Kapitel werden zunächst die begrifflichen Grundlagen, die für das Verständnis dieser Forschungsarbeit benötigt werden, erfasst und beschrieben. Dazu wird die Terminologie aus den diese Arbeit betreffenden Bereichen des Produktlebenszyklus, der Kreislaufwirtschaft und der Informationssystematik erklärt und in den Kontext dieser Arbeit eingebettet. Darauf folgend schließt das Kapitel mit einer Eingrenzung des Untersuchungsbereichs in den genannten Themenfeldern.

Aufbauend auf den begrifflichen Grundlagen wird in Kapitel drei der aktuelle Stand der Erkenntnisse aus Wissenschaft und Praxis erfasst und bewertet. Unter Einsatz der Methode der systematischen Literaturrecherche werden wissenschaftliche Ansätze zu Kreislaufstrategien und zirkulären Ökosystemen identifiziert und selektiert. Weiterhin werden ausgewählte Konzepte der Informationsmodellierung aus der Praxis vorgestellt. Daraus folgend wird zum Abschluss der Forschungsbedarf abgeleitet.

Im darauffolgenden Kapitel vier wird der vollständige Konzeptansatz hergeleitet. Dazu werden zunächst die formalen und inhaltlichen Anforderungen an die Modelle definiert und die methodischen Grundlagen erläutert. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse erfolgt die Konkretisierung der Vorgehensweise, die die Basis für Kapitel fünf liefert.

In Kapitel fünf werden anschließend die Partialmodelle dieses Dissertationsvorhabens entwickelt. Im ersten Beschreibungsmodell werden zunächst relevante Kreislaufstrategien für den Maschinen- und Anlagenbau identifiziert und hinsichtlich ihrer Relevanz bewertet. Auf dieser Grundlage wird im zweiten Beschreibungsmodell das zirkuläre Ökosystem modelliert und im dritten Beschreibungsmodell werden kreislaufrelevante Produktinformationen klassifiziert. Im Wirkmodell werden die Wirkungsbeziehungen zwischen diesen Partialmodellen erklärt und im abschließenden Informationsmodell praxisnah modelliert.

Die Validierung des Informationsmodells sowie der Partialmodelle ist Inhalt von Kapitel sechs. Beginnend mit einer Überprüfung der formalen und inhaltlichen Anforderungen, werden die Modelle an konkreten Fallbeispielen aus Unternehmen evaluiert. Innerhalb von Expertengesprächen und einer kritischen Reflexion werden die Ergebnisse kritisch gewürdigt und in ihrer Praxisrelevanz bestätigt.

Diese Dissertationsschrift schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel acht. Darin werden die zentralen Erkenntnisse komprimiert wiedergegeben und zukünftige Forschungspotenziale, die in der Erarbeitung dieser Arbeit identifiziert werden, aufgezeigt.

Zum Erhalten der allgemeinen Lesbarkeit und aufgrund der Tatsache, dass im Kontext dieser Dissertationsschrift Unternehmen und nur vereinzelt Einzelpersonen angesprochen werden, wird sich an der Empfehlung des Rats für deutsche Rechtschreibung vom 26.03.2021 orientiert (s. RAT FÜR DEUTSCHE RECHTSCHREIBUNG 2021). Daher wird eine möglichst neutrale und geschlechtergerechte Sprache eingesetzt, deren Konsistenz jedoch nicht gewährleistet werden kann.

2 Begriffliche Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die begrifflichen Grundlagen dieser Dissertationsschrift definiert und in den Kontext des Untersuchungsbereichs eingeordnet. Damit wird ein einheitliches Grundverständnis für die Inhalte dieser Dissertationsschrift geschaffen. In Unterkapitel 2.1 wird dazu der Produktlebenszyklus von Investitionsgütern beschrieben und auf die Herausforderungen im Kontext einer zirkulären Wirtschaft verwiesen. In Unterkapitel 2.2 werden die Grundlagen der Kreislaufwirtschaft behandelt und eine für diese Arbeit einheitlich gültige Definition festgelegt. Um ein interpretationsfreies Verständnis für die Zusammenarbeit von Organisationen zu schaffen, wird darin in Unterabschnitt 2.2.4 das Konstrukt der Geschäftsökosysteme (engl. *Business Ecosystems*) beschrieben und eingeordnet. In Unterkapitel 2.3 werden anschließend Informationssysteme und -modelle von Investitionsgütern betrachtet und im Rahmen dieser Arbeit einheitlich definiert. Eine Eingrenzung der betrachteten Inhalte bildet den Abschluss des Kapitels.

2.1 Produktlebenszyklus von Investitionsgütern

Zunächst wird der Begriff des Investitionsguts beschrieben und definiert. Unter Investitionsgütern werden in der Regel Objekte materieller Art, die von Nichtkonsumenten für die langfristige Leistungserstellung von eigene Produkten beschafft werden, verstanden (s. SELLIEN U. SELLIEN 1988, S. 2634; s. WOLL 2008, S. 412). Diese Definition schließt Objekte wie Maschinen, Produktionsanlagen, Werkzeuge und Halbfertigfabrikate ein, die für einen Einsatz über mehrere Zeitperioden erworben werden (s. WOLL 2008, S. 412; s. SELLIEN U. SELLIEN 1988, S. 2634). Die Begriffe des Kapitalguts und der dauerhaften Produktionsgüter haben nach der gängigen Definition eine ähnliche Bedeutung und werden daher kongruent verwendet (s. WOLL 2008, S. 331, 412).

Der Begriff *Produktlebenszyklus* handelt im Allgemeinen von der „zeitlichen Entwicklung technischer Produkte“ (FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 296). In der Wissenschaft und Praxis werden darunter drei grundlegende Sichtweisen zusammengefasst (s. FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 296):

- die betriebswirtschaftliche Sichtweise,
- die technologische Sichtweise,
- die intrinsische Sichtweise

Die *betriebswirtschaftliche Sichtweise* betrachtet den Produktlebenszyklus auf Basis von betriebswirtschaftlichen Kenngrößen (z. B. Umsatz) für den Zeitverlauf eines Produktmodells im Marktfeld (s. FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 296; s. AUMAYR 2019, S. 268). Bei einem Produktmodell handelt es sich bspw. um ein Automobil des Typs Golf 2 von Volkswagen. Klassische Lebenszyklusphasen umfassen dabei *Einführung*, *Wachstum*, *Reife*, *Sättigung* und *Degeneration* (s. AUMAYR 2019, S. 268). Die Dauer der Phasen ist abhängig von der Branche und Produktart und erfordert eine fortwährende Überwachung des Marktes, um mit dem Erreichen der Degenerationsphase

neue, innovative Produktmodelle anbieten zu können (s. FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 296-297; zit. nach: KRAMER 1987, S. 284). Die *technologische Sichtweise* des Produktlebenszyklus legt den Fokus auf die technologische Leistungsfähigkeit eines Produkttyps über seine Laufzeit und Stufen der Weiterentwicklung hinweg (s. FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 297). Ein Beispiel stellt der Produkttyp des Volkswagen Golf dar, der über Jahrzehnte kontinuierlich weiterentwickelt wurde. Der Verlauf der technologischen Leistungsfähigkeit nimmt dabei die Form einer S-Kurve ein, die durch die physikalischen Grenzen der Technologie beschränkt wird (s. SAAD ET AL. 1993, S. 63ff.; s. FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 297). Dieser Dissertationsschrift wird jedoch die *intrinsische Sichtweise* zugrunde gelegt. Die *intrinsische Sichtweise* wird definiert als „*Abfolge von Situationen, die das eigentliche Produkt von der ersten [...] Idee, über dessen Entwicklung, Fertigung, Vertrieb, Nutzung usw. bis zu seiner Entsorgung oder sogar darüber hinaus durchlebt*“ (FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 297). Der Lebenszyklus wird dazu im Allgemeinen in fünf Phasen abstrahiert (s. Abbildung 2-1).



Abbildung 2-1: Lebenszyklusphasen eines Produkts (eigene Darstellung i. A. a. STARK 2020, S. 6; Boos u. ZANCUL 2012, S. 340)

In der Ideenentwicklung befindet sich das Produkt in einer frühen Konzeptphase und existiert vor allem als immaterielles Gedankengut (s. STARK 2020, S. 6). In der Produktentwicklung wird das Konzept virtuell entwickelt und prototypisch umgesetzt (s. Boos u. ZANCUL 2012, S. 337f.). Die Phase der Produktherstellung umfasst die eigentliche Fertigung und erzeugt einen Zustand, in dem das Produkt für die Kundschaft nutzbar ist (s. STARK 2020, S. 6). Die Produktnutzung beschreibt neben der reinen Nutzungsphase auch Teile des Vertriebs und den Service, um die Leistungsfähigkeit des Produkts langfristig sicher zu stellen (s. Boos u. ZANCUL 2012, S. 340). Mit der Produktentsorgung endet der Lebenszyklus des Produkts, indem die Produktbestandteile recycelt oder thermisch verwertet werden (s. STARK 2020, S. 6). Der Inhalt dieser Dissertationsschrift lässt sich insbesondere auf die Lebenszyklusphasen der Produktnutzung und Produktentsorgung eingrenzen.

Zusammenfassende Definition des Produktlebenszyklus

Nach der intrinsischen Definition, die dieser Dissertationsschrift zugrunde liegt, wird der Produktlebenszyklus definiert durch die Chronologie situativer Ereignisse, die ein Produkt von Konzeption bis Entsorgung durchläuft und beeinflusst (s. FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 297).

2.2 Kreislaufwirtschaft

Abschnitt 2.2 gibt einen Überblick über den zentralen Ansatz dieses Dissertationsvorhabens: die Kreislaufwirtschaft in der produzierenden Industrie. In Unterabschnitt 2.2.1 wird zunächst der Begriff in den historischen Kontext eingeordnet und eine

allgemeingültige Definition präsentiert. In Unterabschnitt 2.2.2 wird anschließend das übergreifende Konzept der Kreislaufwirtschaft als Ansatz eines ökologischen Wirtschaftssystems beschrieben und Implikationen für die betriebliche Nutzung hervorgebracht. Neben den Implikationen werden in Unterabschnitt 2.2.3 Kreislaufstrategien beschrieben, deren Anwendung im betriebswirtschaftlichen Kontext ein Ziel dieses Dissertationsvorhabens darstellt. Darauf aufbauend bildet Unterabschnitt 2.2.4 die definitorische Basis des Themenfelds der zirkulären Ökosysteme. Die Beschreibung entsprechender Fallbeispiele komplettiert das Unterkapitel durch seinen praxisrelevanten Bezug.

2.2.1 Begriffsherkunft und -definition

In Abgrenzung zum in Unterkapitel 2.1 vorgestellten Produktlebenszyklus beschreibt die Kreislaufwirtschaft einen Ansatz mit der Zielsetzung, Produkte möglichst lang in einem wertschöpfenden Kreislauf zu erhalten (s. BOURGUIGNON 2016, S. 2; s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2015, S. 5). Das Konzept der Kreislaufwirtschaft in seiner heutigen Form lässt sich auf den Ansatz der *Industrial Ecology* von PEARCE UND TURNER aus dem Jahr 1990 zurückführen (vgl. PEARCE U. TURNER 1989; s. ANDERSEN 2007, S. 133). In Anlehnung an den ersten und zweiten Hauptsatz der Thermodynamik postulieren TURNER ET AL. ein *materials balance model*, das die Wirtschaft als materialverarbeitendes und produkttransformierendes System beschreibt (s. TURNER ET AL. 1993, S. 15–17). Demnach werden Materialien nicht zerstört, sondern durchlaufen eine Serie von Zustandsänderungen, die ihren Energiegehalt und Entropie verändert (s. TURNER ET AL. 1993, S. 17). Im vorgestellten Konzept herrscht eine lineare Sichtweise vor, die beschreibt, dass Materialien mit niedriger Entropie in das wirtschaftliche System eingeführt werden und mit hoher Entropie als nicht mehr nutzbare Materialien in den biologischen Kreislauf zurückgeführt werden müssen (s. TURNER ET AL. 1993, S. 17). Ferner wird postuliert, dass der ökologische Mehrwert für die Gesellschaft nicht nur in der Minimierung von Abfall, sondern auch in der Reduktion der Nutzung von Primärmaterialien liegt (s. ANDERSEN 2007, S. 133).

Moderne Ansätze der Kreislaufwirtschaft haben den Betrachtungsraum erweitert und inkludieren nun neben dem Recycling auch die inneren Kreisläufe des Produktlebenszyklus (s. POTTING ET AL. 2017, S. 5; s. KIRCHHERR ET AL. 2017, S. 229). In Wissenschaft und Praxis konnte zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Dissertationsschrift noch kein Konsens einer universellen Definition der Kreislaufwirtschaft gefunden werden, weshalb zum Verständnis dieser Arbeit auf die folgende Definition referenziert wird. Nach einer Untersuchung von 114 Definitionen haben KIRCHHERR ET AL. versucht, eine allgemeingültige Definition zu benennen (s. KIRCHHERR ET AL. 2017, S. 229). Danach ersetzt die Kreislaufwirtschaft das bestehende End-of-Life-Konzept durch Reduktion, Wiederverwendung, Recycling und Rückgewinnung von Materialien in Produktions- und Konsumprozessen (s. KIRCHHERR ET AL. 2017, S. 229). Die Definition umfasst die Mikroebene (Produkte, Unternehmen, Kundschaft), die Mesoebene (ökologische Industriekomplexe) und die Makroebene (Städte, Regionen), mit dem Ziel, eine Entwicklung zum nachhaltigen Wirtschaften voranzutreiben (s. KIRCHHERR ET AL. 2017,

S. 229). Dazu soll ein möglichst großer Teil des ökonomischen und ökologischen Wertes erhalten und zurückgewonnen werden, um die Nutzung der natürlich begrenzten Ressourcen zu reduzieren (s. THIERRY ET AL. 1995, S. 114; s. KLENK ET AL. 2020, S. 127; s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 30). In Hochrechnungen wird geschätzt, dass die Kreislaufwirtschaft das Potenzial hat, 80 – 90 % der Rohmaterialien und des Energieverbrauchs einzusparen (s. TOLIO ET AL. 2017, S. 586). Dadurch kann eine Reduktion der Produktpreise um 25 – 30 % erreicht werden (s. TOLIO ET AL. 2017, S. 586).

Zusammenfassende Definition der Kreislaufwirtschaft

Auf Grundlage der vorangegangenen Ausführungen beschreibt die Kreislaufwirtschaft Ansätze zum Erhalt und zur Rückgewinnung des ökonomischen und ökologischen Wertes von Produkten, um die Nutzung natürlicher Ressourcen auf ein Minimum reduzieren.

2.2.2 Konzept der Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft wird in vielen wissenschaftlichen Fachgebieten kontrovers diskutiert mit dem Ergebnis, dass eine Vielzahl an Konzepten vorhanden ist. Zum Grundverständnis dieser Dissertationsschrift ist es elementar, zu erwähnen, dass der Verfasser sich auf zwei konzeptuelle Ansätze der Kreislaufwirtschaft, von ACHTERBERG und von der ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, stützt, die eine thematische Eingrenzung des Betrachtungsraums mithilfe geeigneter Modelle erreichen. Zur didaktischen Strukturierung wird zu Beginn auf den simpleren Ansatz von ACHTERBERG zurückgegriffen, ehe das umfassendere Modell der ELLEN MACARTHUR FOUNDATION eingehender dargestellt wird.

Eine modellhafte Beschreibung der Wertentwicklung eines Produkts im Lebenszyklus ist der *Value Hill* nach ACHTERBERG (s. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 4f.). Das Modell stellt den Produktlebenszyklus in Beziehung zur produktbezogenen Wertentwicklung dar und skizziert jene in den Phasen des *Wertaufbaus*, des *Werterhalts* und der *Wertbewahrung* (s. Abbildung 2-2).

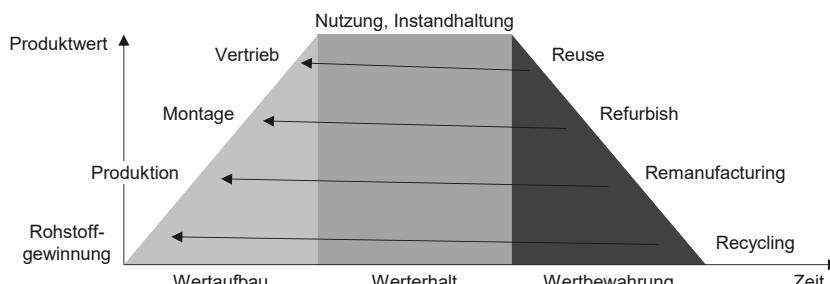


Abbildung 2-2: Der *Value Hill* in der Kreislaufwirtschaft (eigene Darstellung i. A. a. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 4f.; SCHMIDT ET AL. 2019, S. 147)

Das Modell des *Value Hills* bezieht sich auf das Ziel, die Nutzungsphase eines Produkts möglichst lang zu gestalten, um die Ressourcennutzung im Sinne einer Konsumgesellschaft zu reduzieren (s. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 4). Die Phase des Wertaufbaus beschreibt den Zuwachs des Produktwerts in der Produktentwicklung und -herstellung (s. SCHMIDT ET AL. 2019, S. 147). Im klassischen linearen Wirtschaftsmodell wird der erreichte Höchstwert nur für eine bestimmte Zeit gehalten und fällt anschließend wieder ab (s. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 4). Bereits in der Wertaufbauphase können Strategien aus dem Konzept der Kreislaufwirtschaft angewandt werden, um durch ein entsprechendes Produktdesign die Voraussetzung für einen langfristigen Werterhalt zu schaffen (s. SCHMIDT ET AL. 2019, S. 147; s. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 5). Ziel ist es, die Nutzungsphase des maximalen Produktwerts möglichst lange zu halten und durch werterhaltende Strategien wieder auf den Maximalwert zu bringen (s. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 5). Die Phase der Wertbewahrung umfasst sodann Strategien zur Gegensteuerung eines kontinuierlichen Wertverlusts, welcher ohne adäquate Kreislaufstrategien manifest würde (s. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 5). In Abbildung 2-2 ist der vollständige *Value Hill* dargestellt, der den Wertaufbau im Produktentstehungsprozess, den Werterhalt im Nutzungsprozess und die Wertbewahrung durch Strategien der Kreislaufwirtschaft beschreibt (s. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 5).

Der umfassendere Ansatz der ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, dargestellt in Abbildung 2-3, unterscheidet zwischen einem biologischen und einem technischen Kreislauf (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 24).

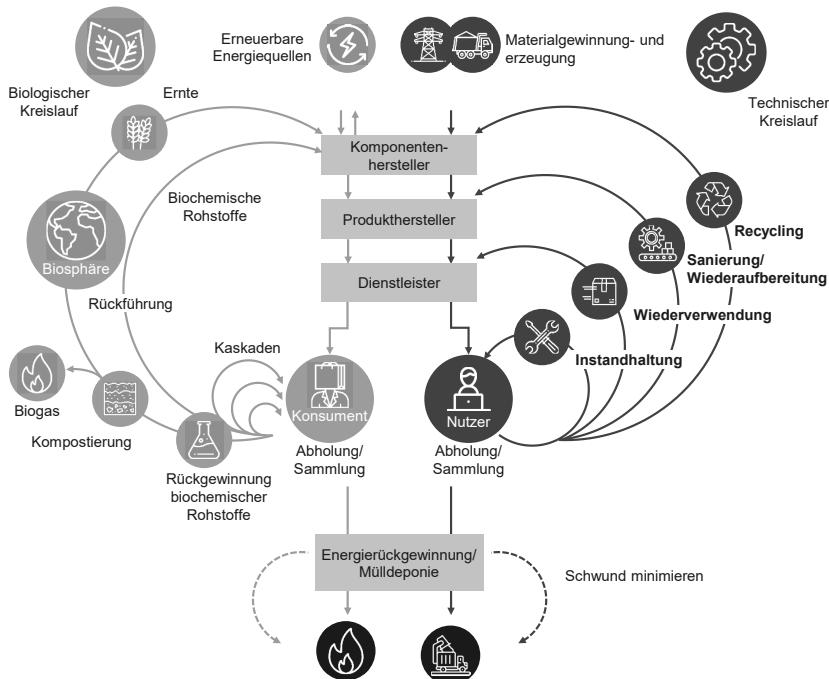


Abbildung 2-3: Konzept der Kreislaufwirtschaft (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 24)

Der biologische Kreislauf basiert auf natürlichen Rohstoffen und beschreibt kurzlebige Produkte sowie Konsumgüter wie Textilien, Nahrung oder Papier (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 51). Aufgrund ihrer Kurzlebigkeit empfiehlt die Autorschaft, auf biologische Kreisläufe in Kaskaden zurückzugreifen (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 51). Über mehrere Kaskaden können aus Kleidungstextilien Polsterfüllungen und Dämmstoffe hergestellt werden (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 33).

Der technische Kreislauf umfasst Produkte mit einer mittleren Lebensdauer und regelmäßiger technologischer Evolution. Gebäude und Brücken werden ebenso ausgeschlossen wie Einwegprodukte (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 37). Gegenüber dem biologischen Kreislauf bietet der technische Kreislauf mehrere Kreislaufstrategien, deren Detaillierung in Abschnitt 2.2.3 folgt. Abbildung 2-3 verdeutlicht auf der rechten Hälfte die Kreislaufstrategien, denen Prinzipien zum Werterhalt von Produkten folgen. Das erste Prinzip besagt, je enger die Kreislaufzyklen umgesetzt werden, desto stärker ist der positive Einfluss auf die ökologische Nachhaltigkeit (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 30). Das zweite Prinzip beschreibt das Potenzial, Produkte und Komponenten möglichst lange innerhalb der inneren Zyklen zu behalten, indem eine umfangreiche Instandhaltung und Wiederverwendung umgesetzt

wird (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 30; s. BOCKEN ET AL. 2016, S. 309). Als Beispiel wird dazu der Produktlebenszyklus von Lieferfahrzeugen aufgeführt. Bei einer durchschnittlichen Laufzeit von acht Jahren und einem Austausch der sechs anfälligen Bauteile (z. B. Fahrwerk und Batterien) wird hochgerechnet, dass der Anteil das Refurbishments um 26 % des Fahrzeuggewichts am Lebenszyklusende erhöht und das Recycling um 19 % reduziert werden kann (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 45). Damit wird makroökonomisch eine CO₂-Reduktion von 6,3 Millionen Tonnen ausgelöst (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 45).

Um die vorgestellten Kreisläufe umzusetzen, fehlt laut der ELLEN MACARTHUR FOUNDATION eine umfangreiche Kollaboration zwischen Industrien und Sektoren, die unter anderem eine Vernetzung notwendiger Informationen umfasst (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 58; s. BERG ET AL. 2020, S. 6). Diese Dissertationsschrift folgt dem Ansatz einer Verstärkung der inneren Zyklen mithilfe von Informationsmodellen, die als Grundlage einer interorganisationalen Kollaboration dienen können.

2.2.3 Kreislaufstrategien

Wie im vorherigen Unterabschnitt beschrieben, sind die Konzepte der Kreislaufwirtschaft theoretisch-konzeptionell gestaltet. Daraus abgeleitet werden Kreislaufstrategien, die konkrete Handlungsfelder für Unternehmen im Kontext der Kreislaufwirtschaft beschreiben und in der Regel Maßnahmenbündel zur Umsetzung umfassen. In der Literatur werden mit dem Begriff Kreislaufstrategien unternehmerische Ansätze zusammengefasst, die zu einer zirkulären Wirtschaft und zu mehr Ressourceneffizienz beitragen (s. POTTING ET AL. 2017, S. 14; s. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA) ET AL. 2020, S. 9). Der Ursprung der Kreislaufstrategien ist im *Product Recovery Management* zu finden (s. INNOVATIEZUID 2013, S. 14). Unter *Product Recovery Management* verstehen THIERRY ET AL. das Management gebrauchter und ausgemusterter Produkte, Komponenten und Materialien, die wieder in den Verantwortungsbereich des Herstellers zurückgeholt werden (s. THIERRY ET AL. 1995, S. 114). Dabei verfolgt wird mit dem *Product Recovery Management* das Ziel verfolgt, einen möglichst hohen ökonomischen und ökologischen Wert zurückzuerlangen und dadurch die Abfallmenge in ihrer Gesamtheit zu reduzieren (s. THIERRY ET AL. 1995, S. 114). Die Unterscheidung in spezifische Kreislaufstrategien unterstützt in der Entscheidungsfindung zur Weiterverwendung des Produkts am Lebenszyklusende (ALAMEREW ET AL. 2020, S. 2). Eine einzelne Kreislaufstrategie umfasst in der Regel ein konkretes Anwendungsfeld (z. B. Remanufacturing oder Recycling), weshalb in der Regel mehrere Kreislaufstrategien kombiniert werden (s. ALAMEREW ET AL. 2020, S. 2). ELLEN MACARTHUR unterscheidet in ihrem Konzept der Kreislaufwirtschaft demgemäß zwischen dem Radius der Kreislaufzyklen mit dem Ziel, den Zyklus mit möglichst kleinem Radius und möglichst langfristig zu gestalten (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 7). Wie in Abbildung 2-3 dargestellt, ist im technischen Kreislauf der kleinste Radius die Instandhaltung. Dies bewirkt eine möglichst geringe Nutzung von Neumaterialien und reduziert die Ausfallzeit des Produkts im Vergleich zu Wiederaufbereitungsmethoden (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 7). Ein möglichst langfristiges Halten der Produkte im Zyklus erfordert

die wiederholte Anwendung von Wiederaufbereitungsmethoden oder eine langlebige Auslegung von Maschinen und Anlagen (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 30). Die ELLEN MACARTHUR FOUNDATION formuliert in ihrem Kreislaufwirtschaftskonzept dazu vier übergeordnete Kreislaufstrategien der *Instandhaltung* (engl. *Repair*), der *Wiederverwendung* (engl. *Reuse*), der *Wiederaufbereitung* (engl. *Remanufacturing*) und des *Recyclings* (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 24). Auf der Instandhaltung aufbauend, definieren die Autoren im nächsten Zyklus die Wiederverwendung als wiederholte Nutzung des originalen Produkts in seiner ursprünglichen Funktion, ohne umfangreiche Veränderungen oder Aktualisierungen durchzuführen (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 25). Unter Wiederaufbereitung verstehen sie den Prozess der Demontage eines Produkts in seine Komponenten, das Durchlaufen einer Qualitätsprüfung und anschließende Montieren in ein neues Produkt aus weiterhin funktionstüchtigen Komponenten (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 25). Das Recycling umfasst zuletzt das Zurückgewinnen der Materialien zum Einsatz in Neuprodukten sowie in der thermischen Verwertung (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 25). Mit ihrem Konzept beschreibt die ELLEN MACARTHUR FOUNDATION mögliche Anwendungsszenarien der Kreislaufwirtschaft, die für Maschinen und Anlagen umsetzbar sind, und zeigt auf, welche Zielrichtungen anzustreben sind. Eine detaillierte Herleitung und Definition der identifizierten Kreislaufstrategien sind in Unterkapitel 3.2.1 zu finden.

Dagegen unterscheiden KIRCHHERR ET AL. zunächst zwischen drei systemischen Perspektiven, die es für eine praktische Anwendung von Kreislaufstrategien zu berücksichtigen gilt (s. KIRCHHERR ET AL. 2017, S. 223):

- Die *mikrosystemische* Perspektive fokussiert Veränderungen auf einer Produkt-, Firmen- oder Kundenebene.
- Die *mesosystemische* Perspektive beschreibt die Umsetzung des Konzepts der Kreislaufwirtschaft in einer regionalen Umgebung wie Industriekomplexen.
- Die *makrosystemische* Perspektive untersucht eine national-globale Ebene und deren weltwirtschaftliche Strukturen.

Um im Rahmen dieses Dissertationsvorhabens die relevante Zielgruppe aus Unternehmensvertretern der Nachhaltigkeitsabteilungen und Softwareingenieuren erreichen zu können, wird der Autor dieser Dissertationsschrift eine mikrosystemische Produkt Ebene fokussieren, die praxisrelevante Kreislaufstrategien für Investitionsgüter liefern kann. Eine Untersuchung relevanter Kreislaufstrategien und deren Anwendbarkeit werden in Abschnitt 5.1 für den Maschinen- und Anlagenbau untersucht und bewertet, um auf dieser Basis ein fundiertes Informationsmodell zu konzeptionieren.

2.2.4 Zirkuläre Ökosysteme der produzierenden Industrie

Anhand des vorgestellten Konzepts der Kreislaufwirtschaft zeigt sich, dass eine lebenszyklus- und unternehmensübergreifende Betrachtung von Investitionsgütern viele Stakeholder adressiert und eine Untersuchung von Geschäftsökosystemen (engl.

Business Ecosystems) erfordert (s. CAGNO ET AL. 2021, S. 17; s. ESMAEILIAN ET AL. 2020, S. 14; s. BOCKEN ET AL. 2016, S. 315). In der vorliegenden Dissertationsschrift behilft sich der Autor mit der Definition von Unternehmensnetzwerken, um darüber die Notwendigkeit der Untersuchung von Geschäftsökosystemen herzuleiten, die in diesem Unterabschnitt definiert werden.

Im Allgemeinen beruhen Netzwerke auf dem Phänomen, dass „*Akteure über Beziehungen miteinander verbunden sind*“ (RANK 2015, S. 2) und das Ziel verfolgen, darüber Rückschlüsse auf das Verhalten der Akteure zu ziehen (s. RANK 2015, S. 2; s. SYDOW 2005, S. 78). Der Begriff *Akteur* beschreibt dabei Personen und Gruppen sowie Organisationen und Gemeinschaften, die im Unternehmensnetzwerk aktiv sind und deren Beziehungen nach Inhalt, Form und Intensität charakterisiert werden können (s. SYDOW 2005, S. 78). Unternehmensnetzwerke werden auch als interorganisationale Netzwerke bezeichnet und betreffen die Beziehungsstrukturen zwischen eigenständigen Unternehmen (s. RANK 2015, S. 2; s. SYDOW 2005, S. 78). Eine Einordnung wissenschaftlich gängiger Zieldefinitionen für die Betrachtung von Unternehmensnetzwerken wurde in der Dissertation von WIENINGER praktiziert, auf die sich im Folgenden gestützt wird (s. WIENINGER 2020, S. 36f.). In der englischsprachigen Literatur wird oft auf die weit verbreitete Definition von JARILLO zurückgegriffen, die Unternehmensnetzwerke als „*long-term, purposeful arrangements among distinct but related for-profit organizations that allow those firms in them to gain or sustain competitive advantage vis-a-vis their competitors outside the network*“ beschreibt (s. JARILLO 1988, S. 32). In dieser Definition zeichnet sich die Hauptmotivation von Unternehmensnetzwerken durch das Realisieren von Wettbewerbsvorteilen der teilnehmenden Unternehmen im Netzwerk gegenüber der Konkurrenz aus. Im deutschsprachigen Raum liefert dagegen SYDOW eine angesehene Zieldefinition für die Anwendung von Unternehmensnetzwerken: „*Ein Unternehmensnetzwerk stellt eine auf die Realisierung von Wettbewerbsvorteilen zielende Organisationsform ökonomischer Aktivitäten dar, die sich durch komplex-reziproke, eher kooperative denn kompetitive und relative stabile Beziehung zwischen rechtlichen selbständigen, wirtschaftliche jedoch zumeist abhängigen Unternehmen auszeichnet.*“ (SYDOW 2005, S. 79). Es kann festgestellt werden, dass Unternehmensnetzwerke mit dem Ziel gegründet werden, einen Wettbewerbsvorteil gegenüber außenstehender Konkurrenz zu realisieren. Die involvierten Unternehmen treten dazu eine langfristige und stabile Kooperation an. In den Vorarbeiten dieses Dissertationsvorhabens konnte allerdings eruiert werden, dass nur wenige Unternehmensnetzwerke für die Kreislaufwirtschaft gebildet wurden (vgl. R-Cycle Initiative, Pre-Zero) und diese vor allem im Recyclingbereich tätig sind.

Für die Kreislaufwirtschaft von Investitionsgütern wird daher im Kontext dieser Dissertationsschrift auf das Konzept der Geschäftsökosysteme zurückgegriffen, das die Zusammenarbeit zwischen Akteuren in einem offenen interorganisationalen Netzwerk beschreibt (s. WIENINGER 2020, S. 40). Der ursprüngliche Ansatz von Geschäftsökosystemen für die Interaktion von Unternehmen in Netzwerken wurde bereits im Jahr 1993 von MOORE als Managementkonzept im *Harvard Business Review* präsentiert (s. ANGGRAENI ET AL. 2007, S. 4; vgl. MOORE 1993). MOORE hat Geschäftsökosysteme

dazu wie folgt definiert (s. MOORE 1996, S. 26): „*An economic community supported by a foundation of interacting organizations and individuals – the organisms of the business world. This economic community produces goods and services of value to customers, who are themselves members of the ecosystem. The member organisms also include suppliers, lead producers, competitors, and other stakeholders. Over time, they coevolve their capabilities and roles, and tend to align themselves with the directions set by one or more central companies. Those companies holding leadership roles may change over time, but the function of ecosystem leader is valued by the community because it enables members to move toward shared visions to align their investments, and to find mutually supportive roles.*“ In Analogie zum biologischen Ökosystem beschreibt MOORE Organisationen als Organismen des Wirtschaftssystems und stellt dabei fest, dass sich Organisationen parallel entwickeln und dazu tendieren, ihre Fähigkeiten und Kompetenzen anzugeleichen (s. MOORE 1996, S. 26). Dazu nehmen Organisationen im Ökosystem unterschiedliche Rollen (z. B. Führungs- und Komplementärrollen) ein, die in der Erfüllung zukünftiger Visionen wertstiftend erscheinen (s. MOORE 1996, S. 26). Innovationen entstehen parallel mit der Weiterentwicklung des Geschäftsökosystems, indem sich Organisationen kooperativ und kompetitiv verhalten, um Kundenwünsche zu erfüllen (s. MOORE 1993, S. 76). In Geschäftsökosystemen tragen die Charakteristika der Co-Evolution und Kooperation zur Innovationsfähigkeit bei (s. WIENINGER ET AL. 2019, S. 2). Unter Co-Evolution wird verstanden, dass Akteure des Ökosystems parallel Fähigkeiten entwickeln und gemeinsam innovieren, um das Wertversprechen gegenüber dem Kunden zu maximieren (s. WIENINGER ET AL. 2019, S. 8). Kooperation beschreibt das Spannungsfeld, in dem Akteure zur Leistungserstellung in einem Ökosystem kooperieren, aber zeitgleich in einem anderen Marktsegment im Wettbewerb stehen (s. WIENINGER ET AL. 2019, S. 2). Beide Charakteristika lassen sich an zirkulären Ökosystemen erkennen, da zum einen gemeinsam Fähigkeiten entwickelt werden, um Materialien so lange wie möglich im Kreislauf zu halten, zum anderen ebenso um begrenzte Sekundärmaterialien konkurriert wird. MOORE postuliert darüber hinaus, dass sich Ökosysteme sukzessive aus einer zufälligen Sammlung von Elementen zu einer strukturierten Community entwickeln (s. MOORE 1993, S. 76). Diese Entwicklung durchläuft vier Evolutionsstufen (Geburt, Expansion, Führung und Selbsterneuerung), die Organisationen eigene Gestaltungsmöglichkeiten liefern (s. MOORE 1993, S. 76).

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde daher im Jahr 2022 am FIR e. V. an der RWTH Aachen eine kongruente Definition entwickelt. Demnach sind Geschäftsökosysteme dynamische, zumindest teilweise offene Strukturen verschiedener, voneinander abhängiger, aber autonomer Akteure, die ihre Aktivitäten auf ein gemeinsames Ziel hin koordinieren, um gemeinschaftlich einen Mehrwert zu schaffen (s. CONRAD ET AL. 2022, S. 8). Auf diese Definition wird sich für diese Doktorarbeit gestützt. Eine Abgrenzung gegenüber anderen interorganisationalen Netzwerktypen ist in Abbildung 2-4 zu finden. Es kann festgestellt werden, dass der kooperative Charakter von Geschäftsökosystemen ein unterscheidendes Element zwischen den Netzwerktypen ist (s. PELTONIEMI 2004, S. 4). Cluster zeigen im Akteursverhältnis ähnliche Charakteristika, sind

jedoch regional begrenzt und weisen daher nur einen begrenzten Informations- und Wissensaustausch auf (s. PELTONIEMI 2004, S. 2). Den Netzwerktyp der Wertketten gilt es für die Kreislaufwirtschaft aufzubrechen, weshalb Geschäftsökosysteme für diese Dissertationsschrift den geeigneten Fokus darstellen.

Netzwerktyp Charakteristika	Wertkette	Unternehmens- netzwerk	Cluster	Geschäfts- ökosystem
Wertschöpfungs- prozess	sequenziell oder linear	mehrdirektional	keine Angabe	mehrdirektional
Akteursverhältnis	kompetitiv	kooperativ	primär kompetitiv, bedingt kooperativ	kooperativ und kompetitiv
Industriegrenzen	industriesspezifisch	industrieübergreifend	lokaler Fokus	industrieübergreifend
Informations- und Wissensaustausch	begrenzter Austausch	intensiver Austausch	begrenzter Austausch	intensiver Austausch

Abbildung 2-4: Übersicht von interorganisationalen Netzwerktypen (eigene Darstellung i. A. a. PELTONIEMI 2004, S. 5)

Der Ökosystemansatz bietet ein Rahmenwerk, das zur systematischen Komplexitätsreduktion und Modellierung von involvierten Akteuren und deren Beziehungen in der Umsetzung von Kreislaufstrategien genutzt wird. Die aktuelle Forschung zu interorganisationalen Netzwerken in der Kreislaufwirtschaft befindet sich allerdings noch im Anfangsstadium. Die ELLEN MACARTHUR FOUNDATION hat in ihrem Konzept zunächst relevante Stakeholder wie Komponentenhersteller, Hersteller, Dienstleister und Nutzer aufgeführt, um die Komplexität der Anwendung exemplarisch und nachvollziehbar darstellen zu können (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 24). AMINOFF ET AL. haben darüber hinaus einen konzeptuellen Ordnungsrahmen auf Basis des Co-Innovation-Ansatzes entwickelt, durch den Geschäftsökosysteme im Sinne der Kreislaufwirtschaft konzeptioniert werden können (s. AMINOFF ET AL. 2017). Auf Meso-Level adressiert der Ordnungsrahmen dazu die Managementebene in Organisationen mit dem erklärten Ziel, Führungskräfte als Transformationstreiber über die Mechanismen zirkulärer Ökosysteme aufzuklären (s. AMINOFF ET AL. 2017, S. 530). AMINOFF ET AL. führen dazu den Begriff der *Circular Economy ecosystems* ein, den sie wie folgt definieren: *“Circular Economy ecosystems (are defined) as co-evolving, dynamic and potentially self-organizing configurations, in which actors integrate resources and co-create circular value flows in interaction with each other.”* (AMINOFF ET AL. 2017, S. 530) AMINOFF ET AL. kommen zu dem Schluss, dass Co-Innovation von Geschäftsmodellen der integrale Bestandteil in der Transformation zu Geschäftsökosystemen im Sinne der Kreislaufwirtschaft ist (s. AMINOFF ET AL. 2017, S. 531). Eine ausführliche Analyse der bestehenden Literatur zu zirkulären Ökosystemen ist in Unterabschnitt 3.2.2 zu finden.

Zusammenfassende Definition zirkulärer Geschäftsökosysteme

Zirkuläre Geschäftsökosysteme (im Folgenden auch zirkuläre Ökosysteme genannt) werden definiert durch dynamische, teilweise offene Strukturen verschiedener voneinander abhängiger, dennoch autonomer wirtschaftlicher Akteure, die ihre Aktivitäten

koordinieren, um gemeinsam die Ressourcennutzung ihrer wertschöpfenden Tätigkeiten zu optimieren (s. CONRAD ET AL. 2022, S. 8).

2.3 Informationssysteme und -modelle

Ausgehend von der Zielstellung dieser Dissertationsschrift werden in Unterkapitel 2.3 Begriffsdefinitionen und terminologische Grundlagen zu Informationsmodellen und -systemen beschrieben. Dazu wird in Unterabschnitt 2.3.1 zunächst eine Abgrenzung zwischen Daten und Informationen vorgenommen, bevor in Unterabschnitt 2.3.2 auf die Modellierung von Informationen eingegangen wird. Das Kapitel schließt mit Unterabschnitt 2.3.3, in dem die Systemlandschaft relevanter Informationssysteme im Produktlebenszyklus beschrieben wird.

2.3.1 Abgrenzung von Informationen und Daten

Die Definition des Begriffs der *Information* ist nicht trivial und wird kontrovers diskutiert (s. KRCMAR 2015, S. 11). In der allgemeinsprachlichen Verwendung wird die Information in verschiedenem Kontext gebraucht, wie das Informieren in der Zeitung, das „Sich-Informieren“ in einer neuen Stadt oder der „Informationsüberfluss“, mit dem Menschen im heutigen Zeitalter konfrontiert werden (s. KRCMAR 2015, S. 11). LEHNER ET AL. haben vor diesem Hintergrund eine umfassende Begriffsübersicht erstellt (s. LEHNER ET AL. 1995, S. 165ff.). Unter anderem in den Fachdisziplinen der Betriebswirtschaftslehre, Informatik, Entscheidungstheorie und Naturwissenschaften sind eigene Informationsbegriffe vorherrschend (s. LEHNER ET AL. 1995, S. 165ff.; s. KRCMAR 2015, S. 12–18).

Zum Verständnis ist eine einheitliche Definition im Rahmen dieser Dissertationsschrift unerlässlich. Daher wird sich in dieser Arbeit auf die folgende Definition nach GRESCHNER U. ZAHN gestützt: „*Informationen entstehen (...) durch die Verarbeitung von Daten (und bilden) die Zweckorientierung von Daten für einen Entscheidungsprozess. [...] Dabei führt die Kenntnis der Wirkung von Informationen und das Vermögen, diese Kenntnis problemgerecht einzusetzen [...] zur Generierung von Wissen.*“ (GRESCHNER U. ZAHN 1992, S. 14; zit. nach LEHNER ET AL. 1995, S. 232). Zum besseren Begriffsverständnis kann dazu die *Data-Information-Knowledge-Wisdom-Hierarchie* nach ACKOFF zu Rate gezogen werden (s. ACKOFF 1989, S. 3–9). Die Hierarchie strukturiert den Zusammenhang zwischen Zeichen, Daten, Informationen und Wissen (s. Abbildung 2-5).

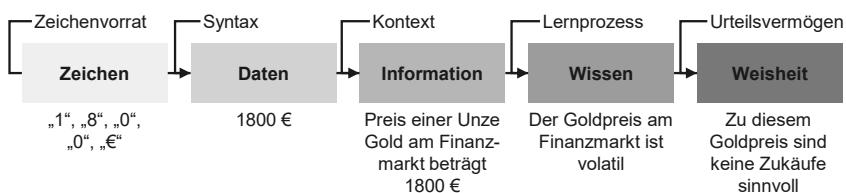


Abbildung 2-5: Die *Data-Information-Knowledge-Wisdom-Hierarchie* (eigene Darstellung i. A. a. ACKOFF 1989, S. 3ff.; KRCMAR 2015, S. 12)

Auf der ersten Ebene der Hierarchie befinden sich die *Zeichen* als Basis bzw. Standard der weiterführenden Ebenen (s. KRCMAR 2015, S. 11). Exemplarisch sind hier die Zeichen „1“, „8“, „0“, „0“, „€“ aufgelistet, die zusammenhanglos noch keinen Mehrwert bieten, aber in sich verständlich sind. Wird die Zeichenfolge in eine regelbasierte Relation überführt, spricht man von *Daten* (s. KRCMAR 2015, S. 11). Nach LEHNER ET AL. werden *Daten* definiert als „*Abbildungen der Realität [...] (die aus) Zeichen oder kontinuierliche(n) Funktionen (bestehen und) aufgrund von bekannten oder unterstellten Abmachungen und vorrangig zum Zweck der Verarbeitung Information darstellen.*“ (LEHNER ET AL. 1995, S. 200). Im präsentierten Beispiel erlangt man durch das korrekte Zusammenführen der Zeichen den Datenpunkt von „1.800 €“, der als Preis oder Marktwert einer unbestimmten Sache einen bedingten Mehrwert bietet. Wird dazu der Kontext geliefert, dass es sich bei „1.800 €“ um den aktuellen Goldpreis einer Unze am Finanzmarkt handelt, kann diese Information problemgerecht eingesetzt werden.

Daran wird verdeutlicht, dass zwischen Daten und Informationen wesentliche Unterschiede bestehen. Erst in einem konkreten Kontext können aus Daten Informationen gewonnen werden. Der Informationsbegriff zielt auf eine subjektive Verwendung ab und vermittelt Wissen oder Kenntnisse über die Abläufe der Wirklichkeit (s. LEHNER ET AL. 1995, S. 201). Daten sind somit immer in Informationen enthalten und werden erst durch den Menschen aktiviert (s. LEHNER ET AL. 1995, S. 202).

Auf den höchsten Ebenen der Hierarchie befinden sich die Begriffe des *Wissens* und der *Weisheit*. Wissen liefert die Mechanismen über die Funktionsweise eines Systems (s. ACKOFF 1989, S. 4). Wissen kann nur im Rahmen eines Lernprozesses erworben werden und wird entweder mithilfe von Instruktionen weitergegeben oder anhand eigener Erfahrungen angeeignet (s. ACKOFF 1989, S. 4). Am Beispiel des Goldpreises wird verdeutlicht, dass mithilfe des Verständnisses über die Mechanismen des Finanzsystems der Goldpreis als variable Größe verstanden werden kann. Wird das Wissen um die mentale Funktion des Urteilsvermögens ergänzt, spricht ACKOFF von Weisheit (s. ACKOFF 1989, S. 9). Weisheit gilt nach ACKOFF als permanente Größe, deren Mehrwert nur durch die menschliche Einschätzung gewonnen werden kann (s. ACKOFF 1989, S. 9). Im Beispiel zeigt sich durch die Einschätzung des Goldpreises im Marktumfeld, dass das Preisniveau keine Zukäufe rechtfertigt.

2.3.2 Informationssysteme im Produktlebenszyklus

Informationssysteme zentralisieren und verwalten entsprechende Daten in Unternehmen, um bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen. THOMAS U. SCHEER definieren Informationssysteme als „*[...] Systeme, deren primärer Zweck die Informationsbereitstellung ist. Sie versorgen alle Unternehmensfunktionen mit den für die Ausführung und die Koordination entsprechender Aufgaben notwendigen Informationen. Systemtheoretisch kann die hierfür erforderliche Kommunikation in Informationssystemen als der notwendige Austausch von Informationen zwischen den Elementen oder Komponenten eines Systems bzw. zwischen dem System und seiner Umwelt aufgefasst werden.*“ (THOMAS U. SCHEER 2016, S. 2) Diese Definition unterteilt den Aufgabenbereich

in zwei Hauptkomponenten: Informationsbereitstellung und Kommunikation. Laut THOMAS U. SCHEER steht der Zweck der Informationsbereitstellung über dem der Kommunikation, lässt aber eine Interpretation des Begriffs der Informationssysteme zu (s. THOMAS U. SCHEER 2016, S. 2). Im Rahmen dieser Dissertationsschrift wird sich auf die Definition von THOMAS U. SCHEER gestützt, diese wird jedoch in einen unternehmensübergreifenden Fokus eingebettet. Für eine Untersuchung im Kontext der Kreislaufwirtschaft werden Systeme und Modelle betrachtet, deren Anwendbarkeit auch in interorganisationalen Netzwerken gegeben ist. Vor diesem Hintergrund wird zunächst das *Product Lifecycle Management* vorgestellt.

Das *Product Lifecycle Management* (PLM) wird als ganzheitlicher Ansatz verstanden, der alle Geschäftsaktivitäten (z. B. Methoden, Prozesse und IT-Tools) von der Produktidee bis zum Recycling in einer Unternehmensstrategie zusammenfasst (s. STARK 2020, S. 1; s. FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 298; s. ABRAMOVICI 2007, S. 665). Das PLM dient dabei dem Ziel, die produktbezogene Performance eines Unternehmens zu erhöhen und die Fähigkeit zu optimieren, ein Produkt über seinen Lebenszyklus zu verwalten (s. STARK 2020, S. 2). In der modernen Produktionsumgebung umfasst die Kernaufgabe des PLMs die Verwaltung aller Produktinformationen, die im Laufe eines Produktlebenszyklus erzeugt werden, und deren Bereitstellen an die relevanten Akteure im Produktlebenszyklus (s. BOOS U. ZANCUL 2012, S. 336; s. ARNOLD ET AL. 2011, S. 10). EIGNER definiert PLM dazu als „*das unternehmensweite Informationsmanagement von produkt- und prozessbezogenen Daten*.“ (EIGNER 2021, S. 11) Darüber hinaus übernimmt das PLM die Aufgabe des Kooperationsmanagements mit internen und externen Interessengruppen, um relevante Produktinformationen zu teilen, ohne Unternehmenswissen preiszugeben (s. FELDHUSEN ET AL. 2013, S. 299). Dieses umfassende Aufgabengebiet eines modernen PLMs ist eine komplexe Umgebung, die nicht vollständig innerhalb einer Softwarelösung abgebildet werden kann, weshalb das PLM auf die unternehmensinterne Systemlandschaft zurückgreift (s. BOOS U. ZANCUL 2012, S. 344f.). Das Aufgabengebiet des PLMs wird daher in sogenannte PLM-Systeme übertragen und softwareseitig umgesetzt (s. BOOS U. ZANCUL 2012, S. 346). Zur Übersicht ist in Abbildung 2-6 die IT-Systemlandschaft nach SCHUH in produzierenden Unternehmen visualisiert.

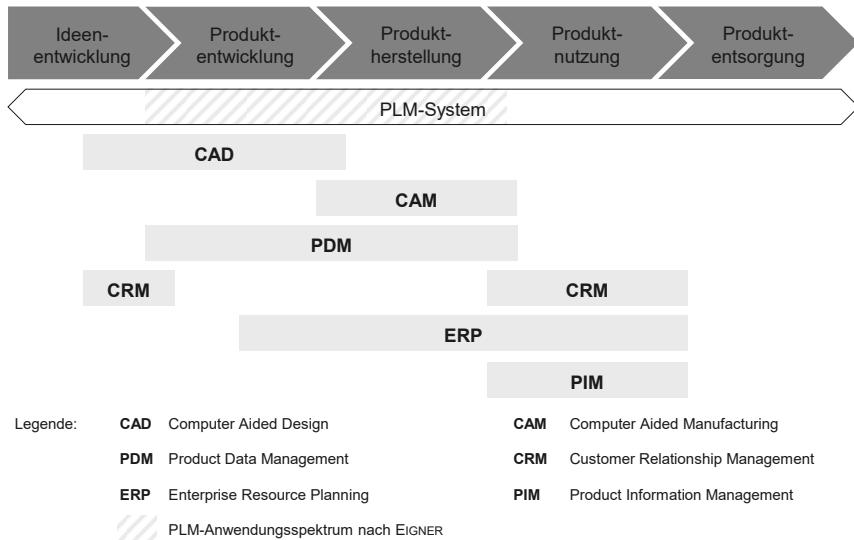


Abbildung 2-6: Informationssystemlandschaft (eigene Darstellung i. A. a. VDI-RICHTLIE 2219, S. 10; BOOS u. ZANCUL 2012, S. 345; STARK 2020, S. 10; EIGNER 2021, S. 12; ABRAHAM 2014, S. 12)

Eingeordnet in die Produktlebenszyklusphasen, bietet die Systemlandschaft in Abbildung 2-5 einen Überblick über, für diese Dissertationsschrift relevante, betriebliche Informationssysteme. Als übergreifendes System ist die Aufgabe eines PLM-Systems, alle Informationssysteme zu verknüpfen (s. EIGNER 2021, S. 12; s. Boos u. ZANCUL 2012, S. 346). Dies findet in der Realität allerdings kaum Anwendung (s. EIGNER 2021, S. 12). Laut EIGNER besteht zwischen der Vision von PLM-Systemen und deren realer Applikation in der betrieblichen Praxis eine erhebliche Divergenz (s. EIGNER 2021, S. 12). Trotz umfangreicher Erweiterungen beschränkt sich das Anwendungsfeld primär auf Produktentwicklung und -herstellung, woraus sich eine theoretisch-wissenschaftliche Motivation zur Untersuchung des digitalen Produktpasses ergibt (s. EIGNER 2021, S. 11; s. ABRAHAM 2014, S. 12). Zur Vollständigkeit werden im Folgenden relevante Informationssysteme vorgestellt.

Unter *Computer-Aided-Design-Systemen* (CAD-Systemen) wird rechnerunterstützte Software zum Entwerfen, Zeichnen und Konstruieren verstanden (s. KAMPKER ET AL. 2011, S. 191). Durch den Einsatz von CAD-Systemen wird der Konstrukteur bei der Varianten- und Änderungskonstruktion sowie beim Entwurf erster Ideen unterstützt (s. KAMPKER ET AL. 2011, S. 191). Die daraus resultierende Konstruktion bietet die Grundlage zur Erstellung von Geometriedaten, Technologiedaten und Stücklisten, deren Inhalt an das *Enterprise Resource Planning* (ERP) und Produktionsplanungssystem übergeben wird (s. KAMPKER ET AL. 2011, S. 191).

Das *Computer Aided Manufacturing* (CAM) nutzt dagegen Daten aus der Arbeitsplanung, um erforderliche Maschinenprogramme (NC-Programme) zu erstellen und diese über eine Einbindung der Werkzeugmaschinen an die geplanten Ressourcen digital zu verteilen (s. KAMPKER ET AL. 2011, S. 192). Außerdem wird im CAM-System die innerbetriebliche Logistik gesteuert, welche Materialflusssysteme, flexible Fertigungszellen und -systeme sowie Instandhaltungssysteme umfasst (s. KAMPKER ET AL. 2011, S. 192).

Das *Product Data Management* (PDM) agiert als Teildisziplin des PLMs und fokussiert die Datenlogistik in der Produktentwicklung und -herstellung (s. VDI-RICHTLINIE 2219, S. 9). Es stellt eine Integrationsplattform von Entwicklungsinformationen dar und verwaltet bspw. CAD-Modelle, technische Dokumentationen oder Freigabeprozesse (s. VDI-RICHTLINIE 2219, S. 9; s. ABRAMOVICI 2007, S. 667). Über die Jahre haben sich zudem viele alternative Bezeichnungen und Abkürzungen für das PDM entwickelt, die dieselben Funktionen abbilden: EDM, CPDM, CPC, VPDM, PDM II, PLCM und E-PDM (s. ABRAHAM 2014, S. 12).

Das *Customer Relationship Management* (CRM) dient der Etablierung von langfristigen Kundenbeziehungen, weshalb ihm zu Anfang und Ende des Produktlebenszyklus ein hoher Stellenwert zugerechnet wird (s. KAMPKER ET AL. 2011, S. 194). Unter CRM versteht man ein System zur Verwaltung von Kommunikations-, Distributions- und Angebotsdaten (s. KAMPKER ET AL. 2011, S. 194). Das System soll an den Kundenbedürfnissen ausgerichtet werden und wird durch Informations- und Kommunikationstechnologien unterstützt. Dabei kann der genaue Status von Verhandlungen dokumentiert und verfolgt sowie potenzielle Vertriebschancen anhand von Vergangenheitsdaten analysiert und bewertet werden (s. KAMPKER ET AL. 2011, S. 194f.).

Das *Enterprise Resource Planning* (ERP) dient der Verwaltung logistischer und finanzieller Abläufe im Unternehmen innerhalb einer holistischen, prozessorientierten IT-Lösung (s. ABRAHAM 2014, S. 7; s. KAMPKER ET AL. 2011, S. 184). Dazu fungiert sie als Datenbank aller Produkte, Komponenten und Materialien, die ein Unternehmen zur Produktherstellung benötigt; ohne ERP-System ist das Bestellen, Lagern und Verkaufen nur schwerlich möglich (s. ABRAHAM 2014, S. 7). Nach KAMPKER ET AL. werden die Ziele von ERP-Systemen mit der „*Erfassung und Abbildung von Informationsflüssen (z. B. Kapital, Produktion, Input/Output) im Unternehmen als Ganzes, das Aufdecken von Engpässen, sowie die verbesserte Auslastung sämtlicher Ressourcen (Mensch, Maschine, Material, Kapital)*“ zusammengefasst (s. KAMPKER ET AL. 2011, S. 184).

Das *Produktinformationsmanagement* (PIM) dient der zentralen Verwaltung von Informationen über Produkte in einem Unternehmen (s. ABRAHAM 2014, S. 3). Der Schwerpunkt liegt auf der Verwaltung der Daten, die für die Vermarktung und den Verkauf der Produkte über einen oder mehrere Vertriebskanäle erforderlich sind (s. ABRAHAM 2014, S. 3). Dazu ist es das Ziel eines PIMs, ähnlich des PLMs, als *Single Source of Truth* für Produktinformationen zu fungieren (s. ABRAHAM 2014, S. 3). In Ergänzung zu PLM-Systemen umfasst der Adressatenkreis von PIM-Systemen auch Marketing und Vertrieb, Kundenbetreuung und die Kunden selbst (s. ABRAHAM 2014, S. 7). Der

Informationsfluss ist dabei bidirektional und kann sowohl vom Unternehmen als auch von den Kunden genutzt werden (s. ABRAHAM 2014, S. 7).

Von der Ideenentwicklung bis zur Produktnutzung zeigt sich eine Vielzahl an Informationssystemen, die im unternehmerischen Kontext unterstützen. Allerdings stellen eine Integration der Nutzungsdaten und die Phase der Produktentsorgung Schwächen dar, die zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Dissertationsschrift nicht ausreichend in PLM-Systemen berücksichtigt werden (s. EIGNER 2021, S. 12; s. ABRAMOVICI 2007, S. 667). Daher greift der Autor dieser Dissertationsschrift auf vorhandene Methoden, Daten und Prozesse aus PLM-Systemen zurück, entwickelt jedoch mithilfe von Informationsmodellen umsetzbare Konzepte, die eine PLM-Erweiterung um die Lebenszyklusphasen Produktnutzung und -entsorgung unterstützen.

2.3.3 Begriffsdefinitionen der Modellierung von Informationen

In der Wissenschaft und Praxis werden die Begriffe des Informations- und Datenmodells kontrovers diskutiert (s. PRAS U. SCHOENWAELDER 2003, S. 2). Zum Verständnis beim Lesen dieser Dissertationsschrift wird daher im Folgenden eine Abgrenzung der Begriffe vorgenommen; diese werden zudem mit den Begriffen des digitalen Schattens, des digitalen Zwillings und des digitalen Produktpasses in Kontext gesetzt (s. Abbildung 2-7).

Zunächst wird eine allgemeine Definition des Modellbegriffs vorgenommen. Nach der VDI-Richtlinie 2219 ist ein Modell definiert als „*vereinfachte Darstellung eines Teils der vergangenen, gegenwärtigen oder zukünftigen Wirklichkeit, wobei sich die Darstellung entweder auf einen tatsächlichen Zustand oder auf einen Idealzustand beziehen kann.*“ (VDI-RICHTLINIE 2219, S. 5) Informationsmodelle weisen hingegen eine enge Verknüpfung mit Informationssystemen auf. So definieren THOMAS U. SCHEER Informationsmodelle als „*durch einen Konstruktionsprozess gestaltete, zweckrelevante Repräsentationen eines Informationssystems.*“ (THOMAS U. SCHEER 2016, S. 6) Informationsmodelle werden allgemein auch als konzeptionelle und abstrakte Modelle verstanden (s. PRAS U. SCHOENWAELDER 2003, S. 3). Die Notwendigkeit der Modellierung von Informationssystemen liegt in deren Komplexität begründet, da Informationssysteme sowohl eine betriebswirtschaftliche als auch eine technische Ebene berücksichtigen müssen (s. THOMAS U. SCHEER 2016, S. 6; s. ROSEMAN 1998, S. 3).

Allgemein lässt sich das spezifische Informationsmodell vom Referenzmodell abgrenzen, das als Bezugspunkt für eine Teilmenge von Anwendungsfällen dient (s. THOMAS U. SCHEER 2016, S. 7f.). Zusammengefasst beschreiben THOMAS U. SCHEER das Ziel von Informationsmodellen als „*Mittler zwischen Mitarbeitern einer Organisation, die über fachliches Wissen verfügen, und denjenigen, die über methodisches oder technisches Wissen verfügen*“, zu fungieren (s. THOMAS U. SCHEER 2016, S. 8). Dementsprechend adressieren Informationsmodelle vorwiegend Entwickler und Berater (zur Beschreibung der Umgebung), Nutzer (zum Verständnis modellierter Objekte), und Softwareingenieure (zur Nutzung als Leitfaden für die Funktionalität) (s. PRAS U. SCHOENWAELDER 2003, S. 3; s. THOMAS U. SCHEER 2016, S. 8). Für diese Dissertationsschrift

werden Informationsmodelle daher definiert als konzeptionell-semantische und zweck-relevante Repräsentationen von Informationsstrukturen, die zum Ziel haben, den Wissenstransfer zwischen fachlichen und technischen Mitarbeitenden zu unterstützen (s. PRAS U. SCHOENWAELDER 2003, S. 3; s. THOMAS U. SCHEER 2016, S. 8; s. SCHENCK U. WILSON 1994, S. 10).

Datenmodelle adressieren dagegen Softwareingenieure, die die Modelle umsetzen müssen (s. PRAS U. SCHOENWAELDER 2003, S. 3). Ein Datenmodell ist nach der VDI-RICHTLINIE 2219 definiert als ein „*auf der konzeptionellen und auf der externen Ebene zur formalen Beschreibung aller in einer Datenbank enthaltenen Daten und ihrer Beziehungen untereinander verwendetes Modell.*“ (VDI-RICHTLINIE 2219, S. 3) Damit enthalten Datenmodelle protokollspezifische Ergänzungen und Detailinformationen, die in der praktischen Implementierung zur Anwendung kommen (s. PRAS U. SCHOENWAELDER 2003, S. 3). In der Praxis lassen sich Daten- und Informationsmodelle jedoch nicht immer eindeutig differenzieren, sodass der Begriff kontrovers diskutiert wird (s. PRAS U. SCHOENWAELDER 2003, S. 3). Allerdings lässt sich über die angewendete Modellierungssprache in der Regel eine Unterscheidung treffen. Informationsmodelle können in semi-formaler Schrift beschrieben werden, wohingegen für Datenmodelle formale Standards vorherrschend sind (s. PRAS U. SCHOENWAELDER 2003, S. 4f.).

Im Kontrast zu Informations- und Datenmodellen ist der digitale Schatten kein konkreter Modellierungstyp, sondern beschreibt einen Ansatz zur digitalen Repräsentanz von Produktionsprozessen. Aus dem Konzept der Industrie 4.0 hervorgehend wird der digitale Schatten definiert als „*Abbild der Prozesse in der Produktion, der Entwicklung und angrenzenden Bereichen mit dem Zweck, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten zu schaffen.*“ (BAUERNHANSL ET AL. 2016, S. 23) Dazu besteht der digitale Schatten aus einer Vielzahl von Informations- und Datenmodellen, die die notwendigen Datenformate, Datenpunkte und Granularitätsstufen liefern (s. BAUERNHANSL ET AL. 2016, S. 23; s. RIESENER ET AL. 2019, S. 731). Als digitale Repräsentation der Produktion und des Wertschöpfungsprozesses eignet sich der digitale Schatten nicht für die Beschreibung von Produktinformationen im Produktlebenszyklus.

Der digitale Zwilling bietet als virtuelles Spiegelbild die erforderlichen Voraussetzungen für den Einsatz im Produktlebenszyklus (s. BERG ET AL. 2020, S. 18). Das Konzept des digitalen Zwillinges wurde 2003 von MICHAEL GRIEVES als Modell mit drei Hauptkomponenten entwickelt: „*dem physischen Produkt in der realen Welt, dem virtuellen Produkt in der digitalen Welt und der Verbindung zwischen den realen und virtuellen Objekten.*“ (GRIEVES 2014, S. 1) „*Das Hauptziel des Konzepts (...) ist die Datenverarbeitung und der Datenaustausch in Echtzeit zwischen dem virtuellen Produktmodell und seinem physischen Zwilling.*“ (ADAMENKO ET AL. 2020, S. 218) Daher gilt, dass die Abbildung des digitalen Zwillinges mit der Datenmenge an Präzision gewinnt (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 23). In Kombination mit existierenden PLM-Systemen wird der digitale Zwilling daher als Konzept diskutiert, das entlang des Produktlebenszyklus Daten für relevante Stakeholder zur Verfügung stellt (s. RIESENER ET AL. 2019, S. 731). Allerdings ist das Konzept zu umfangreich, um in einer Dissertationsschrift ausreichend betrachtet werden zu können. Ein digitaler Zwilling kann durch Informations- und Datenmodelle

beschrieben werden, sodass sich diese Granularität für ein Dissertationsvorhaben eignet (s. ADAMENKO ET AL. 2020, S. 214f.).

Als Bestandteil des digitalen Zwillings wird auf europäischer Ebene für die Kreislaufwirtschaft der *digitale Produktpass* diskutiert (s. GOTZ ET AL. 2021, S. 9). Der digitale Produktpass wird dazu laut BMU definiert als „*Datensatz, der die Komponenten, Materialien und chemische Substanzen oder auch Informationen zu Reparierbarkeit, Ersatzteilen oder fachgerechter Entsorgung für ein Produkt zusammenfasst*“ (GOTZ ET AL. 2021, S. 7). Bei dieser offenen Definition zeigen sich die unausgereifte Entwicklungsstufe des Ansatzes und die fehlende Konkretisierung. Eine Übersicht relevanter Ansätze und Anwendungsbeispiele lässt sich in Unterabschnitt 3.2.3 finden. Das Konzept des digitalen Produktpasses unterstreicht die Motivation dieser Dissertationsschrift, liefert als Konzept jedoch ebenfalls keine geeignete Modellierungsmöglichkeit für die Fragestellung dieses Dissertationsvorhabens. In der folgenden Grafik 2-7 werden die zuvor beschriebenen Modellierungstypen und Ansätze zusammenfassend beschrieben.

Konzept Charakteristika	Informations- modell	Datenmodell	Digitaler Schatten	Digitaler Zwilling	Digitaler Produktpass
Definition	konzeptionell- semantische und zweckrelevante Repräsentationen von Informations- strukturen zum Wissenstransfer zwischen fachlichen und technischen Mitarbeitenden	formale Beschreibung aller in einer Datenbank enthaltenen Daten und ihrer Beziehungen untereinander	Abbildung der Prozesse in Produktion, Entwicklung und angrenzenden Bereichen	Spiegelbild zwischen physischem Produkt, virtuellem Produkt und der Verbindung zwischen ebendiesen	Datensatz, der Komponenten, Materialien, und weitere Informationen zur Umsetzung von Kreislaufstrategien zusammenfasst
Ziel	Informationsver- mittlung zwischen fachlichen und methodisch- technischen Rollen im Unternehmen	Transfer von Fachwissen zur Implementierung in Software	Datenauswertung existierender Produktions- prozesse	Virtuelle Abbildung eines realen Produkts in Echtzeit	Digitale Informations- verfügbarkeit zur verstärkten Umsetzung von Kreislaufstrategien
Adressat	Entwickler und Berater	Softwareingenieure	Produktions- ingenieure	Produktnutzer	Akteure im Lebenszyklus
Daten- grundlage	Informations- systeme	Datenbanken	Informations- und Datenmodelle	Informations- und Datenmodelle	Informations- und Datenmodelle
Modellierungs- sprache	semantisch	formal	kein Modelltyp	kein Modelltyp	kein Modelltyp

Abbildung 2-7: Einordnung des Informationsmodells (eigene Darstellung)

Unter Berücksichtigung der betrachteten Modellierungsoptionen liefert das Informationsmodell zur Lösung der wissenschaftlichen Problemstellung dieses Dissertationsvorhabens die höchste Eignung. Daher ist der Aufbau dieser Dissertationsschrift auf die Entwicklung eines Informationsmodells ausgerichtet, um Organisationen zu unterstützen, relevante Informationen zu identifizieren und den Aufbau von (Informations-)Ökosystemen zu vollziehen.

Zusammenfassende Definition des Informationsmodells

Informationsmodelle werden definiert als konzeptionell-semantische und zweckrelevante Repräsentationen von Informationsstrukturen mit dem Ziel, eine gemeinsame Wissensbasis für Mitarbeitende mit fachlichem und Mitarbeitende mit technischem Hintergrund zu bilden (s. PRAS U. SCHOENWAELDER 2003, S. 3; s. THOMAS U. SCHEER 2016, S. 8; s. SCHENCK U. WILSON 1994, S. 10).

2.4 Zusammenfassung und Eingrenzung des Untersuchungsbereichs

Basierend auf den Ausführungen der vorherigen Unterkapitel werden die terminologischen Grundlagen zusammengefasst und der Untersuchungsbereich der vorliegenden Arbeit eingegrenzt. Aus dem Aufbau des zweiten Kapitels lassen sich bereits die relevanten Terminologien dieser Dissertationsschrift ableiten. Zunächst wird mithilfe des Produktlebenszyklus von Investitionsgütern eine Grundlage des Betrachtungsbereichs geliefert, indem sich auf die intrinsische Sichtweise des Lebenszyklus bezogen wird. Darin werden die Produktphasen von der Entwicklung und Herstellung bis zur Wiederverwendung und Entsorgung beschrieben. Das Konzept der Kreislaufwirtschaft liefert in ebenjenen Lebenszyklusphasen Ansätze, um Ressourceneffizienz zu integrieren und geschlossene Kreisläufe zu erzeugen. Zur Beschreibung der technischen Möglichkeiten bilden Kreislaufstrategien die konkrete Möglichkeit für Unternehmen, entlang der Phasen im Produktlebenszyklus den Nutzwert von Produkten zu erhalten. Darauf aufbauend bieten Geschäftsökosysteme eine Beschreibungsmöglichkeit zur Zusammenarbeit der erforderlichen Akteure über den Lebenszyklus hinweg. Zum Erreichen einer übergreifenden Informationstransparenz bildet die Informationsmodellierung die methodische Grundlage dieses Dissertationsvorhabens.

Zum Verständnis der Anwendbarkeit und des Gültigkeitsbereichs dieser Dissertationsschrift wird im Folgenden der Untersuchungsbereich im Sinne der Systemtheorie nach HABERFELLNER ET AL. abgegrenzt (s. HABERFELLNER ET AL. 2018, S. 134f.). Die untersuchten Wirtschaftszweige beziehen sich im Fokus auf den Maschinen- und Anlagenbau sowie angrenzende Industrien, da diese Industrien einen Ausgangspunkt der kreislaufwirtschaftlichen Tätigkeiten darstellen. Dazu werden bevorzugt B2B-Geschäftsbeziehungen betrachtet, um Informationstransparenz zwischen Organisationen, und nicht Endverbrauchern, herzustellen. Der Themenbereich wird kleinen, mittleren und großen Unternehmen zugeordnet. Der produktorientierte Anwendungsbereich bleibt auf Investitionsgüter und deren Komponenten beschränkt, um ein für dieses Dissertationsvorhaben realisierbares Komplexitätsniveau zu erhalten. Die betrachteten Komponenten werden über ihren Produktlebenszyklus ab dem Zeitpunkt der Herstellung untersucht. Die Modellierungsart ist ein Informationsmodell, das durch ein Beschreibungs- und Erklärungsmodells definiert wird. Die Modellherleitung und -validierung finden im Rahmen einer sachlogischen und empirisch-qualitativen Untersuchung mit hohem Praxisbezug statt, um den Fokus der angewandten und anwendbaren

Forschung zu wahren. Die Eingrenzung des Untersuchungsbereichs ist in der folgenden Abbildung 2-8 zusammengefasst.

	Kriterien	Ausprägungen			
	Wirtschaftszweig	Maschinenbau	Fahrzeugbau	Apparatebau	Sonstiges
Anwendungsbereich	Geschäftsbeziehungen	B2C		B2B	
	Unternehmensgröße	Mikrounternehmen	kmU		Großunternehmen
	Produktkomplexität	Anlage	Apparat	Ma- schine	Gerät
	Lebenszyklusphasen	Ideen- entwicklung	Entwicklung	Herstellung	Nutzung
	Kreislaufwirtschafts- zweck	Wertaufbau		Werterhalt	Wertbewahrung
Modellentwicklung	Modellierungsart	Datenmodell		Informationsmodell	
	Modellierungszweck	beschreibend	erklärend	gestaltend	Metamodell
	Herleitung/ Validierung	sachlogisch	empirisch-qualitativ (Fallstudien)	empirisch-quantitativ (Statistik)	

Abbildung 2-8: Eingrenzung des Untersuchungsbereichs (eigene Darstellung)

3 Stand der Erkenntnisse

Dieses Kapitel dient dem Ziel, eine Übersicht über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Praxis für den Untersuchungsbereich dieser Dissertationsschrift zu liefern. Die Beiträge werden in Abhängigkeit der inhaltlichen Schwerpunkte von Informationsmodellen für Kreislaufstrategien in der produzierenden Industrie strukturiert und beschrieben. Dazu wird die Methodik der systematischen Literaturrecherche angewandt, um aus einer möglichst vollständigen Menge wissenschaftlicher Publikationen Erkenntnisse ableiten zu können. Es wird betrachtet, in welchem Umfang vorhandene Erkenntnisse als Grundlage für die weitere Untersuchung dienen und welche inhaltlichen sowie methodischen Forschungslücken identifiziert werden können.

Zunächst wird dazu die Methodik der systematischen Literaturrecherche beschrieben (s. Unterkapitel 3.1). Darauffolgend werden in Unterkapitel 3.2 in den drei ausgewählten Themenbereichen wissenschaftliche Ansätze systematisch identifiziert und vorgestellt. Im ersten Themenbereich wird der aktuelle Forschungsstand zu Kreislaufstrategien präsentiert (s. Unterabschnitt 3.2.1). Auf dieser Basis wird die relevante Forschung im Gebiet der Geschäftsökosysteme zusammengefasst (s. Unterkapitel 3.2.2) und durch eine Analyse des Stands der Forschung zu Informationsmodellen im Kontext der Kreislaufwirtschaft abgeschlossen (s. Unterkapitel 3.2.3). Das Kapitel wird in Abschnitt 3.3 durch die Ableitung des Forschungsbedarfs komplettiert, welches die wissenschaftliche Basis der zu erarbeitenden Forschungsfelder darstellt.

3.1 Methodik einer systematischen Literaturrecherche

In der Wissenschaft ist die Analyse relevanter Literatur als eigene Forschungsdisziplin etabliert und gilt als essenzieller Schritt in der Durchführung von Forschungsvorhaben (vom BROCKE ET AL. 2009, S. 2207). Im Prozess der Literaturrecherche wird dabei vorhandenes Wissen offengelegt und aufbereitet, um daraus neue Erkenntnisse zu generieren (VOM BROCKE ET AL. 2009, S. 2207). WEBSTER U. WATSON beschreiben dazu den Prozess der strukturierten Literaturrecherche als Identifikation relevanter Artikel anhand konkreter Kennwörter in Datenbanken bekannter Journals sowie mithilfe einer Vorwärts- und Rückwärtsanalyse innerhalb identifizierter Beiträge (WEBSTER U. WATSON 2002, S. 16).

Für eine konsistente wissenschaftliche Vorgehensweise erfordert die systematische Literaturrecherche eine methodische Stringenz, um die Gesamtheit des literarischen Wissens adäquat wiederzugeben. Die Literaturrecherche steht vor der Herausforderung, den Untersuchungsbereich, den der Wissenschaftler abzudecken versucht, akkurat abzubilden (s. VOM BROCKE ET AL. 2009, S. 2208). Ein wesentliches Merkmal stellt dazu die Präsentation der relevanten Entscheidungskriterien der Literaturauswahl dar, die im Sinne der wissenschaftlichen Reproduzierbarkeit für den Leser beschrieben werden müssen (s. VOM BROCKE ET AL. 2009, S. 2208; s. TORRACO 2005, S. 360). Im Rahmen dieser Dissertationsschrift wird zur Adressierung der Anforderungen die

systematische Vorgehensweise von VOM BROCKE ET AL. angewendet, die aus den folgenden fünf Schritten besteht (s. VOM BROCKE ET AL. 2009, S. 2211–2214):

1. Eingrenzung des Untersuchungsbereichs
2. Grundlagen und relevante Begriffsdefinitionen
3. Literatursuche
4. Literaturanalyse und -synthese
5. Forschungsagenda

Zur Eingrenzung des Untersuchungsbereichs wird sich im Rahmen dieser Dissertationsschrift auf COOPER gestützt, dessen wissenschaftliche Ausarbeitung eine Taxonomie zur Beschreibung von Literaturrecherchen beinhaltet (s. COOPER 1988, S. 109). In Phase eins wird der Untersuchungsbereich daher an den sechs Merkmalen und Merkmalsausprägungen nach COOPER eingegrenzt, die in Abbildung 3-1 dargestellt sind (s. COOPER 1988, S. 109).

Fokus	Forschungs-ergebnisse	Forschungsmethoden		Theorien		Praxisbezogene Anwendungen
Ziel	Verallgemeinerung		Kritik		Identifikation zentraler Problemstellungen	
Perspektive	Neutraler Bezug			Positionsbezug		
Abdeckung	Gesamte Literatur	Selektive Auswahl		Repräsentative Literatur	Ausschlaggebende Literatur	
Organisation	Historisch		Konzeptionell		Methodologisch	
Zielgruppe	Themenspezifische Wissenschaft	Allgemeine Wissenschaft	Praxis		Allgemeine Öffentlichkeit	
Untersuchungsbereich						

Abbildung 3-1: Eingrenzung des Untersuchungsbereichs der Literaturrecherche nach Cooper (eigene Darstellung i. A. a. COOPER 1988, S. 109)

Das erste Merkmal *Fokus* beschreibt die Literatur mit zentralem Interesse für den Autor der Recherche (s. COOPER 1988, S. 108). In dieser wissenschaftlichen Arbeit werden Forschungsergebnisse, Forschungsmethoden und praxisbezogene Anwendungen fokussiert, wobei streng wissenschaftlichen Theorien aufgrund des praxisbezogenen Bezugs der Arbeit nur eine untergeordnete Rolle zukommt. Das zweite Merkmal *Ziel* zeigt auf, welches Ergebnis der Autor mit seiner Untersuchung zu erfüllen hofft (s. COOPER 1988, S. 108). Der Verfasser dieser Dissertationsschrift strebt eine Verallgemeinerung der Literatur an, um eine Vergleichbarkeit sicherzustellen und diese einordnen zu können. Das dritte Merkmal *Perspektive* unterscheidet zwischen einem neutralen Bezug und einem subjektiven Positionsbezug des Autors im Rahmen der Literaturrecherche (s. COOPER 1988, S. 110). In dieser Arbeit wird ein neutraler Standpunkt eingenommen, um eine objektive Einschätzung der Erkenntnislage zu gewährleisten. Das vierte Merkmal *Abdeckung* beschreibt die Literaturauswahl durch den Autor und stellt einen markanten Aspekt dar (s. COOPER 1988, S. 110f.). Dazu wird innerhalb dieser Arbeit eine selektive und repräsentative Literaturauswahl getroffen, die nicht den kompletten Untersuchungsbereich abdeckt, sondern vielmehr ausschlaggebend

vor dem Hintergrund der praxisorientierten Ausrichtung dieser Arbeit einzuordnen ist. Das fünfte Merkmal *Organisation* unterscheidet die organisatorische Struktur der Literaturrecherche nach historischen, konzeptionellen oder methodologischen Schwerpunkten (s. COOPER 1988, S. 111f.). In dieser Dissertationsschrift wird dazu ein konzeptioneller und methodologischer Ansatz verfolgt. Das sechste Merkmal *Zielgruppe* beschreibt die Adressaten der Literaturrecherche und deckt sich mit der Zielgruppe der themenspezifischen Wissenschaft und Praxis, die in dieser Dissertationsschrift angesprochen wird (s. COOPER 1988, S. 112).

Phase zwei umfasst eine Beschreibung der notwendigen Grundlagen und eine umfassende Begriffsdefinition, um in den Themenbereich einzuführen und notwendiges Wissen aufzubauen (s. TORRACO 2005, S. 359; s. VOM BROCKE 2003, S. 2213). Dazu eignen sich primär Textbücher, Enzyklopädien und Handbücher, die eine Zusammenfassung der relevanten Problemstellungen liefern (s. VOM BROCKE 2003, S. 2213). In dieser Dissertationsschrift wird Phase zwei im zweiten Kapitel *Grundlagen und Eingrenzung des Untersuchungsbereichs* betrachtet, wodurch das erforderliche Grundwissen zusammengefasst wird, das zum Verständnis der vollständigen Arbeit notwendig ist.

Der Prozess der Literatursuche wird in Phase drei durchgeführt und beinhaltet das Durchsuchen relevanter Datenbanken mithilfe ausgewählter Schlüsselwörter sowie einer anschließenden Vorwärts- und Rückwärtssuche (s. VOM BROCKE 2003, S. 2213). Eine in der Wissenschaft anerkannte Vorgehensweise ist die PRISMA-Methode (*Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses*) (s. MOHER ET AL. 2009; s. PAGE ET AL. 2021). Das im Jahr 2009 entwickelte Konzept beschreibt ein Vorgehen zum systematischen Analysieren und Bewerten von wissenschaftlichen Schriften mit Fokus auf medizinischer Literatur (s. MOHER ET AL. 2009, S. 2). Hervorgegangen aus dem QUOROM-Statement von 1996, enthält das PRISMA-Konzept insgesamt 27 Checklistenelemente und ein 4-Phasen-Diagramm (s. Abbildung 3-2), das zur Nutzung wissenschaftlicher Reviews vorgesehen wurde (s. MOHER ET AL. 2009, S. 2).

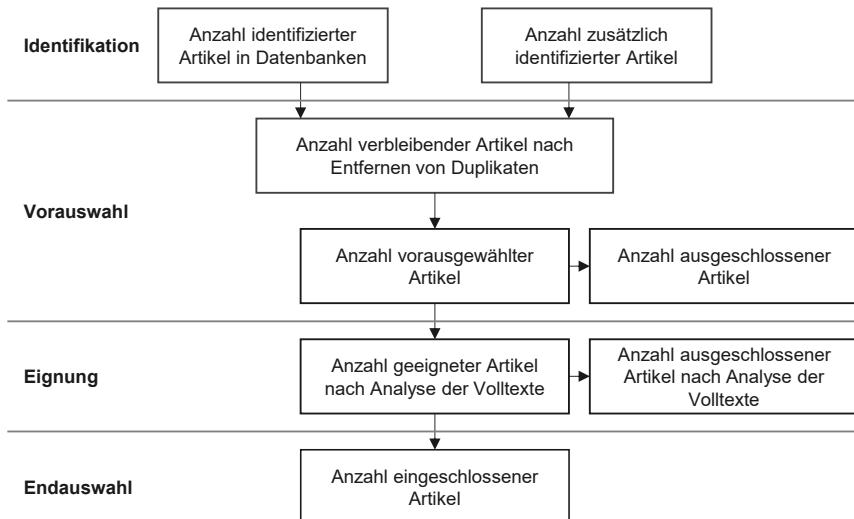


Abbildung 3-2: PRISMA-Konzept nach MOHER ET AL. (MOHER ET AL. 2009, S. 8).

Aus Abbildung 3-2 ersichtlich, bestehen die vier Phasen der PRISMA-Methode aus *Identifikation*, *Vorauswahl*, *Eignung* und *Endauswahl* (s. MOHER ET AL. 2009, S. 8). Mithilfe einer strukturierten Literatursuche, bestehend aus der Auswahl von Stichwörtern zur Suche in ausgewählten Datenbanken und unter Zuhilfenahme der Vorwärts- und Rückwärtssuche, werden zunächst relevante Artikel identifiziert (s. VOM BROCKE ET AL. 2009, S. 2213). Nach dem Entfernen von Duplikaten wird eine Vorauswahl getroffen, die zumeist anhand einer Bewertung des Titels und des Abstracts hinsichtlich thematischer Überschneidung durchgeführt wird (s. MOHER ET AL. 2009, S. 8). Anschließend wird die Eignung der Artikel durch eine Analyse der Volltexte verifiziert und in die Endauswahl der Literaturanalyse aufgenommen (s. MOHER ET AL. 2009, S. 8).

Die literarische Endauswahl bildet die Grundlage für Phase vier. Darin wird das Ziel verfolgt, die ausgewählte Literatur zu analysieren und zu synthetisieren (s. VOM BROCKE ET AL. 2009, S. 2214). Eine detaillierte Synthese der Erkenntnisse findet sich in dieser Dissertationsschrift in Kapitel fünf, das die Herleitung der erforderlichen Modelle beinhaltet. Im Sinne der praxisnahen Forschung wird dabei eine objektive und praxisbezogene Anwendung fokussiert.

In Phase fünf werden die Erkenntnisse in eine Forschungsagenda überführt, deren Ziel die Weiterentwicklung des Forschungsfeldes darstellt und die Grundlage für zukünftige Fragestellungen liefert (s. VOM BROCKE ET AL. 2009, S. 2214). Damit wird der Forschungsgemeinschaft ein aktueller Stand der Forschung vorgestellt und vorhandene Forschungslücken sowie zukünftige Themenrichtungen werden aufgezeigt.

3.2 Analyse ausgewählter Ansätze aus der Literatur

Zur Entwicklung eines Informationsmodells für die Kreislaufwirtschaft im Maschinen- und Anlagenbau werden im Folgenden aktuelle Ansätze aus der Wissenschaft und Forschung identifiziert und vorgestellt. In Unterabschnitt 3.2.1 werden dazu Strategien der Kreislaufwirtschaft betrachtet, wohingegen in Unterabschnitt 3.2.2 wissenschaftliche Ansätze zur Beschreibung von Geschäftsökosystemen vorgestellt werden. In Unterabschnitt 3.2.3 werden anschließend Referenzarchitekturen und Anwendungsbeispiele von Informationsmodellen für die Kreislaufwirtschaft betrachtet.

3.2.1 Kreislaufstrategien im industriellen Kontext

Im folgenden Abschnitt wird eine systematische Literaturrecherche zur Darstellung der aktuellen Erkenntnisse vorhandener Strategien in der Kreislaufwirtschaft durchgeführt. Die Identifikation relevanter Literatur wurde durch eine Suche in Online-Datenbanken sichergestellt, die anhand ausgewählter Suchterme durchsucht wurden. Dazu wurden zwei Suchbegriffsdiagramme, jeweils in deutscher und englischer Ausprägung, aufgestellt. Dafür werden die Einträge in einer Zeile mit einer „Und-Verknüpfung“ und in einer Spalte mit einer „Oder-Verknüpfung“ verbunden (s. Tabelle 3-1). Aus Tabelle 3-1 resultiert somit der folgende deutsche Suchterm „Kreislaufstrategie OR ((Kreislaufwirtschaft OR (Kreislauf AND Industrie) OR Lebenszyklus) AND Strategie)“, welcher für die deutschsprachige Recherche im Rahmen dieser Arbeit genutzt wurde. Zur Inkludierung internationaler Forschungsergebnisse wurden die Schlagwörter zudem ins Englische übersetzt. Der resultierende Suchterm für die englische Recherche lautet somit: „((Circular AND Economy) OR (Resource AND Efficiency) OR (Lifecycle AND Management) OR (Sustainability)) AND (Strategy)“.

Tabelle 3-1: Suchbegriffsmatrix zu Strategien der Kreislaufwirtschaft (eigene Darstellung)

Begriff 1	Begriff 2	Begriff 3
Kreislaufstrategie		
Kreislaufwirtschaft		Strategie
Kreislauf	Industrie	
Lebenszyklus		
Term 1	Term 2	Term 3
Circular	Economy	Strategy
Resource	Efficiency	
Lifecycle	Management	
Sustainability		

Als Datenbanken wurden *Scopus*, *Google Scholar* und das Bibliotheksangebot der RWTH Aachen ausgewählt. Für englische Literatur gilt *Scopus* als Plattform mit umfangreichem Angebot an Abstracts und Zitationen, die zur Identifikation relevanter

Artikel genutzt werden kann¹. Im Gegensatz dazu greift *Google Scholar* nicht ausschließlich auf begutachtete Fachliteratur zurück, sondern nutzt darüber hinaus abweichende Quellen mit wissenschaftlichem Bezug. Als dritte Datenbank wird auf den digitalen Suchdienst der Universitätsbibliothek der RWTH Aachen *KatalogPlus* zurückgegriffen.

Um die Vielfalt der internationalen Forschung widerzuspiegeln, wird eine Aufteilung in 20 % deutsche und 80 % englische Literatur durchgeführt. Zudem wird für die Recherche ausschließlich auf bereits publizierte Literatur zurückgegriffen, die frei oder über die Hochschulzugehörigkeit zur RWTH Aachen zugänglich ist und aus den Jahren 2017 – 2021 stammt. Die Recherche wurde im Zeitraum vom 22.11.2021 – 03.12.2021 durchgeführt.

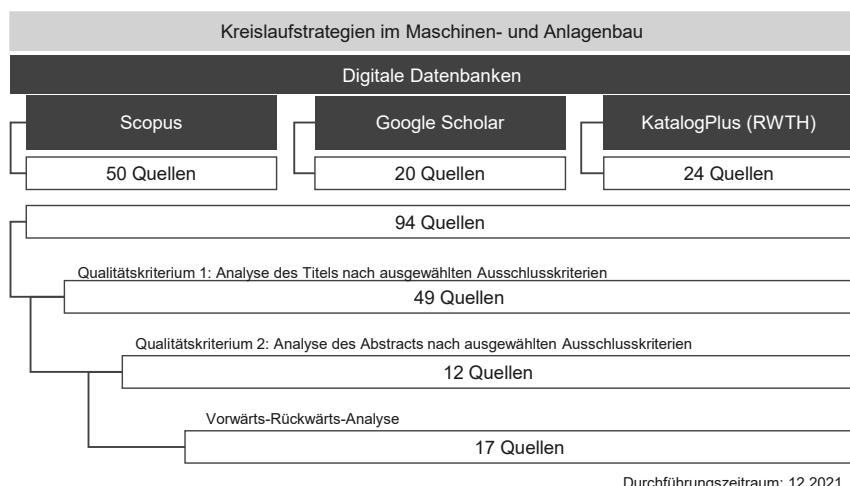


Abbildung 3-3: Zusammenfassung der Literatuauswahl zu Strategien der Kreislaufwirtschaft (eigene Darstellung)

Wie in Abbildung 3-3 dargestellt, wurden über die Datenbank von *Scopus* insgesamt 50 Artikel, über *Google Scholar* 20 Artikel und über die RWTH Aachen 24 Artikel identifiziert. Die Titel und Abstracts relevanter Veröffentlichungen wurden vor einer umfassenden Volltextanalyse jeweils hinsichtlich der Ausschlusskriterien des Branchenfokus, des Forschungsfokus, der Einbindung von produktbezogenen Kreislaufstrategien, der kulturellen Nachhaltigkeit und der Resilienz überprüft. Artikel, deren Inhalt einem oder mehreren Kriterien widerspricht, wurden ausgeschlossen. Nach Durchführung der Vorauswahl wurden die verbleibenden zwölf Artikel vollständig gelesen und über eine Vorwärts- und Rückwärtsanalyse um fünf weitere Titel ergänzt. In die weiteren

¹ Informationen wurden der Unternehmenswebseite entnommen: https://www.elsevier.com/solutions/scopus?dgcid=RN_AGCM_Sourced_300005030 (Link zuletzt geprüft: 03.05.2024)

Untersuchungen wurden final 17 Artikel eingeschlossen. Dazu werden im Folgenden die Ansätze und Konzepte der betrachteten Artikel vorgestellt.

Master Circular Business with the Value Hill | ACHTERBERG ET AL. 2016

Das Whitepaper von ACHTERBERG ET AL. ist eine praxisorientierte Zusammenstellung von zirkulären Geschäftsmodellen für Unternehmen auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft (s. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 2). Zur Visualisierung nutzen die Autoren dazu den *Value Hill* (s. Unterabschnitt 2.2.2), der den Produktlebenszyklus in die Phasen Wertaufbau, Werterhalt und Wertbewahrung einteilt (s. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 4). Innerhalb der drei Phasen beschreiben die Autoren kreislauffördernde Strategien und Geschäftsmodelle: In der Phase des Wertaufbaus wird das zirkuläre Design in den Vordergrund gestellt, sodass Produkte schon in der Entwicklung für eine lange Lebensdauer und einfache Reparierbarkeit entworfen werden (s. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 6). Im Werterhalt beschreiben die Autoren Geschäftsmodelle für eine optimierte Produktnutzung, wie sie in Produkt-Service-Systemen zu finden sind und so im Bündel einen höheren Wert liefern als im reinen Verkauf (s. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 7). Geschäftsmodelle mit Fokus auf der Wertrückgewinnung wie der Verkauf von Gebrauchtware bilden den Inhalt der letzten Phase der Wertbewahrung (s. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 8). Als gesonderte Kategorie betrachten ACHTERBERG ET AL. zudem Netzwerkorganisationen, die eine unterstützende Funktion in der Kreislaufwirtschaft innehaben und dabei die Supply-Chain organisieren oder relevante Informationen zur Verfügung stellen (s. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 9). Zusammengefasst postulieren die Autoren den *Value Hill* als Strategiewerkzeug zur Positionierung des Unternehmens entlang der Wertphase von Produkten (s. ACHTERBERG ET AL. 2016, S. 10).

Circular economy assessment tool for end of life product recovery strategies | ALAMEREW U. BRISSAUD 2019

ALAMEREW U. BRISSAUD betrachten die Unvollkommenheit bestehender Methoden zur kreislauffördernden Entscheidungsfindung von Produkten am End-of-Life (EoL) (s. ALAMEREW U. BRISSAUD 2019, S. 170). Laut ihrer Analyse behandeln aktuelle Methoden lediglich technische und ökonomische Faktoren ohne die Legislative und den Kundenbedarf einzubeziehen (s. ALAMEREW U. BRISSAUD 2019, S. 170). Als Alternative stellen die Autoren eine Methodik zur Einführung von Kreislaufwirtschaft in der Produktion auf Basis einer strategischen Entscheidungsfindung vor (s. ALAMEREW U. BRISSAUD 2019, S. 174).

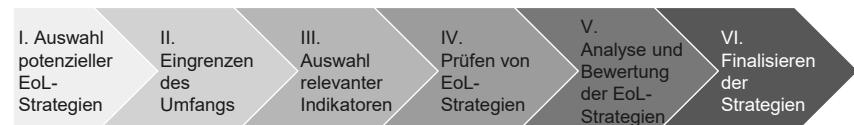


Abbildung 3-4: Multidimensionales Entscheidungsinstrument zur Analyse von EoL-Strategien (ALAMEREW U. BRISSAUD 2019, S. 175)

Im ersten Schritt wird dazu eine Longlist relevanter Strategien für das zu betrachtende Produkt zusammengestellt, die als Basis für die weiteren Schritte gilt (s. ALAMEREW U. BRISSAUD 2019, S. 175). Im zweiten Schritt werden die Strategien der Longlist auf Machbarkeit überprüft, indem technologische, wirtschaftliche, legislative und soziale Restriktionen hinzugezogen werden (s. ALAMEREW U. BRISSAUD 2019, S. 176). Aus einer vordefinierten Liste möglicher Indikatoren wird anschließend eine Auswahl getroffen, die bestmöglich den sozialen, ökonomischen und ökologischen Einfluss der Strategien messen kann (s. ALAMEREW U. BRISSAUD 2019, S. 177). Mithilfe standardisierter Rechenoperationen werden im vierten Schritt die EoL-Strategien geprüft und erste Ergebnisse errechnet (s. ALAMEREW U. BRISSAUD 2019, S. 179). In der Analyse werden die Ergebnisse kritisch hinterfragt und vorhandene Lösungskonflikte betrachtet, um im letzten Schritt die ausgewählte Strategie weiter zu detaillieren (s. ALAMEREW U. BRISSAUD 2019, S. 180).

Developing a circular strategies framework for manufacturing companies to support circular economy-oriented innovation | BLOMSMA ET AL. 2019

In der Veröffentlichung von BLOMSMA ET AL. wird eine Taxonomie von Kreislaufstrategien vorgestellt, um die Innovation von produzierenden Unternehmen in der Kreislaufwirtschaft zu fördern (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 2). Unter der Bezeichnung *Circular Strategies Scanner* definiert die Autorenschaft Kreislaufstrategien, ordnet diese in aktuelle Anwendungsszenarien ein und beschreibt Verbesserungsmöglichkeiten gängiger Geschäftsprozesse (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 1ff.). Die Entwicklung wurde unter Berücksichtigung wissenschaftlicher Standards in einem vierstufigen Studiendesign durchgeführt und hat in Summe zwei Jahre in Anspruch genommen (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 5f.). Das Ergebnis des *Circular Strategies Scanner* besteht aus vier übergreifenden Strategien, die nach ihrer zeitlichen Abfolge im Lebenszyklus sowie ihres Anwendungsbereichs kategorisiert sind (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 14). In Abbildung 3-5 ist die Taxonomie von BLOMSMA ET AL. grafisch aufbereitet.

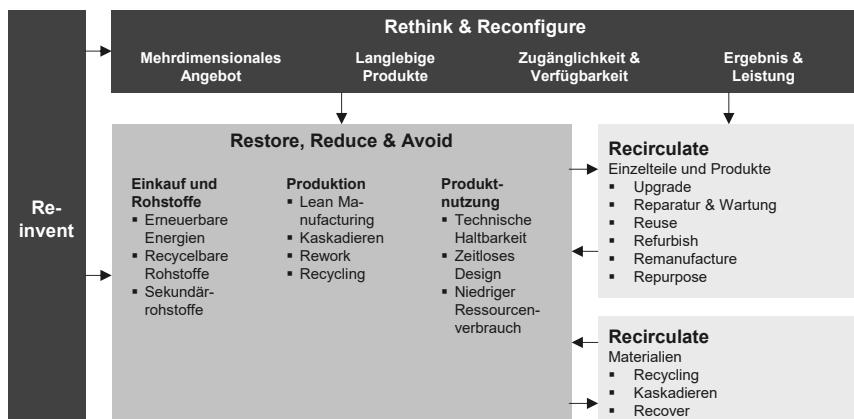


Abbildung 3-5: Circular Strategies Scanner nach BLOMSMA ET AL. (BLOMSMA ET AL. 2019, S. 14)

Dabei erheben die Autoren keinen Anspruch auf Vollständigkeit des *Circular Strategies Scanner*, sondern heben hervor, dass er vor allem als Inspiration dienen soll (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 15). Die übergeordneten Klassen der Taxonomie orientieren sich an den Produktlebensphasen und bilden das Rahmenwerk konkreter Kreislaufstrategien. Unter *Rethink & Reconfigure* werden dagegen holistische Ansätze eingeordnet, um produzierenden Unternehmen aufzuzeigen, dass kreislauffähiges Wirtschaften eine Veränderung des Geschäftsmodells erfordert (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 15).

Das Konzept der Circular Economy als Maxime für Beschaffung und Vertrieb in der Industrie | BUCHBERGER ET AL. 2019

Das Arbeitspapier von BUCHBERGER ET AL. betrachtet das Prinzip der Kreislaufwirtschaft mit Fokus auf der Industrie und zeigt dazu Umsetzungsmöglichkeiten, Anforderungen und Auswirkungen auf (s. BUCHBERGER ET AL. 2019, S. 2). Dazu wird vor dem Hintergrund der industriellen Anwendung auf das 9R-Rahmenkonzept von KIRCHHERR ET AL. verwiesen, das neue Kreislaufstrategien identifiziert (s. BUCHBERGER ET AL. 2019, S. 9f.; vgl. KIRCHHERR ET AL. 2017). Ferner untersuchen die Autoren die Versorgungssicherheit von Rohstoffen in Europa und die Wiederverwendungsquoten von Materialien in der Automobilindustrie (s. BUCHBERGER ET AL. 2019, S. 23ff.). Sie kommen zu dem Schluss, dass die Notwendigkeit der Kreislaufwirtschaft enorm ist und sich das 9R-Rahmenkonzept zur Anwendung in der Industrie eignet (s. BUCHBERGER ET AL. 2019, S. 29).

Approach for developing implementation strategies for circular economy in global production networks | KLENK ET AL. 2020

KLENK ET AL. stellen in ihrem Beitrag Handlungsfelder für die erfolgreiche Umsetzung von nachhaltigen Produktionsprinzipien in zirkulären Produktionsnetzwerken vor. Dazu entwickeln sie einen Ordnungsrahmen, der zirkuläre Geschäftsmodelle und korrespondierende Wertschöpfungsnetzwerkkonfigurationen verbindet (s. KLENK ET AL. 2020, S. 129).

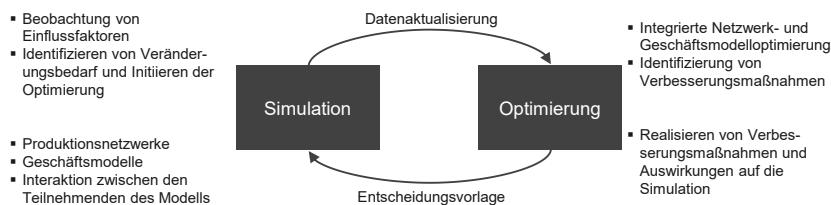


Abbildung 3-6: Ordnungsrahmen zur Einführung von Kreislaufstrategien nach KLENK ET AL. (KLENK ET AL. 2020, S. 130)

Der Ordnungsrahmen ist aus den zwei Hauptelementen *Simulation* und *Optimierung* aufgebaut (s. KLENK ET AL. 2020, S. 129). Das Simulationsmodul simuliert Geschäftsmodelle unter Berücksichtigung des individuellen Kundenverhaltens, um die Erfolgswahrscheinlichkeit des Kreislaufsystems zu erhöhen (s. KLENK ET AL. 2020, S. 129).

Zur Datengenerierung werden Kundengruppen identifiziert und stochastische Methoden herangezogen (s. KLENK ET AL. 2020, S. 129). Das Produktionsnetzwerk wird anhand von Elementen klassischer Produktionen wie *Lieferanten* und *Produktionsstätten* und Objekten einer Kreislaufwirtschaft wie *Sammelzentren* und *Servicestätten* simuliert (s. KLENK ET AL. 2020, S. 129). Im Optimierungsmodul werden die simulierten Objekte analysiert und in einem Lösungsfeld zusammengefasst (s. KLENK ET AL. 2020, S. 130). Zur Sicherstellung seiner Anwendbarkeit wird der Ordnungsrahmen in enger Zusammenarbeit mit Industriepartnern validiert (s. KLENK ET AL. 2020, S. 131).

The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies | KRISTOFFERSEN ET AL. 2020

KRISTOFFERSEN ET AL. postulieren, dass, obwohl eine Vielzahl an intelligenten, digitalen Technologien existieren, deren Nutzen für die Kreislaufwirtschaft bisher nicht ausreichend systematisch untersucht wurde, um das volle Potenzial auszunutzen (s. KRISTOFFERSEN ET AL. 2020, S. 242). In ihrem Beitrag wird dazu die *Smart CE Matrix* entwickelt, die auf dem *Circular Strategies Scanner* von BLOMSMA ET AL. und dem eigens entwickelten *Smart CE Framework* basiert (s. KRISTOFFERSEN ET AL. 2020, S. 242; s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 14). Das *Smart CE Framework* von KRISTOFFERSEN ET AL. kombiniert fundamentale Elemente von Data-Analytics und der Informationstheorie in Form des Industrie-4.0-Maturity-Index und der DIKW-Pyramide (s. KRISTOFFERSEN ET AL. 2020, S. 248). Der Industrie-4.0-Maturity-Index definiert die Reifegrade der Datenanalyse in industriellen Anwendungen von *descriptive* (Erklärung) bis *prescriptive* (eigenständige Entscheidungen auf Basis der Datenanalyse), wohingegen die DIKW-Pyramide auf ACKOFF ET AL. basiert und den Wissenszuwachs von Rohdaten bis zum gewonnenen Wissen darstellt (vgl. SCHUH ET AL. 2020; vgl. ACKOFF 1989). Darauf aufbauend besteht die *Smart CE Matrix* aus einer Zusammenstellung von Praxisbeispielen, klassifiziert in die Hierarchiestufen der DIKW-Pyramide und des Industrie-4.0-Maturity-Index (s. KRISTOFFERSEN ET AL. 2020, S. 254). Ein Auszug aus der vollständigen *Smart CE Matrix* ist in Abbildung 3-7 dargestellt.

		Recirculate (Produkte und Komponenten)	Recirculate (Materialien)
Weisheit	Prescriptive	Verlängerung vorhandener Lebenszyklen (1) Autonome Ermittlung und Planung von lebenszyklusverlängernden Maßnahmen für Produkte und Komponenten	Erweitern um neue Lebenszyklen (1) Autonome Kosten-Nutzen-Analyse der verfolgten Kreislaufstrategie. (2) Autonomes Agieren auf Marktbörsen zur Wiederverwendung von Produkten.
	Predictive	(1) Vorhersage und automatische Planung von lebenszyklusverlängernden Maßnahmen für Produkte und Komponenten	(1) Vorhersage der Auswirkungen verschiedener Lebenszykluszenarien. (2) Vorhersage der Kundenakzeptanz von Sekundärprodukten.
Wissen	Discovery	(1) Untersuchung verschiedener Optionen für die Verlängerung des Produktlebenszyklus von Produkten und Komponenten	(1) Empirische Produktbewertung anhand von Produktvergleichen. (2) Identifizierung neuer Märkte und relevanter Faktoren für die Produktan nahmen durch Sekundärnutzer. (1) Identifizierung neuer und effektiver Materialkaskaden. (2) Erkenntnisgewinn relevanter Faktoren für die Annahme von Altmaterialien auf Marktplätzen.

Abbildung 3-7: Auszug aus der Smart CE Matrix (KRISTOFFERSEN ET AL. 2020, S. 256)

Intelligentes Nesting in der Kreislaufwirtschaft zur Steigerung der Ressourceneffizienz | KRONENBERG ET AL. 2021

KRONENBERG ET AL. betrachten in ihrem Beitrag die Kreislaufstrategie des *Repurpose* vor dem Hintergrund einer ressourceneffizienten Fertigung (s. KRONENBERG ET AL. 2021, S. 674). Durch intelligentes Nesting, das Anordnen von Bauteilen im Bauraum einer Fertigungsmaschine, planen die Autoren, die Nutzung von Primärrohstoffen zu senken (s. KRONENBERG ET AL. 2021, S. 674). Das Nesting wird am Beispiel eines Maschinenkreismessers demonstriert, dessen Weiternutzung durch Fräsv erfahren sichergestellt werden kann (s. KRONENBERG ET AL. 2021, S. 677f.). Allerdings sind dazu Informationen über Materialqualität und Abnutzungsgrad notwendig, um den Fertigungsprozess zur Weiternutzung effizient umsetzen zu können (s. KRONENBERG ET AL. 2021, S. 679). Konkret werden verschiedene Positionen eines Messerrohlings unter ökologischen Aspekten verglichen, deren Anwendung von nachfolgenden Fertigungsverfahren abhängen (s. KRONENBERG ET AL. 2021, S. 678f.). In der Zusammenfassung kommen die Autoren zu dem Schluss, dass nicht nur Informationen zum Material, sondern auch über die zu fertigenden Produkte der Gebrauchteile und Sekundärrohstoffe zur Verfügung stehen müssen, um diese im Fertigungsprozess entsprechend zu berücksichtigen (s. KRONENBERG ET AL. 2021, S. 679).

Toward circular economy implementation in manufacturing systems using a multi-method simulation approach to link design and business strategy | LIEDER ET AL. 2017

In ihrem Beitrag im *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* entwickeln die Autoren Entscheidungshilfen für Kreislaufstrategien von Produkten in der Entwicklungsphase (s. LIEDER ET AL. 2017). Die Autoren postulieren, das in der frühen Phase der Produktgestaltung die Schwierigkeit besteht, fundierte gestalterische

Entscheidungen zur Kreislauffähigkeit der zu entwickelnden Produkte zu treffen, da das Produktgeschäftsmodell keine Kreislaufnutzung vorsieht (s. LIEDER ET AL. 2017, S. 1955f.). Mithilfe einer Multi-Methodik-Simulation zielen LIEDER ET AL. darauf ab, für ausgewählte Strategien der Wiederverwendung, der Aufbereitung und des Recyclings Entscheidungsmöglichkeiten bereits im Entwicklungsprozess treffen zu können (s. LIEDER ET AL. 2017, S. 1956). Das Simulationsmodell besteht aus den Phasen der Produktion und Rückgewinnung, des Transports sowie der Nutzung, denen jeweils Prozessschritte mit Kosten- und CO₂-Equivalent zugeordnet werden (s. LIEDER ET AL. 2017, S. 1959). Zudem bestehen in der Entwicklungsphase verschiedene Designoptionen, denen ein Faktor für Wiederverwendbarkeit, technische Überholbarkeit und Recyclingfähigkeit zugeordnet wird und der in die Simulation einfließt (s. LIEDER ET AL. 2017, S. 1956). Anhand des Anwendungsbeispiels einer Waschmaschine überprüfen die Autoren die Validität ihrer Simulation. Darin werden neben den drei Kreislaufstrategien die Geschäftsmodelle des Rückkaufs am Lebenszyklusende, das Leasing und das Pay-per-Use in die Simulation integriert (s. LIEDER ET AL. 2017, S. 1961). Die Ergebnisse von LIEDER ET AL. zeigen, dass vor allem das Buy-Back-Geschäftsmodell die geringsten Lifecycle-Kosten produziert und sich auf einem vergleichbaren Niveau des Lifecycle-Impacts in CO₂-Kg der weiteren betrachteten Geschäftsmodelle befindet (s. LIEDER ET AL. 2017, S. 1964). Über den Lebenszyklus werden dabei jedoch weniger Kunden beliefert als im Pay-per-Use-Modell (s. LIEDER ET AL. 2017, S. 1964). Die Autoren schließen daraus, dass insbesondere höhere Transportkosten aufgrund einer gesteigerten Wiedernutzungs- und Aufbereitungsraten des Pay-Per-Use-Modells entscheidend für den Kostenunterschied sind, sich im Lifecycle-Impact aber ausgleichen werden (s. LIEDER ET AL. 2017, S. 1965). Schließlich treffen die Autoren die Einschätzung, dass mithilfe von Simulationsmodellen die Kreislaufstrategien und Geschäftsmodelle bereits im Entwicklungsprozess eine Entscheidungshilfe bieten können (s. LIEDER ET AL. 2017, S. 1969).

A framework for identifying differences and similarities in the managerial competencies associated with different modes of product life extension | LINTON U. JAYARAMAN 2005

LINTON U. JAYARAMAN betrachten in ihrem Beitrag verschiedene Ansätze zur Lebenszyklusverlängerung von Produkten (s. LINTON U. JAYARAMAN 2005, S. 1807). In Summe identifizieren sie neun Strategien, die in Abbildung 3-8 aufgelistet sind (s. LINTON U. JAYARAMAN 2005, S. 1813–1816).

Strategie	Definition nach LINTON u. JAYARAMAN
Recall	Das Produkt wird nach Markteinführung wieder zum Hersteller zurückgerufen, um einen sicherheits- oder gesundheitsrelevanten Defekt zu reparieren
Repair	Das Produkt wird nach einem Schaden oder Verschleiß wieder in einen funktionstüchtigen Zustand gebracht
Preventative Maintenance	Die Inspektion oder Instandhaltung wird zu einem vorgeplanten Zeitpunkt durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit des Produkts zu gewährleisten
Predictive Maintenance	Die Inspektion oder Instandhaltung wird zustandsbasiert durchgeführt und orientiert sich dafür an Statistiken und Daten, die das Produkt zur Verfügung stellt
Upgrade	Ein Upgrade rüstet das Produkt auf, indem die Qualität, der Wert, die Effektivität oder Leistung einer Komponente verbessert wird
Product Reuse	Das Produkt wird in der gleichen Funktionsweise genutzt wie bei seinem ersten Nutzer
Remanufacture	Das Produkt wird auf einen Zustand nahe am Neuzustand restauriert, um die Leistungs- und Haltbarkeit des Originalzustands zu erreichen
Komponenten Reuse	Die Komponenten eines Produkts werden demontiert und einzeln im Sekundärmarkt wiederverwendet
Recycle	Die Materialien des Produkts werden gesammelt und so verarbeitet, dass daraus Neuteile gefertigt werden können

Abbildung 3-8: Neun Strategien zur Lebenszyklusverlängerung nach LINTON u. JAYARAMAN (eigene Darstellung i. A. a. LINTON u. JAYARAMAN 2005, S. 1813–1816)

LINTON u. JAYARAMAN sehen in der Umsetzung dieser Strategien jedoch einige implizite Herausforderungen: (1) Der ungewisse Zeitpunkt und die unsichere Menge von retournierten Produkten erschweren die Planbarkeit einiger Strategien (s. LINTON u. JAYARAMAN 2005, S. 1817). (2) Die Nachfrage muss mit Retouren ausbalanciert werden, um eine übermäßige Lagerung von Komponenten zu vermeiden (s. LINTON u. JAYARAMAN 2005, S. 1817). (3) Retouren müssen für einige Strategien demontiert werden, was eine Herausforderung für die Produktionsplanung darstellt (s. LINTON u. JAYARAMAN 2005, S. 1818). (4) Der Zustand des Produkts ist unbekannt und führt daher zu zusätzlicher Komplexität im Management von Ersatzteilen (s. LINTON u. JAYARAMAN 2005, S. 1818). (5) Ein rückgewandtes Logistiknetzwerk ist erforderlich, um Produkte vom Kunden und Nutzer zurückzuerlangen (s. LINTON u. JAYARAMAN 2005, S. 1818). (6) Das Matching von Material und Komponenten wird komplex, sobald das Eigentum des Produkts weiterhin beim Kunden liegt, jedoch eine Aufbereitung oder Instandhaltung durchgeführt wird (s. LINTON u. JAYARAMAN 2005, S. 1818). (7) Die Fertigungszeiten sind abhängig vom Produktzustand und daher nur schwierig vorzuplanen (s. LINTON u. JAYARAMAN 2005, S. 1819). Die Autoren identifizieren relevante Kreislaufstrategien und beschreiben Herausforderungen, deren Lösungsansätze im Rahmen dieser Dissertationsschrift mit Informationsmodellen unterstützt werden können. Im Allgemeinen wurden in diesem Beitrag bereits 2005 Herausforderungen genannt, die ebenso zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Dissertationsschrift zutreffen und damit den aktuellen Stand bestätigen.

A Strategy for Material Supply Chain Sustainability: Enabling a Circular Economy in the Electronics Industry through Green Engineering | O'CONNOR ET AL. 2016

O'CONNOR ET AL. legen in ihrem Beitrag einen Schwerpunkt auf die Elektronikindustrie. Vor dem Hintergrund, dass die Innovationsgeschwindigkeit von Elektronikprodukten ein Ungleichgewicht in der Materialrückgewinnung am Lebenszyklusende provoziert, untersuchen die Autoren Ansätze zur Steigerung der Materialextraktion nach der Nutzungsphase von Elektronikkomponenten (s. O'CONNOR ET AL. 2016, S. 5879). Dazu betrachten die Autoren zunächst das *Green Engineering*, das auf zwölf Prinzipien nach ANASTAS U. ZIMMERMANN basiert und Aspekte von Materialsicherheit bis Materialherkunft adressiert (s. O'CONNOR ET AL. 2016, S. 5880; s. ANASTAS U. ZIMMERMAN 2003). Zusammengeführt mit aktuellen technologischen Innovationen, haben O'CONNOR ET AL. acht zukünftige Strategien abgeleitet (s. O'CONNOR ET AL. 2016, S. 5882–5886):

1. Demontage in der Entwicklung berücksichtigen (*Design for Disassembly*)
2. Alternative Materialien entwickeln (*Development of Materials for Substitution*)
3. Herstellungseffizienz erhöhen (*Fabrication Efficiency*)
4. Herstellungsprozesse an Recyclingmaterialien anpassen (*Manufacturing Processes that Enable Use of Recycled Materials*)
5. Einsammeln von Elektronikschrott durch technologische und politische Maßnahmen (*Technology Interventions to Enable E-Waste Recovery*)
6. Methoden zum Separieren von Elektronikkomponenten (*Methods to Separate E-Waste Components*)
7. Entwickeln von Technologien zur Rückgewinnung von Seltenen Erden (*Develop Technologies to Digest and Recover Mixed RESE*)
8. Entwickeln von Technologien zum Herstellen von kommerziell wertvollen und reinen Ausgangsstoffen (*Technologies to Separate Commercially Desirable, High-Purity Outputs*)

Die abgeleiteten Strategien zeigen einen Fokus auf elektronischen Konsumgütern, die in großem Maße verfügbar sind und aus einer Vielzahl komplexer Bauteile bestehen. Im Rahmen dieser Dissertationsschrift können die Strategien jedoch nur begrenzt angewandt werden, da vor allem Seltene Erden im Maschinen- und Anlagenbau nur einen Randaspekt darstellen und die Lebenszeiten sehr viel länger geplant werden.

Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain | POTTING ET AL. 2017

POTTING ET AL. analysieren in ihrem Bericht für das niederländische Umweltministerium die Messbarkeit von Fortschritten in der niederländischen Kreislaufwirtschaft und entwickeln dazu einen konzeptionellen Ordnungsrahmen als Strukturierungshilfe (s. POTTING ET AL. 2017, S. 11). Sie fundieren ihre Untersuchungen auf den 10R-Ordnungsrahmen von Kreislaufstrategien, der in Unterkapitel 5.1 detailliert wird (s. POTTING ET

AL. 2017, S. 14f.). Dieser wird verwendet, um anhand konkreter Anwendungsbeispiele den Einfluss angewandter Strategien auf vorgegebene Denkmuster und Regularien, Technologien, Produktdesigns und Geschäftsmodelle zu bewerten (s. POTTING ET AL. 2017, S. 26). Am Beispiel des Kunststoff- und Elektronikkreislaufs postulieren die Autoren, dass die sozio-institutionelle Veränderung eine größere Herausforderung darstellt als technologische Innovationen für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft (s. POTTING ET AL. 2017, S. 37). Technologische Innovationen haben laut POTTING ET AL. trotzdem einen nicht zu unterschätzenden Effekt auf die Kreislaufwirtschaft mit der Einschränkung, dass der Rebound-Effekt dazu führt, dass ressourceneffiziente Innovationen zu einer höheren Nutzung führen und somit keinen positiven Effekt auf die Umwelt realisieren können (s. POTTING ET AL. 2017, S. 37). Vor dem Hintergrund der Anwendungsbeispiele für die Kreislaufstrategien zeigen die Autoren in ihrem Beitrag auf, wie die Kreislaufstrategien angewendet werden können, um kreislaufbasierte Initiativen zu identifizieren und zu strukturieren.

Key strategies, resources, and capabilities for implementing circular economy in industrial small and medium enterprises | PRIETO-SANDOVAL ET AL. 2019

Die Autoren postulieren, dass kleine und mittlere Unternehmen einen essenziellen Beitrag zur Erreichung der Ziele der Kreislaufwirtschaft leisten und entwickeln gezielt Strategien für diese Zielgruppe (s. PRIETO-SANDOVAL ET AL. 2019, S. 1473f.). PIETRO-SANDOVAL ET AL. unterscheiden dafür zwischen dem Mikro-, Meso- und Makrolevel der Kreislaufwirtschaft (s. PRIETO-SANDOVAL ET AL. 2019, S. 1475): Auf Mikrolevel werden einzelne Güter und Services hergestellt, gehandelt und verwertet. Auf Mesolevel bilden Unternehmen über Cluster oder Geschäftsökosysteme eigene Systeme, die mit Hilfe einer industriellen Symbiose ein eigenständiges Kreislaufsystem bilden. Auf Makrolevel geben Legislative und Judikative die rechtlichen Rahmenbedingungen vor und steuern darüber die Entwicklung der Kreislaufwirtschaft. Die Autoren entwickeln auf dieser Basis strategische Aktivitäten zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft für kleine und mittlere Unternehmen, wie in Abbildung 3-9 beschrieben ist (s. PRIETO-SANDOVAL ET AL. 2019, S. 1478). Dazu behelfen sich die Autoren dem ökologischen Maturity Model nach ORMAZABEL ET AL., um darauf aufbauend fünf Entwicklungsstufen der Kreislaufwirtschaft abzuleiten (s. PRIETO-SANDOVAL ET AL. 2019, S. 1476f.; vgl. ORMAZABEL ET AL. 2017). Die ausgewählten Stufen beinhalten (1) den Auftrag, (2) die Systematisierung, (3) das ECO2, (4) ökologische Produkte und Services und (5) das führende ökologische Unternehmen (s. PRIETO-SANDOVAL ET AL. 2019, S. 1476). In der Auftragsstufe werden die Verantwortlichkeiten für nachhaltige Initiativen im Unternehmen verteilt, wohingegen in der Systematisierung das Nachhaltigkeitsmanagement professionalisiert wird (s. PRIETO-SANDOVAL ET AL. 2019, S. 1475). Darauffolgend stufen die Autoren in ECO2 einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess für die ökologischen Auswirkungen des Unternehmens ein und beschreiben in der nächsten Stufe das innovativ-ökologische Angebotsportfolio des Unternehmens (s. PRIETO-SANDOVAL ET AL. 2019, S. 1476). Als finale Zielstufe wird das führende ökologische Unternehmen angestrebt, das in Wissenschaft und Wirtschaft als Referenzunternehmen angeführt wird (s. PRIETO-SANDOVAL ET AL. 2019, S. 1476).

Handlungsfelder	Auftrag	Systematisierung	ECO2	Ökologische Produkte und Services	Führendes ökologisches Unternehmen
Materialeffizienz		Materialverfolgbarkeit; Nachhaltiger Einkauf; <i>Corporate Social Responsibility</i>	Vermeidung giftiger Substanzen; Prozess- und Produkttransparenz	Motivieren zu nachhaltigen Materialien	Nutzung nachhaltiger und wiederverwendbarer Materialien
Produktion	Weiterbildung der Arbeitnehmenden	Optimieren der Ressourcen Nutzung	Einsatz erneuerbarer Energien; Prävention vor ökologischen Folgen	Entwicklung zirkulärer Produkte; Kollaboratives Produktdesign; Ökologisches Retrofitting	Ausschussfreie Prozesse; Vorreiter in der Industrie 4.0
Logistik			Optimierung von Lagerung und Routenplanung	Lokaler Fokus	Kollaborative Retourenlogistik
Nutzung	Antworten von Kundenanfragen zur Nachhaltigkeit	Nachhaltige Produktzertifizierungen	Kommunikation von ökologischen Initiativen	Nachhaltige Marketingstrategie; Marktsegmentierung	Umgesetztes Produkt-Service-System
Wiederbeschaffung			Abfallmanagement	Wertnutzung von Abfall und Energie	Kommerzialisierung von Beiproducten und überschüssiger Energie
Industrielle Symbiose				Integration weiterer Stakeholder zum Teilen von Materialien und Beiproducten	Vollständige Integration von Ressourcen und Energie mit weiteren Stakeholdern

Abbildung 3-9: Strategische Aktivitäten zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft in kleinen und mittleren Unternehmen (PRIETO-SANDOVAL ET AL. 2019, S. 1478)

PRIETO-SANDOVAL ET AL. teilen den Aktionsraum, der sich am Produktlebenszyklus orientiert, in sechs Handlungsfelder ein. Auf der zweiten Achse werden jenem die Level der *Environmental Management Maturity* entgegengestellt, um daraus gezielt Aktivitäten ableiten zu können. Vor dem Hintergrund dieses Dissertationsvorhabens zeigen PRIETO-SANDOVAL ET AL. einen guten Überblick von Handlungsmöglichkeiten für kleine und mittlere Unternehmen auf, betrachten jedoch die Nutzungsphase nur in sehr reduzierter Form und bieten hier keine tiefergehenden Strategien an.

The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? – Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options | REIKE ET AL. 2018

REIKE ET AL. führen in ihrem Beitrag eine ausführliche Literaturrecherche durch, die darauf abzielt, ein eindeutiges Verständnis der Kreislaufwirtschaft zu erlangen (s. REIKE ET AL. 2018, S. 247). Dazu betrachten sie in ihrer Recherche zum einen grundlegende Konzepte der Kreislaufwirtschaft und zum anderen tiefergehende Definitionen einzelner Konzeptbestandteile (s. REIKE ET AL. 2018, S. 247). Sie zeigen auf, wie sich die Kreislaufwirtschaft von der Abfallwirtschaft in den 1990er-Jahren hin zu einem umfassenden Ansatz entwickelt hat und betonen, dass die Wissenschaft bisher zu wenige Anstrengungen unternommen hat, detaillierte Konzepte zu entwickeln und zu validieren (s. REIKE ET AL. 2018, S. 249). REIKE ET AL. analysieren, dass sich aufgrund der einfachen Terminologie der „Re-“Kreislaufstrategien eine uneinheitliche Verständnislandschaft mit 38 alternativen „Re-“Strategien gebildet hat (s. REIKE ET AL. 2018,

S. 253). Mithilfe ihrer Auswahl aus 69 Quellen beabsichtigen sie, eine allgemeingültige Konzeptionierung von Kreislaufstrategien zu etablieren (s. REIKE ET AL. 2018, S. 253). Das Ergebnis der Analyse ist in Abbildung 3-10 abgebildet:

R-Strategie	Nutzer	Definition
(9) Remine	Örtliche Behörden	REIKE ET AL. definieren Remine als die Rückgewinnung von Materialien nach der Deponierungsphase
(8) Recover (Energie)	Energieversorger	In 20 der analysierten Beiträge wird Recovery als die Rückgewinnung der im Abfall enthaltenen Energie definiert
(7) Recycle	Abfallunternehmen	Im Allgemeinen wird Recycling als die Verarbeitung von gemischten Stoff- und Produktströmen unter Verwendung technologischer Anlagen und anderer Verfahren zur Gewinnung (nahezu) reiner Materialien verstanden
(6) Repurpose	Neue Nutzer	Durch die Wiederverwendung von ausrangierten Produkten oder Komponenten, die für eine andere Funktion angepasst werden, erhält das Material einen neuen Lebenszyklus
(5) Remanufacture	Erst- oder neue Nutzer	Remanufacturing liegt vor, wenn die gesamte Struktur eines aus mehreren Komponenten bestehenden Produkts in einem industriellen Verfahren demontiert, geprüft, gereinigt und gegebenenfalls ersetzt oder repariert wird
(4) Refurbish	Erst- oder neue Nutzer	REIKE ET AL. verstehen unter der Refurbish-Strategie den Fall, in dem die Gesamtstruktur eines komplexen, aus mehreren Komponenten bestehenden Produkts intakt bleibt, während einige Komponenten ersetzt oder repariert werden, sodass der Prozess zu einer allgemeinen Aufwertung des Produkts führt
(3) Repair	Erst- oder Zweitnutzer	Das Ziel der Repair-Strategie ist es, die Lebensdauer des Produkts zu verlängern. Eine wichtige Unterscheidung zu weiteren lebensdauerverlängernden Strategien zeigt sich darin, dass Reparaturen von verschiedenen Akteuren und mit oder ohne Eigentumswechsel durchgeführt werden können. Reparaturen können bspw. vom Kunden oder durch ein Reparaturunternehmen durchgeführt werden.
(2) Resell/Reuse	Verbraucher	Im Allgemeinen bezieht sich die Strategie des Reuse meist auf einen zweiten Nutzer eines Produkts, das kaum Anpassungen benötigt und ohne Aufarbeitung, Nacharbeit oder Reparaturen funktionstüchtig ist
(1) Reduce	Verbraucher	Laut REIKE ET AL. wird Reduce mit den Herstellern und ihrer Rolle vor Markteinführung eines Produkts assoziiert und beschreibt darin die Verwendung von weniger Material pro Einheit oder die Dematerialisierung im Produktdesign
(0) Refuse	Potenzieller Verbraucher	Refuse wird für Konsumenten definiert als Konzept, weniger Produkte zu kaufen und damit weniger Ressourcen zu verbrauchen

Abbildung 3-10: Ergebnis der Konzeptionalisierung von Kreislaufstrategien (eigene Darstellung i. A. a. REIKE ET AL. 2018, S. 256)

In der Typologie werden die Ansätze in zehn Kreislaufstrategien zusammengefasst, die acht wiederverwendbare und zwei präventive Strategien beinhalten (s. REIKE ET AL. 2018, S. 254). Die Autoren unterscheiden dazu drei Lebenszyklusphasen (s. REIKE ET AL. 2018, S. 254ff.): die kurzen Zyklen, denen die Strategien *Refuse*, *Reduce* und *Reuse* zugeordnet werden, die mittleren Zyklen, die die Strategien *Refurbish*, *Remanufacture* und *Repurpose* beinhalten, und die langen Zyklen, die aus *Materialrecycling*, *Energierückgewinnung* und *Remine* bestehen (s. REIKE ET AL. 2018, S. 255ff.). Im Rahmen dieser Dissertationsschrift bildet die Analyse nach REIKE ET AL. eine fundierte Definition der relevanten Kreislaufstrategien, die in der Wissenschaft betrachtet werden.

Der Circular Economy Analyst | SCHMIDT ET AL. 2019

Die Autoren betrachten in ihrem Beitrag drei Aspekte der Kreislaufwirtschaft mit Fokus auf der Bau- und Möbelbranche (s. SCHMIDT ET AL. 2019, S. 146): (1) Kreislauffähige Geschäftsmodelle, (2) nachhaltiges Produktdesign und (3) erwartbare Umwelteffekte. Ziel des Beitrags ist die Entwicklung einer Berechnungsmethode zur Vergleichbarkeit verschiedener Kreislaufstrategien anhand seiner Umwelteffekte (s. SCHMIDT ET AL.

2019, S. 146). Dazu wird eine Referenzszenario mit der Zielgröße von Kilogramm-CO₂-Äquivalenten für einen Bürostuhl aufgestellt, um ausgewählte Kreislaufszenarien quantitativ vergleichen zu können (s. SCHMIDT ET AL. 2019, S. 149). Anhand von betroffenen Lebenszyklusphasen wird linear der Einfluss der untersuchten Strategie auf das CO₂-Äquivalent berechnet, um darüber eine Aussage über den Umwelteinfluss der Kreislaufstrategie treffen zu können (s. SCHMIDT ET AL. 2019, S. 151). Im Ergebnis folgern die Autoren, dass für ein rohstoffintensives Produkt wie den Bürostuhl alle untersuchten Strategien bereits einen hohen Einfluss auf die Umweltauswirkungen ausüben (s. SCHMIDT ET AL. 2019, S. 150). Die Methodik und ermittelten Ergebnisse aus dem Artikel von SCHMIDT ET AL. sind inhaltlich auch auf den Sektor des Maschinen- und Anlagenbaus übertragbar, da insbesondere die untersuchten Kreislaufstrategien und Geschäftsmodelle allgemein anwendbar erscheinen. Die entwickelte Methodik zur Berechnung der Umweltauswirkungen kann jedoch höchstens als Schätzwert genutzt werden und keine umfangreiche Analyse ersetzen.

Conceptualizing ReX for aggregating end-of-life strategies in product development | SIHVONEN U. RITOLA 2015

Die Autoren konzipieren in ihrem Artikel eine Taxonomie zur Aggregation von Definitionen von End-of-Life-Strategien (s. SIHVONEN U. RITOLA 2015, S. 640). Dazu beziehen sich SIHVONEN U. RITOLA auf die Abfallhierarchie der EU sowie die Eco-Design-Prinzipien von LAGERSTEDT U. LUTTROPP (s. SIHVONEN U. RITOLA 2015, S. 640; s. LUTTROPP U. LAGERSTEDT 2006). In Summe identifizieren die Autoren zehn Kreislaufstrategien, die in Abbildung 3-11 visualisiert sind (s. SIHVONEN U. RITOLA 2015, S. 641).

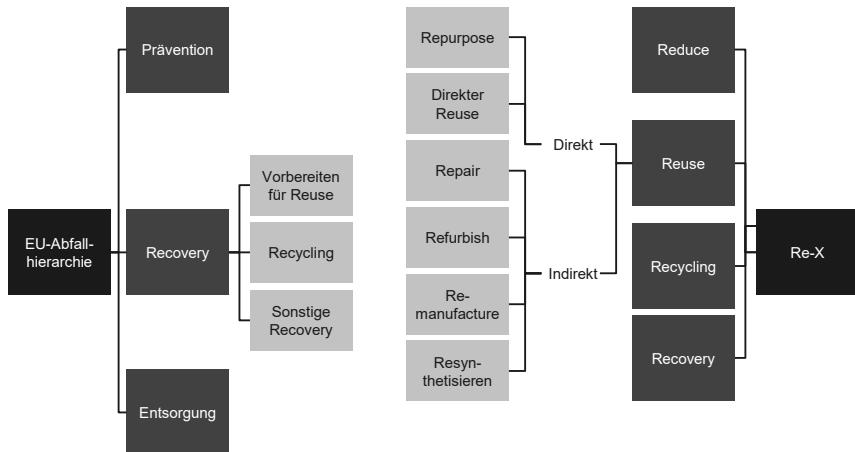


Abbildung 3-11: Taxonomie nach SIHVONEN U. RITOLA im Vergleich zur Abfallhierarchie der EU (SIHVONEN U. RITOLA 2015, S. 641)

Die Autoren leisten damit einen Beitrag zur Visualisierung der Kreislaufstrategien und stellen diesen in den Kontext der EU-Abfallhierarchie, der weiteren Forschungsbedarf im Abfallmanagement aufzeigt (s. SIHVONEN U. RITOLA 2015, S. 643).

Ease of disassembly of products to support circular economy strategies | VANE-GAS ET AL. 2018

VANEGAS ET AL. untersuchen in ihrem Beitrag eine Grundlage für die erfolgreiche Umsetzung von Kreislaufstrategien – die Demontage (s. VANEGAS ET AL. 2018, S. 324). Dazu nutzen die Autoren Zeit als Maßeinheit für die Bewertung einer Demontagemethode und vergleichen verschiedene Ansätze zur Berechnung der Demontagezeit (s. VANEGAS ET AL. 2018, S. 324). Ziel ist die Auswahl einer nutzbaren Methode im Produktentwicklungsprozess, um frühzeitig den Demontageaufwand simulieren zu können. VANEGAS ET AL. proponieren eine neue Methodik zur Berechnung des Demontageaufwands mit Fokus auf der Umsetzung von Kreislastrategien (s. VANEGAS ET AL. 2018, S. 327). Die Methode basiert auf einer Datenbank mit Demontagezeiten für standardisierte Aktivitäten im Demontageprozess wie Werkzeugwechsel, Komponentenlokalisation und Bearbeitungszeit (s. VANEGAS ET AL. 2018, S. 327). Die Autoren beweisen anhand einer Fallstudie der Demontage eines LCD-Monitors die Funktionalität der Methode und postulieren, dass ihre Methode ein sehr gutes Nutzen-Aufwand-Verhältnis aufweist (s. VANEGAS ET AL. 2018, S. 329ff.). Obwohl VANEGAS ET AL. u. a. die Kreislaufstrategien *Reuse* und *Remanufacturing* als Motivation ihrer Untersuchung identifizieren, ist die Simulation der Demontagezeit im Rahmen dieser Dissertationsschrift nur von indirekter Bedeutung.

Evaluating the Environmental Dimension of Material Efficiency Strategies Relating to the Circular Economy | WALKER ET AL. 2018

Die Autoren untersuchen in ihrem Beitrag in der *Sustainability* die Materialeffizienz ausgewählter Kreislaufstrategien und -szenarien anhand der Simulation von Life-Cycle-Assessments einer Gezeitenenergieanlage (s. WALKER ET AL. 2018, S. 2). WALKER ET AL. betrachten dazu fünf Szenarien, die eine Kombination ausgewählter Kreislaufstrategien beinhalten: (1) Recycling, (2) Energierückgewinnung (Recovery), (3) Reuse und Refurbish, (4) Instandhaltungsverlängerung und (5) Instandhaltungsverlängerung und Refurbish (s. WALKER ET AL. 2018, S. 6). Die fünf Szenarien werden auf vier Materialeffizienzwerkzeuge angewendet und verglichen (s. WALKER ET AL. 2018, S. 7f.). In ihrem Fazit bestätigen die Autoren, dass die Kreislaufstrategien einen absteigenden Nutzen über den Produktlebenszyklus von Rethink bis Recycling liefern (s. WALKER ET AL. 2018, S. 13). Zudem postulieren WALKER ET AL., dass Life-Cycle-Assessment-Methoden eine ausreichende Genauigkeit in der Quantifizierung von Umweltauswirkungen von Kreislaufstrategien bieten (s. WALKER ET AL. 2018, S. 13). Vor dem Hintergrund dieses Dissertationsvorhabens bestätigt dieser Artikel, dass Kreislaufstrategien positive Umweltauswirkungen erzielen können und dies auch auf den Maschinen- und Anlagenbau übertragbar ist.

3.2.2 Wissenschaftliche Ansätze zirkulärer Ökosysteme

Dieser Unterabschnitt betrachtet den aktuellen Stand der Erkenntnisse zu zirkulären Ökosystemen. Dazu wurde analog zu Unterabschnitt 3.2.1 das Vorgehen der systematischen Literaturrecherche herangezogen und auf die Literaturdatenbank *Scopus*

angewendet. Um relevante Literatur zum Thema Kreislaufwirtschaft zu finden, wurden in Summe neun Suchbegriffe in englischer Sprache verwendet. Die Suchbegriffe enthalten jeweils die Begriffe *Circular* und *Manufacturing*, um die Rahmenbedingungen einer Kreislaufwirtschaft im Maschinen- und Anlagenbau abdecken zu können. Die vollständige Auswahl der Suchterme zur Identifikation relevanter wissenschaftlicher Literatur ist im Folgenden aufgelistet:

Tabelle 3-2: Suchbegriffsmatrix zu zirkulären Ökosystemen (eigene Darstellung)

Term 1	Term 2	Term 2	Term 3
Circular	Manufacturing	Ecosystem	Relationship
			Structures
			Roles
	Economy	Relationship	Ecosystem
			Structures
			Roles
			Organization

Auf die Literaturauswahl aus der *Scopus*-Datenbank wurden zudem die drei Filter *Sprache*, *Erscheinungsjahr* und *Forschungsgebiet* angewendet. Zudem wurde sich auf Ergebnisse von Forschungsarbeiten beschränkt, die in englischer oder deutscher Sprache veröffentlicht wurden. Als Grenze für das Erscheinungsjahr der literarischen Quellen wurde das Jahr 2011 ausgewählt, um auf die aktuellen Erkenntnisse seit der Veröffentlichung der Roadmap eines ressourceneffizienten Europas durch die Europäische Kommission zurückgreifen zu können (s. EUROPEAN COMMISSION 2011). Als thematischer Filter wurde die Suche auf folgende Forschungsgebiete begrenzt: *Environmental Science; Business, Management and Accounting; Engineering; Energy; Economics, Econometrics and Finance; Chemical Engineering; Material Science*.

In Übereinstimmung mit der vorgestellten PRISMA-Methode ergab die Suche mithilfe der definierten Suchterme in Summe 520 Artikel nach Ausschluss von Duplikaten. Im zweiten Schritt wurde die relevante Literatur durch eine Überprüfung des Titels gefiltert. Einer der Hauptgründe für den Ausschluss von Artikeln in dieser Phase war die mangelnde Relevanz im Hinblick auf die Beschreibung und Untersuchung von zirkulären Ökosystemen in der produzierenden Industrie. Aus diesem Grund ausgeschlossene Artikel konzentrierten sich zumeist auf die Industrie 4.0 oder digitale Transformation, nicht aber auf Kreislaufwirtschaft oder Geschäftsökosysteme. Die Abstracts der verbleibenden 75 Artikel wurden auf ihre Eignung geprüft und weitere 48 Artikel wurden ausgeschlossen. Die verbleibenden 27 Artikel wurden auf Grundlage ihres Volltextes überprüft, was zum Ausschluss von weiteren 19 Artikeln führte. Damit ergab die systematische Literaturrecherche acht Artikel, die durch die Vorwärts-Rückwärts-Analyse um einen Artikel auf die finale Anzahl von neun erhöht wurde. In Abbildung 3-12 ist der Auswahlprozess grafisch aufbereitet.

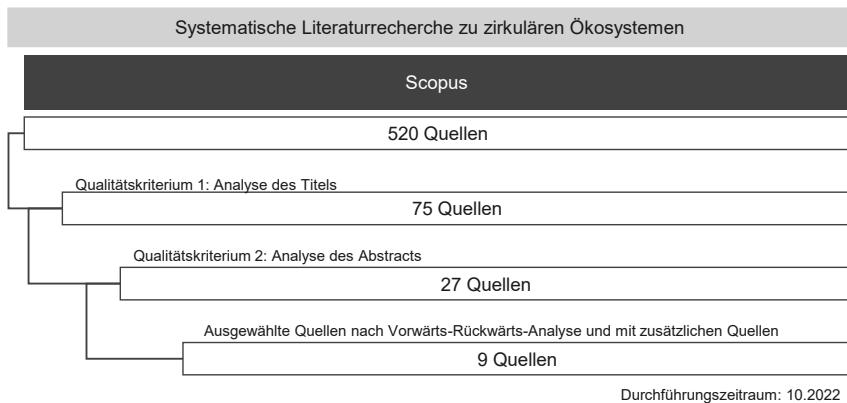


Abbildung 3-12: Beschreibung der systematischen Literaturrecherche zu zirkulären Ökosystemen (eigene Darstellung)

Im Folgenden werden die identifizierten Artikel zum Verständnis der weiteren Arbeit vorgestellt.

Circular economy ecosystems: a typology, definitions, and implications | AARIKKA-STENROOS ET AL. 2021

AARIKKA-STENROOS ET AL. entwickeln in ihrem Artikel aus dem Jahr 2021 eine Typologie zur Charakterisierung von zirkulären Ökosystemen. Damit beabsichtigen sie, der Herausforderung entgegenzutreten, dass zwar die Begrifflichkeiten der zirkulären Ökosysteme in der Wissenschaft vermehrt genutzt werden, jedoch kein theoretisches Grundverständnis über ebenjene besteht (s. AARIKKA-STENROOS ET AL. 2021, S. 261). Die Autoren zielen darauf ab, ein einheitliches Verständnis für Anwendende aus Wissenschaft und Praxis zu schaffen (s. AARIKKA-STENROOS ET AL. 2021, S. 261). Dazu schlagen sie drei Kategorien von Ökosystemen vor, die sich anhand ihrer Austauschbeziehung zwischen den Ökosystemakteuren unterscheiden (s. AARIKKA-STENROOS ET AL. 2021, S. 265): *Materialfluss*, *Wissensfluss* und *Wertfluss*. Darunter werden fünf Typen von zirkulären Ökosystemen definiert (s. AARIKKA-STENROOS ET AL. 2021, S. 266): *industrielles Ökosystem*, *urbanes Ökosystem*, *Wissensökosystem*, *unternehmerisches Ökosystem* und *Innovations-, Plattform- und Geschäftsökosystem*. Die vollständige Typologie ist in Abbildung 3-13 abgebildet.

Ökosystem Kategorie	Materialfluss		Wissensfluss		Wertfluss
Beschreibung der Kategorie	Ökosysteme, die nachhaltige Energie- und Materialflüsse in einem geografisch definierten Kontext ermöglichen		Ökosysteme, die die Wissengenerierung im Bereich der Kreislaufwirtschaft in einem geografisch definierten Kontext ermöglichen		Ökosysteme, die die Schaffung von wirtschaftlichem Wert ermöglichen
Typ	Industrielles Ökosystem	Urbanes Ökosystem	Wissens-ökosystem	Unternehmerisches Ökosystem	Innovations-, Plattform- und Geschäfts-ökosystem
Ökosystem-leistung	Nachhaltige Produktion	Urbane Attraktivität	Wissens-generierung	Geschäftsmodell-entwicklung	Nutzen-versprechen
Standort-spezifität	Lokal	Lokal	Hauptsächlich lokal	Lokal	Nicht an einen Ort gebunden
Definition des Ökosystems	Produktion nachhaltiger Industriegüter und Dienstleistungen in symbiotischer Kollaboration und Res-sourcennutzung	Kollektive Gestaltung von nachhaltigen urbanen Angeboten	Gemeinsame Umsetzung von Forschungs-erkenntnissen in nachhaltige Produkte und Dienstleistungen	Gemeinsame Förderung der Gründung und des Aufbaus von neuen Unternehmen, die sich auf nachhaltige Geschäftsmöglichkeiten konzentrieren	Bereitstellung eines nachhaltigen Wertangebots durch Kollaborationen
Akteure	Hersteller, Dienstleister, Rohstofflieferant, Versorger	Versorger, lokale und regionale Verwaltungen, Dienstleister, Verkehrsbetriebe, Bürger	Universitäten, öffentliche Forschungs-einrichtungen, Unternehmen	Investoren, Inkubatoren, Coworking Spaces, Bildungs-einrichtungen, Verwaltungen	Orchestratoren, Komplementoren, Lieferanten, Kunden
Zirkuläre Charakter-istika	Konzentration auf - oft regionale - Energie- und Materialflüsse zwischen komplementären Unternehmen	Fokus auf regionale Zusammenarbeit zwischen der Stadt/Region und Unternehmen sowie regionalen Verbrauchern	Konzentration auf die Entwicklung und den Austausch von Wissen zwischen privaten Unternehmen, Industriekräften und öffentlichen Organisationen	Fokus auf die Förderung und Beschleunigung von Neugründungen und neuen kleinen Unternehmen mit Unterstützung von komplementären Akteuren	Konzentration auf die Bereitstellung von zirkulären Wertversprechen durch die Akteure des Wertschöpfungsnetzwerks

Abbildung 3-13: Übersicht zirkulärer Ökosystemtypen (AARIKKA-STENROOS ET AL. 2021, S. 266)

Die Autoren demonstrieren damit, dass eine Unterteilung in Typen von zirkulären Ökosystemen möglich ist, konkludieren aber gleichzeitig, dass diese Typologisierung nicht für jedes Ökosystem zutreffend ist (s. AARIKKA-STENROOS ET AL. 2021, S. 271). Auf verschiedene Ökosystemtypen können Elemente aus benachbarten Typen zutreffen und daher sind weitere Forschungsanstrengungen notwendig (s. AARIKKA-STENROOS ET AL. 2021, S. 271).

Exploring the Dynamic of a Circular Ecosystem: A Case Study about Drivers and Barriers | BARQUETE ET AL. 2022

Nach BARQUETE ET AL. existiert bereits sehr viel theoretische und wissenschaftliche Literatur zur Kreislaufwirtschaft und zirkulären Ökosystemen, jedoch fehlen empirische Studien zu deren Funktionsmechanismen (s. BARQUETE ET AL. 2022, S. 2). Die Autoren zielen daher darauf ab, mithilfe der Fallstudienforschung Treiber und Barrieren für zirkuläre Ökosysteme anhand eines brasiliischen Use-Case, der den Prozess vom Papierrecycling bis zur Entstehung von ökologischen Ziegeln fokussiert, zu identifizieren (s. BARQUETE ET AL. 2022, S. 2). Wie in Abbildung 3-14 zu sehen, können BARQUETE

ET AL. in Summe 20 Treiber und 17 Barrieren ableiten (s. BARQUETE ET AL. 2022, S. 10–13).

Treiber zirkulärer Ökosysteme		Barrieren zirkulärer Ökosysteme	
Kategorie	Treiber	Kategorie	Barriere
Entstehung des Ökosystems	Orchestrator für das Recycling von Kartonverpackungen	Material-verfüg-barkeit	COVID-19-Pandemie
	Herstellverfahren für das Recycling von Kartonverpackungen		Ersatz von Kartonverpackungen
	Marktnachfrage im Bausektor		Nicht-Erreichen von Materialspezifikationen
Gesetz-gebung und Standardisierung	Nationale Abfallpolitik	Hohe Kosten	Geringe Verfügbarkeit von Materialien
	Europäische Gesetzgebungen		Logistikschwierigkeit für kleine Mengen
	Norm ISO 14000		Für den Materialtransport
Ökolo-gischer Druck	Umweltauswirkungen von Papier	Markt-fragilität	Für die Reinigung nach der Nutzung
	Interne Nachhaltigkeitsziele		Für die digitale Transformation
	Druck zur Einführung nachhaltiger Produkte		Für die Kunststoff- und Aluminiumtrennung
	Nachfrage von nachhaltigen Produkten		Marktbeschränkungen
	Fehlen von Entsorgungsmöglichkeiten		Mangelnde Strukturen für Kooperationen
Kooperati-on zwischen Akteuren	Bereitstellen von Sammelmöglichkeiten	Koordina-tion zwischen Akteuren	Fehlende Anreizsysteme zum Einsammeln von Kartonverpackungen
	Anreize für das Recycling		Mangelndes Bewusstsein der Verbraucher
	Verleih und Verkauf von Gerätschaften		Mangelndes Bewusstsein der Unternehmen im Ökosystem
	Anreize zur Beteiligung der Kundschaft		Fehlende Kontrolle
	Einrichtung von Recyclingstationen		
Produkt-eigen-schaften	Finanzielle Anreize für Sortenreinheit	Produktions-schwierig-keiten	
	Umweltgerechte Produktgestaltung		Manueller Herstellungsprozess
	Vorteile gegenüber anderen Ziegeloptionen		Fehlende Arbeitskräfte
	Möglichkeit des Recyclings von Ziegeln		

Abbildung 3-14: Übersicht der Treiber und Barrieren von zirkulären Ökosystemen am Beispiel des Kartonrecyclings (eigene Darstellung i. A. a. BARQUETE ET AL. 2022, S. 10–13)

Hervorzuheben ist, dass die Rolle des Orchestrators essenziell für den Erfolg des betrachteten Ökosystems ist und jener ebendieses mithilfe finanzieller und intellektueller Ressourcen erschaffen hat (s. BARQUETE ET AL. 2022, S. 19). Ebenso sind die Beziehungen zwischen den Akteuren des Ökosystems von höchster Relevanz, um ein kollektives Wertversprechen realisieren zu können (s. BARQUETE ET AL. 2022, S. 19). Im Allgemeinen zeigt sich, dass Ökosysteme stetig mit Veränderungen konfrontiert sind und die Akteure sich diesem Umstand bewusst sein müssen, um dies als Wachstumschance sehen zu können (s. BARQUETE ET AL. 2022, S. 18f.).

Designing and testing a new sustainable business model tool for multi-actor, multi-level, circular, and collaborative contexts | BOLDRINI U. ANTHEAUME 2021

Das Ziel der Autoren dieses Artikels ist die Entwicklung von Prozessen und Werkzeugen, die Organisationen unterstützen, Geschäftsmodelle in zirkulären Ökosystemen zu entwickeln (s. BOLDRINI U. ANTHEAUME 2021, S. 1). Vor diesem Hintergrund haben

sich BOLDRINI U. ANTHEAUME der Forschungsfrage gewidmet, wie ein einfach zu nutzendes Geschäftsmodelltool zu gestalten ist, das die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft berücksichtigt und Innovation in Multiakteursnetzwerken und zirkulären Ökosystemen anregt (s. BOLDRINI U. ANTHEAUME 2021, S. 1). Dazu haben die Autoren ein hybrides Vorgehen aus wissenschaftlichen und empirischen Erkenntnissen gewählt und neben einer theoretischen Herleitung praktische Workshops mit Fachleuten auf dem Gebiet durchgeführt (s. BOLDRINI U. ANTHEAUME 2021, S. 3). Der entwickelte Ordnungsrahmen nach BOLDRINI U. ANTHEAUME besteht aus den Kernelementen des *nachhaltigen Wertversprechens*, das als zentraler Bestandteil auch soziale und ökologische Einflüsse zu berücksichtigen hat, den *Ressourcen und Kompetenzen*, die aus menschlichen, technischen, physischen, finanziellen, organisatorischen und reputationsbasierten Kategorien bestehen, der *internen Organisation*, die für zirkuläre Aktivitäten die Entwicklung, das Supply-Chain-Management und das Customer-Relationship-Management umfasst sowie die *Kosten, Umsätze und Triple-Bottom-Line*, die neben den betriebswirtschaftlichen Kennzahlen auch nachhaltige Kennwerte berücksichtigt (s. BOLDRINI U. ANTHEAUME 2021, S. 5). Überdies definieren die Autoren übergreifende Geschäftsmodellcharakteristika bestehend aus (1) *gemeinsamen Zielen, gemeinsamen Werten und eines gemeinsamen Wertversprechens*, (2) *geteilten Ressourcen und Kompetenzen*, (3) *externen Organisationen*, (4) *Logistik*, (5) *Geld- und Informationsflüsse* und (6) *einer gemeinsamen Triple-Bottom-Line* (s. BOLDRINI U. ANTHEAUME 2021, S. 6f.). Neben der konzeptionellen Entwicklung des Ordnungsrahmens wurden die Funktionalität und Anwendbarkeit anhand des Ökosystems von Kunststofffolien für die industrielle Landwirtschaft überprüft (s. BOLDRINI U. ANTHEAUME 2021, S. 8). Wie in Abbildung 3-15 dargestellt, besteht das Ökosystem aus diversen Akteuren und Rollen aus der Kunststoffindustrie und Landwirtschaft mit dem Ziel, Kunststofffolien, die auf Feldern zum Schützen der Pflanzen genutzt werden, in einen Kreislauf zu überführen (s. BOLDRINI U. ANTHEAUME 2021, S. 8).

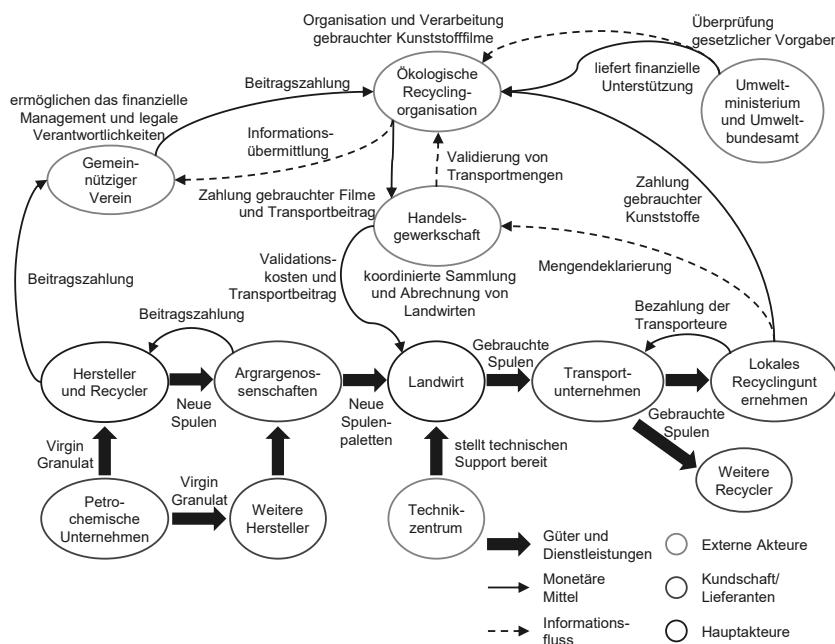


Abbildung 3-15: Ökosystemvisualisierung des Kreislaufs von Kunststofffolien für die industrielle Landwirtschaft (BOLDRINI U. ANTHEAUME 2021, S. 7)

Als Schlussfolgerung kann festgehalten werden, dass eine übergreifende Geschäftsmodellentwicklung relevant ist, um neben den unternehmensspezifischen Aktivitäten das gemeinsame Wertversprechen berücksichtigen zu können (s. BOLDRINI U. ANTHEAUME 2021, S. 11). Zudem kann die Geschäftsmodellentwicklung aufgrund der dynamischen Eigenschaften von Ökosystemen nicht als Ergebnis, sondern als Prozess angesehen werden, den es kontinuierlich zu verbessern gilt (s. BOLDRINI U. ANTHEAUME 2021, S. 11).

Supply chain management for circular economy: conceptual framework and research agenda | HAZEN ET AL. 2021

Die Autoren HAZEN ET AL. untersuchen in diesem Artikel den Einfluss der Kreislaufwirtschaft auf das Supply-Chain-Management und zielen darauf ab, einen konzeptionellen Rahmen und eine Forschungsagenda zu entwickeln (s. HAZEN ET AL. 2021, S. 511). Methodisch greifen die Autoren dazu auf eine systematische Literaturrecherche und sachlogische Herleitung zurück (s. HAZEN ET AL. 2021, S. 512ff.). Als Ausgangsbasis haben HAZEN ET AL. fünf Grundprinzipien der Kreislaufwirtschaft identifiziert: das *Schließen des Kreislaufs*, das *Verlangsamen des Kreislaufs*, das *Intensivieren des Kreislaufs*, das *Verjüngen des Kreislaufs* und das *Dematerialisieren des Kreislaufs* (s. HAZEN ET AL. 2021, S. 513). Demgegenüber werden die acht Kernprozesse des Supply-Chain-Managements gelegt, um den Einfluss der Grundprinzipien der

Kreislaufwirtschaft auf das Supply-Chain-Management bewerten zu können (s. HAZEN ET AL. 2021, S. 515ff.). Die vollständige Gegenüberstellung ist in Abbildung 3-16 dargestellt.

Supply-Chain-Prozess	Beeinflusste Grundprinzipien der Kreislaufwirtschaft	Aktivitäten
Customer Relationship Management	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schließen des Kreislaufs ▪ Verlangsamen des Kreislaufs ▪ Verjüngen des Kreislaufs 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überarbeitung der Unternehmensstrategie zur Marktdifferenzierung ▪ Gemeinsame Wertschöpfung mit der Kundschaft durch die R-Strategien ▪ Informieren der Kundschaft über ihre Rolle in der Kreislaufwirtschaft ▪ Befähigung der Kundschaft, sich aktiv an der Kreislaufwirtschaft zu beteiligen.
Lieferantenmanagement	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verlangsamen des Kreislaufs ▪ Intensivieren des Kreislaufs 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adaptieren des Lieferantenauswahlprozesses vor dem Hintergrund zirkulärer Kriterien ▪ Anreizsysteme für Lieferanten zur Verbesserung der Ökoeffizienz ▪ Verstärkter Einsatz von Gebrauchtmaterial zur Reduktion der Rohstoffvolatilität und Anfälligkeit für operative Risiken
Customer-Service-Management	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schließen des Kreislaufs ▪ Intensivieren des Kreislaufs ▪ Dematerialisieren des Kreislaufs 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Servitisierung von Gebrauchsgütern zur Verlängerung des Lebenszyklus ▪ Verbessern des Nutzungsgrads durch neue Geschäftsmodelle wie Vermietung und Leasing ▪ Einbeziehen der Käufer in die Supply-Chain-Strategie
Bedarfsmanagement	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verlangsamen des Kreislaufs ▪ Verjüngen des Kreislaufs ▪ Dematerialisieren des Kreislaufs 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abfallreduktion durch Koordination von Angebot und Nachfrage ▪ Inkludieren der Wiederverwendung in die Bestandsverwaltung und Planungsmodelle ▪ Ausweiten des Nachfragemanagements auf die Supply-Chain-Ebene
Auftragserfüllung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Intensivieren des Kreislaufs ▪ Verjüngen des Kreislaufs 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adaption innovativer Transportmittel für die letzte Meile ▪ Einsatz von CO₂-neutralen Praktiken in Lagerung, Vertrieb und Transport
Materialfluss	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schließen des Kreislaufs ▪ Intensivieren des Kreislaufs ▪ Verjüngen des Kreislaufs 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Übergang von der Ressourceneinsparung zur Wiederverwendung ▪ Schaffen eines übergreifenden Kennzahlensystems, um wirtschaftliche und ökologische Werten in Einklang zu bringen
Produktentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schließen des Kreislaufs ▪ Verlangsamen des Kreislaufs ▪ Dematerialisieren des Kreislaufs 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modularisieren von Produkten zur Werterhaltung ▪ <i>Design-to-X</i> zur Entwicklung von langlebigen Produkten ▪ Stärken der Zusammenarbeit interdisziplinärer wissenschaftlicher Bereiche
Retourenmanagement	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schließen des Kreislaufs ▪ Intensivieren des Kreislaufs ▪ Dematerialisieren des Kreislaufs 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Umgestalten linearer Lieferkettenstrukturen zu geschlossenen Kreislaufsystemen ▪ Verbesserung der Sichtbarkeit, des Vertrauens und der Kollaboration zwischen den Teilnehmenden der Supply-Chain ▪ Einleitung von Maßnahmen zur Rückgewinnung von Ressourcen.

Abbildung 3-16: Einflüsse der Kreislaufwirtschaft auf das Supply-Chain-Management (eigene Darstellung i. A. a. HAZEN ET AL. 2021, S. 517ff.)

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass die Prozesse des Supply-Chain-Managements in erheblichem Maße dazu beitragen können, eine Kreislaufwirtschaft von Investitions- und Gebrauchsgütern zu realisieren. Ferner ist das Bewusstsein für die Kreislaufwirtschaft in der Praxis des Supply-Chain-Managements bislang nicht ausreichend ausgebildet und erfordert weitere Aufklärung (s. HAZEN ET AL. 2021, S. 530).

From circular business models to circular business ecosystems | KANDA ET AL. 2021

KANDA ET AL. adressieren in ihrer Veröffentlichung die identifizierte Forschungslücke, dass firmenspezifische Geschäftsmodellwerkzeuge nicht ausreichend auf die übergreifende Wertschöpfung in der Kreislaufwirtschaft eingehen und zirkuläre Ökosysteme bisher nicht aus betriebswirtschaftlicher Sicht untersucht worden sind (s. KANDA

ET AL. 2021, S. 2815). Dazu nutzen sie Fallstudien aus der Biogasproduktion, die in den biologischen Kreislauf nach der ELLEN MACARTHUR FOUNDATION eingeordnet werden (vgl. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2015). Daraus leiten die Autoren Handlungsempfehlungen für die übergreifende Nutzung ab (s. KANDA ET AL. 2021, S. 2815f.). Die Autorenschaft hat vier Wertschöpfungskategorien, (1) der Aufschlusstechnologie für Substrate, (2) der Aufbereitungstechnologie für Rohbiogas, (3) des Prozesswissens für Biogas und (4) der Systemanbieter für Biogasproduktion, -distribution und -nutzung, identifiziert (s. KANDA ET AL. 2021, S. 2819). Daraus wurde eine Geschäftsübersicht der involvierten Organisationen entwickelt, die in Abbildung 3-17 dargestellt ist (s. KANDA ET AL. 2021, S. 2823).

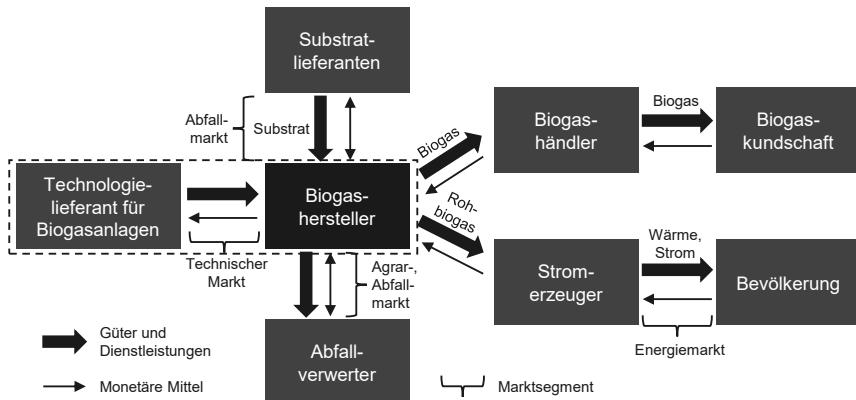


Abbildung 3-17: Übersicht der wirtschaftlichen Zusammenhänge im zirkulären Ökosystem der Biogasherstellung, -vertrieb und -nutzung (KANDA ET AL. 2021, S. 2823)

Die Übersicht aus Abbildung 3-17 umfasst das vollständige zirkuläre Ökosystem, wohingegen die Wertschöpfungskategorien nach KANDA ET AL. primär zwischen Technologie-lieferant und Biogashersteller stattfinden (hier im gestrichelten Rechteck) und aus Technologie-lieferanten für Vergärungsanlagen und Gasveredelungen, aus Prozessentwicklern und aus Systemlieferanten für den vollständigen Prozess bestehen (s. KANDA ET AL. 2021, S. 2819ff.). Es kann festgestellt werden, dass die Ökosystembe-trachtung des vollständigen Geschäftsbereichs von der Biogasherstellung bis zur Nutzung mit einer hohen Komplexität verbunden ist (s. KANDA ET AL. 2021, S. 2825). Je-doch lässt sich durch den Ökosystemansatz eine übergreifende Wertschöpfungsbe-trachtung erreichen, die zur Entwicklung der eigenen Geschäftsmodelle vorteilhaft ist (s. KANDA ET AL. 2021, S. 2826). Zudem wird die Beziehungsebene der Akteure her-ausgestellt, sodass die gegenseitigen Wechselbeziehungen verdeutlicht und zur Ko-ordinationsgestaltung des Geschäftsökosystems genutzt werden können (s. KANDA ET AL. 2021, S. 2826).

Circular ecosystem innovation: An initial set of principles | KONIETZKO ET AL. 2020

In diesem Artikel präsentieren die Autoren ein Set von Prinzipien, um Innovationen in zirkulären Ökosystemen zu fördern (s. KONIETZKO ET AL. 2020, S. 2). Dazu führen KONIETZKO ET AL. im ersten Schritt eine systematische Literaturrecherche durch und leiten mithilfe derer initiale Prinzipien ab, die im zweiten Schritt anhand einer Fallstudienanalyse auf ihre Relevanz überprüft werden (s. KONIETZKO ET AL. 2020, S. 2). KONIETZKO ET AL. identifizieren drei Hauptgruppen von Prinzipien für Innovation in zirkulären Ökosystemen: (1) Kollaboration, (2) Experimentation, (3) Plattformisierung (s. KONIETZKO ET AL. 2020, S. 2f.). Kollaboration beschreibt die Zusammenarbeit von Akteuren mit dem Ziel der zirkulären Innovation, Experimentation umfasst den strukturierten und zielorientierten Prozess zur Umsetzung von Kreislaufaktivitäten und Plattformisierung schließt das Organisieren der wirtschaftlichen und sozialen Aktivitäten über einen technologiegestützten Intermediär ein (s. KONIETZKO ET AL. 2020, S. 11).

Kollaboration	Experimentation	Plattformisierung
Definition eines Prozesses zur Partnerauswahl	Entwickeln eines zirkulären Wertversprechens	Schaffen einer modularen technologischen Architektur mit offenen Schnittstellen
Involvieren von neuen Akteuren aus verschiedenen Sektoren	Neue Begriffsdefinition von Ressourcen	Definieren der Plattformoffenheit
Etablieren von Vertrauen	Erstellen eines lokalen <i>Minimum Viable Ecosystem</i>	Spezifizieren von Kernressourcen und Steuerungsprozessen
Herstellen individueller Verpflichtungen und Akzeptanz	Entwerfen und testen von zirkulären Ökosystemgütern	Definieren von Preis- und Kontrollmechanismen der Plattform
Vereinen individueller und geteilter Interessen	Prüfen des <i>Minimum Viable Ecosystems</i> in einer lokalen Testumgebung	Regulieren und verwalten der Datenflüsse
Neudefinieren von Akteuren und Verantwortlichkeiten	Engagement der Kundschaft frühzeitig erreichen	
Entwickeln einer dezentralen und kollaborativen Governancestruktur		
Entwickeln einer gemeinsamen Strategie		
Sicherstellen einer fairen Wertschöpfung unter den Akteuren		

Abbildung 3-18: Übersicht der Prinzipien zur Förderung von Innovationen in zirkulären Ökosystemen nach KONIETZKO ET AL. (eigene Darstellung i. A. a. KONIETZKO ET AL. 2020, S. 11ff.)

In Abbildung 3-18 sind die 20 Prinzipien aufgeführt, die KONIETZKO ET AL. in drei Gruppen eingeordnet haben und die zur Entwicklung von Innovationen in zirkulären Ökosystemen erforderlich sind (s. KONIETZKO ET AL. 2020, S. 11ff.). Damit haben die Autoren eine Übersicht erschaffen, um Organisationen im Aufbau von zirkulären Ökosystemen zu unterstützen und den Ökosystemansatz für Innovationen anwenden zu können (s. KONIETZKO ET AL. 2020, S. 19). Darüber hinaus gilt es, die Prinzipien zu testen

und zu identifizieren, welche Erfolgsfaktoren für zirkuläre Ökosysteme aus den Prinzipien gewonnen werden können (s. KONIETZKO ET AL. 2020, S. 19).

Orchestrating industrial ecosystem in circular economy: A two-stage transformation model for large manufacturing companies | PARIDA ET AL. 2019

In ihrer Veröffentlichung konzentrieren sich PARIDA ET AL. auf die Transformation, die produzierende Unternehmen als Orchestratoren initiieren müssen, um ihre Wertschöpfung auf die Kreislaufwirtschaft auszurichten (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 716). Dazu wird mithilfe der Fallstudienforschung eine qualitative Studie mit sechs Produktionsunternehmen durchgeführt, die in ihren Ökosystemen als Orchestratoren fungieren (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 716). PARIDA ET AL. definieren Orchestratoren als ressourcenstarke Großunternehmen, die den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft einleiten und dadurch den größten Einfluss dieser Transformation in sich vereinen (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 717). PARIDA ET AL. haben mithilfe der Fallstudieninterviews zwei übergreifende Dimensionen identifiziert (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 719): das Ökosystem-Assessment und die Orchestrierungsmechanismen (s. Abbildung 3-19).

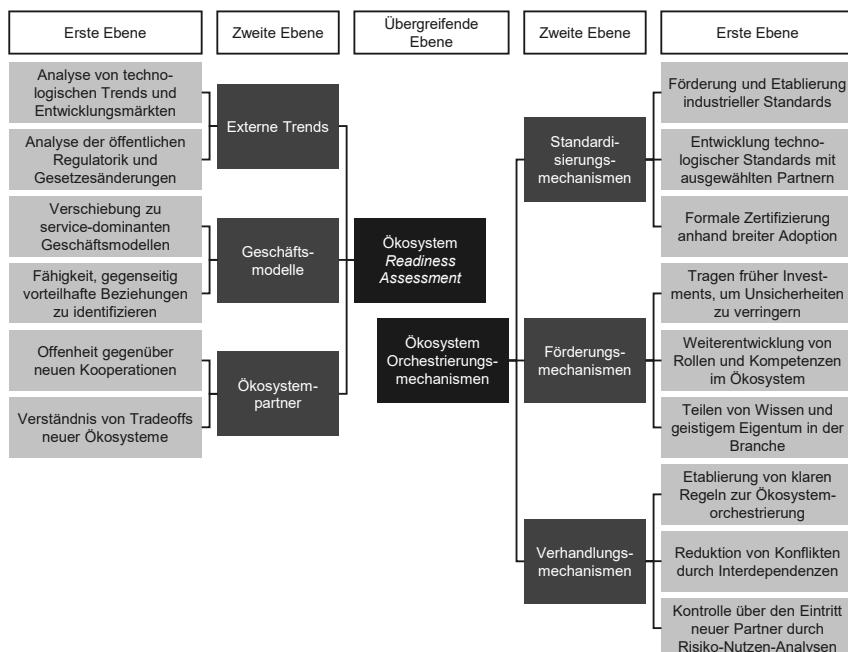


Abbildung 3-19: Übersicht der Ökosystem-Assessments und Mechanismen zur Orchestrierung zirkulärer Ökosysteme (PARIDA ET AL. 2019, S. 719)

Das Ökosystem-Assessment beschreibt den Startpunkt für Orchestratoren des zirkulären Ökosystems, um ein Verständnis für den Transformationsprozess zur Kreislaufwirtschaft zu entwickeln (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 719). Ziel ist es, auch den Akteuren

die Diskrepanz zwischen Status quo und dem Zielzustand aufzeigen zu können (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 719). Dazu haben die untersuchten Unternehmen der Fallstudien regelmäßig Bewertungen ihres Ökosystems durchgeführt, um ihre Geschäftssituation neu zu beurteilen (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 720). Kernbestandteile der Bewertung sind Trendanalysen, Geschäftsmodellevaluationen und Bewertungen der Ökosystempartner (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 719f.).

Die zweite Dimension umfasst geeignete Orchestrationsmechanismen, um eine nachhaltige Transformation eintreten zu lassen (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 720). PARIDA ET AL. haben drei Kategorien identifiziert (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 719ff.): Standardisierungs-, Förderungs- und Verhandlungsmechanismen (s. Abbildung 3-19). Während formelle Standards langfristige Prozesse und die Akzeptanz aller Ökosystempartner erfordern, besteht für Orchestratoren die Möglichkeit, informelle Standards im eigenen Ökosystem zu prägen, die zwar industrieweit akzeptiert werden, jedoch nicht legal bindend sind (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 720). PARIDA ET AL. kommen zu dem Schluss, dass die Standardisierung sich im Allgemeinen als essenziell für die Förderung der Kreislaufwirtschaft erwiesen hat (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 721). Die Förderung und Pflege von Ökosystemen bilden eine wesentliche Aufgabe, der die Orchestratoren von Ökosystemen nachkommen müssen, um die Langlebigkeit des Ökosystems durch Innovation zu gewährleisten (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 721). Dies gilt im selben Maße für bestehende Ökosysteme in der Transformation zur Kreislaufwirtschaft. Die Transformation ist oftmals mit hohen Investitionskosten verbunden und stellt somit ein Problem für kleinere Unternehmen mit weniger Mitteln dar (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 721). Über finanzielle Unterstützungsleistungen können Orchestratoren die Investitionskosten kleinerer Ökosystempartner verringern und damit Anreize setzen, sich aktiv an der Transformation zu beteiligen (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 721). Zudem ist der Austausch von Wissen ein Förderungsmechanismus innerhalb von Ökosystemen (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 721). Dadurch werden komplementäre Innovationen gefördert und neue Partnerschaften im Ökosystem aufgebaut (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 721). PARIDA ET AL. definieren die Verhandlungsaktivitäten als dritten Mechanismus, der zur Orchestrierung von Ökosystemen genutzt werden kann (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 721). Aufgrund der oft komplexen Struktur eines Ökosystems wird das Verhandeln zu einer wichtigen Aufgabe des Ökosystem-Orchestrators (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 721). Die Autoren haben in ihren Fallstudien beobachtet, dass die Orchestratoren Verhandlungen nutzen, um die Interessen der Kernakteure zu vertreten und Regeln nach dem Geben-und-Nehmen-Prinzip aufzuziehen (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 721). Als Konfliktvermeidungsmechanismus werden dazu wechselseitige Abhängigkeiten zwischen ausgewählten Akteuren geschaffen, sodass die Wahrscheinlichkeit existenzieller Konflikte reduziert wird (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 721). Des Weiteren besteht eine Verhandlungsaktivität des Orchestrators in der Überprüfung neuer Ökosystemakteure (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 721). Insbesondere für die Skalierung von zirkulären Ökosystemen sind neue Akteure unvermeidlich und füllen Kompetenz- und Fähigkeitsdefizite (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 721f.). Nach den Autoren gilt die Risiko- und Nutzenanalyse

als geeignetes Werkzeug, um neue Ökosystempartner entsprechend zu bewerten (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 722).

PARIDA ET AL. leisten mit ihrem Artikel mehrere Beiträge zur Wissenschaft: Zum einen legen sie dar, dass die Rolle des Orchestrators als leitende Organisation die höchste Relevanz besitzt, um die Kreislaufwirtschaft nachhaltig in einem Ökosystem umzusetzen (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 723). Zum zweiten präsentieren sie eine Methode zur Bewertung der Transformationsbereitschaft des Ökosystems, die bisher in der wissenschaftlichen Literatur kaum Erwähnung fand und aufgrund des Transformationsumfangs als sehr relevant anzusehen ist (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 723). Zum dritten heben PARIDA ET AL. hervor, dass die Orchestrationsmechanismen an unterschiedliche Akteure adressiert sind und Orchestratoren diese auch gezielt einsetzen sollten (s. PARIDA ET AL. 2019, S. 723).

Circular Ecosystems: Business Model Innovation for the Circular Economy | TAKACS ET AL. 2020

In ihrem Whitepaper des Instituts für Management und Strategie der Universität St. Gallen entwickeln die Autoren einen Ordnungsrahmen zur Unterstützung von Unternehmen in ihrem Bestreben nach zirkulären Geschäftsmodellen (s. TAKACS ET AL. 2020, S. 2). Dazu haben TAKACS ET AL. ihre Erkenntnisse mithilfe einer ausführlichen Literaturrecherche und in Interviews mit Unternehmensvertretenden erarbeitet (s. TAKACS ET AL. 2020, S. 1). Der entwickelte Ordnungsrahmen besteht aus sieben Schritten bis zur zirkulären Geschäftsmodellinnovation (s. TAKACS ET AL. 2020, S. 2): (1) Impuls, (2) Identifizieren, (3) Ideen entwickeln, (4) Integrieren, (5) Vordenken, (6) Zusammenschließen, (7) Umsetzen.

Nach TAKACS ET AL. wird zu Beginn der Impuls benötigt, um das eigene Vorgehen zu hinterfragen und aus dem Megatrend der Nachhaltigkeit eine Notwendigkeit zu erschaffen (s. TAKACS ET AL. 2020, S. 4). Darin unterstützen die Faktoren des veränderten Kundenverhalten, die Abhängigkeit von Ressourcen, der Wettbewerbsvorteil zirkulärer Produkte sowie die Motivation der Mitarbeiter für nachhaltige Themen (s. TAKACS ET AL. 2020, S. 4f.). Im zweiten Schritt wird zunächst in einer Unternehmensanalyse der Status quo der sozialen und ökologischen Auswirkungen des aktuellen Geschäftsmodells identifiziert (s. TAKACS ET AL. 2020, S. 5). Mithilfe der Triple-Bottom-Line und des St. Galler Geschäftsmodellnavigators lassen sich beispielsweise die Auswirkungen auf den Planeten Erde, die Menschen und den unternehmenseigenen Gewinn analysieren (s. TAKACS ET AL. 2020, S. 5f.). Im darauffolgenden Schritt werden nach TAKACS ET AL. Ideen entwickelt, die ein neues, zirkuläres Wertversprechen im Geschäftsökosystem anbieten und damit nachhaltige Innovation fördern (s. TAKACS ET AL. 2020, S. 6). TAKACS ET AL. haben dazu 38 zirkuläre Geschäftsmodellmuster identifiziert, die in Abbildung 3-20 dargestellt sind (s. TAKACS ET AL. 2020, S. 7).

Schließen des Kreislaufs	Verbessern des Kreislaufs	Monetarisieren des Kreislaufs	Motivieren des Kreislaufs
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produktwieder-verwendung ▪ Teilewieder-verwendung ▪ Re- & Upcycling ▪ Intelligente Montage & Modularisierung ▪ Biologisch abbaubare Materialien ▪ Abfall als Eingangs-stoff ▪ Reverse-Logistics 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verlängerte Lebens-dauer ▪ Reparatur & Instand-haltung ▪ Intelligente Güter ▪ Öko-Effizienz ▪ Dematerialisierung ▪ Ökologische Materi-alien & Beschaffung ▪ Erhöhte Funktionalität ▪ Lokalisierung ▪ Produktion auf Nachfrage ▪ Reduktion toxischer Stoffe ▪ Energierück-gewinnung ▪ Erneuerbare Energie 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pay-per-Use ▪ Mieten statt Kaufen ▪ Leistungsbasierte Verträge ▪ Subskription ▪ Geteilte Eigentümer-schaft ▪ Dynamische Preise ▪ Verteilen von Umsätzen ▪ Crowdfunding ▪ Rücknahme 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Servitisierung ▪ Individualisierte Massenfertigung ▪ Zirkulärer Luxus ▪ Erfahrungsbasierter Vertrieb ▪ Marktplätze ▪ Co-Creation nach-haltiger Produkte (Prosumer) ▪ Ökologischer Lock-in ▪ Kommunizieren der eigenen Verantwor-tlichkeit ▪ Teilen ▪ Variation der Preise für Besserverdienende (Robin Hood)

Abbildung 3-20: 38 Muster der Kreislaufwirtschaft nach TAKACS ET AL. (TAKACS ET AL. 2020, S. 7)

Im vierten Schritt werden aus den Ideen konkrete zirkuläre Ökosysteme entworfen mit dem Ziel, neben der eigenen Wertschöpfung auch die Beziehungen zu Ökosystem-partnern zu beschreiben (s. TAKACS ET AL. 2020, S. 8). Im darauffolgenden Schritt wird im Ökosystem eine transparente Vision formuliert und öffentlichkeitswirksam veröffentlicht, um die notwendige Aufmerksamkeit zu erreichen (s. TAKACS ET AL. 2020, S. 9). Im vorletzten Schritt sehen die Autoren die Notwendigkeit zum Zusammenschließen von geeigneten Partnern im Ökosystem (s. TAKACS ET AL. 2020, S. 10). Eine hohe Relevanz kommt dabei der Auswahl des Orchestrators zu, der als koordinierendes Element maßgeblich über den nachhaltigen Erfolg des Ökosystems entscheidet (s. TAKACS ET AL. 2020, S. 10). Im abschließenden Schritt legen TAKACS ET AL. den Fokus auf die unternehmensinterne Umsetzung (s. TAKACS ET AL. 2020, S. 10). Hier gilt es zu berücksichtigen, dass das eigene Geschäftsmodell des Unternehmens an das Ökosystem angepasst werden muss, um in der Umsetzungsphase erfolgreich zu sein (s. TAKACS ET AL. 2020, S. 10).

Unlocking the circular ecosystem concept: Evolution, current research, and future directions | TREVISAN ET AL. 2022

TREVISAN ET AL. untersuchen in ihrem Artikel die Definition und Charakteristika von zirkulären Ökosystemen (s. TREVISAN ET AL. 2022, S. 287). Dazu fokussiert die Autorenschaft als Abgrenzung zur vorhandenen Literatur explizit diejenigen Eigenschaften, die die Kreislauffähigkeit des Ökosystems bestimmen (s. TREVISAN ET AL. 2022, S. 287). Die Datenbasis beinhaltet eine systematische Literaturrecherche in den Themenfeldern *Business Ecosystems* und Kreislaufwirtschaft, die in Summe auf 24 identifizierten Artikeln beruht (s. TREVISAN ET AL. 2022, S. 287f.). Aus dieser Literaturrecherche haben TREVISAN ET AL. versucht, eine umfassende Definition für zirkuläre Ökosysteme

abzuleiten (s. TREVISAN ET AL. 2022, S. 292): „*A system of interdependent and heterogeneous actors that go beyond industrial boundaries and direct the collective efforts towards a circular value proposition, providing opportunities for economic and environmental sustainability*“ (TREVISAN ET AL. 2022, S. 292). Darüber hinaus wurden fünf charakteristischen Elemente zirkulärer Ökosysteme aus der Literatur abgeleitet (s. TREVISAN ET AL. 2022, S. 293): (1) Wert, (2) Akteure, (3) Daten- und Materialienfluss, (4) Zirkuläre Strategien und Aktivitäten sowie (5) Governance (s. Abbildung 3-21).

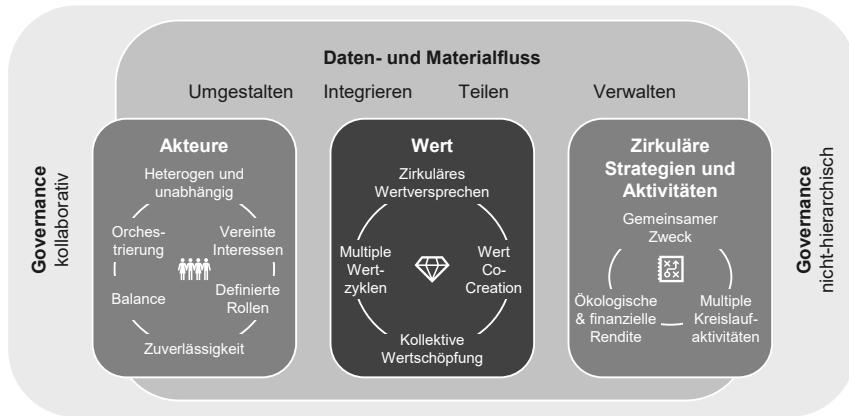


Abbildung 3-21: Konzeptioneller Ordnungsrahmen eines zirkulären Ökosystems nach TREVISAN ET AL. (TREVISAN ET AL. 2022, S. 293)

Unter „Wert“ verstehen TREVISAN ET AL. das Wertversprechen, die Wertzyklen und die Co-Creation einer Kreislaufwirtschaft im Ökosystem (s. TREVISAN ET AL. 2022, S. 293). Die Autorenschaft definiert den „Wert“ als das wesentliche Element des Ordnungsrahmens (s. TREVISAN ET AL. 2022, S. 293). Das Element der Akteure bildet demgegenüber die Verbindung zur Entwicklung und Kommerzialisierung der Innovation; es besteht aus Rollen, die die Akteure einnehmen, um damit spezifische Fähigkeiten einzubringen (s. TREVISAN ET AL. 2022, S. 293f.). Der Daten- und Materialfluss übt neben Austauschformen wie monetären Mitteln und immateriellen Vermögenswerten einen zentralen Einfluss auf das zirkuläre Ökosystem aus und wird daher von TREVISAN ET AL. als übergreifende Eigenschaft dargestellt (s. Abbildung 3-22; s. TREVISAN ET AL. 2022, S. 294). Über das Element der zirkulären Strategien und Aktivitäten beabsichtigt die Autorenschaft das Akzentuieren des Wertversprechens und der dazugehörigen Aktivitäten, die von den Ökosystemakteuren zu absolvieren sind, um tatsächlich zirkulär und nachhaltig zu wirtschaften (s. TREVISAN ET AL. 2022, S. 294). Die Governance beschreibt als umfassendes Element die Koordination und die Wertverteilung zwischen den Akteuren, die einheitlichen Regeln zu folgen hat und nach TREVISAN ET AL. möglichst horizontalen Hierarchien folgt (s. TREVISAN ET AL. 2022, S. 294).

3.2.3 Informationsmodellierung für die Kreislaufwirtschaft

Innerhalb dieses Unterabschnitts wird sich dem Themenbereich der Informationsmodellierung gewidmet, der im Kontext des digitalen Produktpasses eine hohe Relevanz besitzt. Dazu wird der aktuelle Stand der Forschung und Praxis analysiert und ausgewählte Modelle näher betrachtet. Aufgrund der sehr praxisnahen Ausrichtung dieses Dissertationsvorhabens wird ein Fokus auf den aktuellen Stand der industriellen Entwicklungen gelegt. Dazu wird insbesondere auf die Erfahrung und Kompetenz des Verfassers dieser Arbeit zurückgegriffen, die aktuellen Entwicklungsfelder der Praxis benennen zu können. Im Rahmen dieses Unterabschnitts werden dazu die folgenden Konzepte beschrieben:

- *Product Circularity Data Sheet (PCDS)*
- Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0)
- *Asset Administration Shell (AAS)*
- digitaler Batteriepass
- digitaler Produktpass
- digitaler Materialpass

Product Circularity Data Sheet (PCDS)

Das *Product Circularity Data Sheet (PCDS)* entstand aus einer Initiative des luxemburgischen Wirtschaftsministeriums, das damit eine Dokumentenvorlage für zirkuläre Produktaspekte entwickelt hat (s. EUROPEAN UNION o. J.). Die Entwickler berücksichtigen unter anderem bestehende Datenprotokolle, um eine nahtlose Integration zu ermöglichen (s. EUROPEAN UNION o. J.). Die Initiative diente dazu, einen Standard für den zuverlässigen Datenaustausch von relevanten Informationen für die Kreislaufwirtschaft zu schaffen, Bewusstsein zu erregen, aber auch ein datenbasiertes Audit-system zu etablieren (s. EUROPEAN UNION o. J.; s. MINISTRY OF THE ECONOMY OF LUXEMBOURG o. J.).

Der PCDS basiert dazu auf einem dreigeteilten System aus einer standardisierten Dokumentenvorlage, einem unabhängigen Verifizierungsprozess und einem standardisierten Datenprotokoll zur IT-Integration (s. MINISTRY OF THE ECONOMY OF LUXEMBOURG o. J.). In der Anwendung ist das PCDS darauf ausgelegt, vom Hersteller in seinen Produktionsschritten angewendet und erweitert zu werden (s. MULHALL ET AL. 2022, S. 10). Die Zulieferer und Lieferanten des Produzenten liefern dazu individuelle PCDS, die vom Endproduzenten angepasst und den weiteren Akteuren im Produktlebenszyklus zur Verfügung gestellt werden (s. MULHALL ET AL. 2022, S. 10). Der Datenaustausch kann in Abbildung 3-22 nachverfolgt werden.

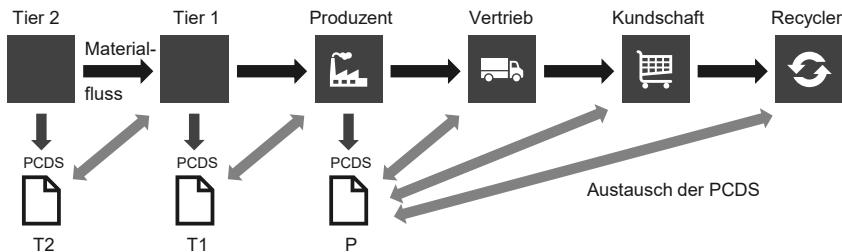


Abbildung 3-22: Datenaustausch über das PCDS (MULHALL ET AL. 2022, S. 10)

Der Inhalt des PCDS besteht aus fünf Sektionen, die sich auf unterschiedliche Designelemente aufteilen: Produkt- und Unternehmensidentifikation, Informationen zu Produktkomponenten, Design zur effizienten Nutzung, Design zur Demontage sowie Design zur Wiederverwertung (s. MINISTRY OF THE ECONOMY OF LUXEMBOURG 2020, S. 1). In der ersten Sektion der Identifikationsdaten sind Informationen zu Hersteller, Herstellungsdatum und eindeutige Identifikationsnummern enthalten (s. MINISTRY OF THE ECONOMY OF LUXEMBOURG 2020, S. 2). Die Informationen zu Produktkomponenten umfassen chemische Datensätze, Aussagen zu Gefahrstoffen sowie Recyclingangaben des Produkts (s. MINISTRY OF THE ECONOMY OF LUXEMBOURG 2020, S. 3f.). Die letzten drei Sektionen beinhalten allgemeine Fragen zur Reparierbarkeit und Wiederverwendbarkeit (s. MINISTRY OF THE ECONOMY OF LUXEMBOURG 2020, S. 5f.).

Zusammengefasst ergänzt der PCDS als standardisiertes Dokument die Informationsverfügbarkeit über den Lebenszyklus hinweg. Allerdings zeigt die Ausgestaltung noch einige Defizite auf, die im Rahmen dieser Dissertationsschrift betrachtet werden. Der Aufbau des PCDS ist bisher sehr statisch und wird über Fragen und codierte Antworten umgesetzt, sodass eine kontinuierliche Aktualisierung im Lebenszyklus infrage gestellt werden kann. Zudem beinhalten die Fragen sehr allgemeine Aussagen zur Wiederverwendung und Demontage, deren Detailgrad es weiter zu erhöhen gilt.

Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0)

Die Referenzarchitektur entstand aus konzeptionellen Entwicklungen im Rahmen der Datenstrukturierung im Anwendungsfeld der Industrie 4.0 (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 22). Ziel des Konzepts war es, Daten eines Produktionsgegenstands systematisch zu verwalten und Regeln zur datentechnischen Beschreibung entlang des Produktlebenszyklus in einer virtuellen Repräsentation zu etablieren (s. DIN SPEC 91345, S. 5). Das Konzept umfasst dabei alle relevanten Aspekte eines Produkts von seiner Fertigung bis zur Entsorgung und betrachtet diese über verschiedene Stakeholder im Lebenszyklus (s. DIN SPEC 91345, S. 5).

Der Aufbau des RAMI 4.0 umfasst drei Achsen zur Architektur, zum Verlauf und zur Hierarchie eines technischen Produkts (s. DIN SPEC 91345, S. 19). Die Architektur-Achse beinhaltet sechs Schichten, die zur Beschreibung der relevanten Produktinformationen dient (s. DIN SPEC 91345, S. 19). Die Verlaufsachse beschreibt den

Produktlebenszyklus in Anlehnung an die Norm IEC 62890 und wird als *Life Cycle & Value Stream* bezeichnet (s. DIN SPEC 91345, S. 19). Die Hierarchie-Achse weist funktionale Modelle in Anlehnung an die Normen DIN EN 62264-1 und DIN EN 61512-1 zu, um damit die Granularität zur virtuellen Produktrepräsentation spezifizieren zu können (s. DIN SPEC 91345, S. 19). Eine Übersicht der drei Achsen ist in Abbildung 3-23 zusammengefasst:

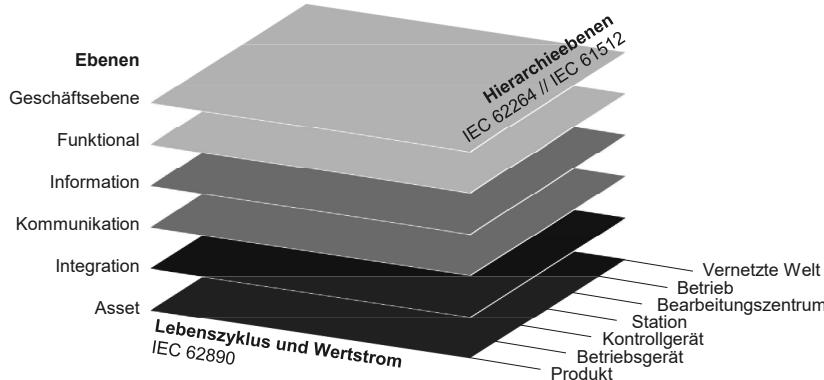


Abbildung 3-23: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0) (DIN SPEC 91345, S. 19)

Mithilfe der drei Achsen wird das Ziel verfolgt, „*eine hinreichend genaue Beschreibung eines Assets*“ zu erreichen (s. DIN SPEC 91345, S. 19). Im Rahmen dieser Dissertationsschrift bildet das RAMI4.0 eine Architektur, auf der das Informationsmodell aufbauen kann. Im Gegensatz zur Zielsetzung dieser Dissertationsschrift bildet das Rahmenwerk einen Standard zum Teilen und Beschreiben von relevanten Daten, wohingegen das Dissertationsvorhaben auf den Inhalt des Rahmenwerks für den Maschinen- und Anlagenbau abzielt.

Asset Administration Shell (AAS)

Das *Asset Administration Shell* baut auf dem Konzept der digitalen Verwaltungsschale auf und ist eine Weiterentwicklung mit Fokus auf der Industrie 4.0 (s. BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWI) 2021, S. 14; s. ADISORN ET AL. 2021, S. 7). Das AAS integriert dazu jegliche Gegenstände (engl. *Assets*), die im Kontext der Industrie 4.0 vernetzt sind und stellt eine Verbindung zwischen physischer und digitaler Welt her (s. PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 2019, S. 7; s. ADISORN ET AL. 2021, S. 7). Darunter fallen beispielsweise Maschinen und Komponenten, Zuliefermaterial und austauschbare Unterlagen wie Pläne, Verträge oder Bestellungen (s. PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 2019, S. 7). Damit versteht sich das AAS als Realisierung eines digitalen Zwillinges in der Industrie (s. PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 2019, S. 8). Ein elementarer Bestandteil des AAS beinhaltet die Standardisierung relevanter Schnittstellen, sodass jegliche Komponenten von der Schraube bis zur komplexen Maschine realisiert werden können (s. PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 2019, S. 5–12). Der Realisierungsgrad

divergiert somit zwischen statischen Informationsquellen wie HTML-Dateien bis zu vernetzten IT-Lösungen auf einer Cloud-Infrastruktur (s. PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 2019, S. 12). Das AAS wird als Open-Source-Paket veröffentlicht und kontinuierlich weiterentwickelt, um dem Funktionsumfang der Industrie 4.0 gerecht zu werden (s. PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 o. J., S. 2). Informationstechnologisch wird dazu auf die Basis des RAMI4.0 zurückgegriffen (s. PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 2019, S. 21). Auch wenn die digitale Verwaltungsschale darauf abzielt, den gesamten Lebenszyklus von Produkten und Maschinen abzudecken, wurden bisher vorwiegend Anwendungsfälle zwischen Lieferanten, Herstellern und industriellen Nutzern umgesetzt (s. PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 2019, S. 10; s. ADISORN ET AL. 2021, S. 8).

In seiner umfänglichen Betrachtung relevanter Aspekte einer digitalen Verwaltungsschale zum Erschaffen einer Informationsverfügbarkeit von Assets über den unternehmensspezifischen Verfügungsraum hinaus, fließt das AAS als architektonische Grundlage in diese Dissertationsschrift ein. Hinsichtlich seiner fachlichen Ausrichtung untersucht das AAS Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie 4.0, wodurch fachliche Komponenten der Kreislaufwirtschaft keine Anwendung finden. Vor dieser Hinsicht bildet das Informationsmodell dieser Dissertationsschrift einen fachspezifischen Beitrag aus dem Themenfeld der Kreislaufwirtschaft.

Digitaler Batteriepass

Der digitale Batteriepass (engl. *Battery Passport*) erhält durch seine Platzierung im *Circular Economy Action Plan* der Europäischen Kommission eine Pionierrolle im europäischen Kontext (s. EUROPEAN COMMISSION 2020b). Ab dem Jahr 2026 fordert die Europäische Kommission für neue Industrie- und Fahrzeugbatterien einen individuellen Batteriepass, der elementare Daten speichert und zugreifbar macht (s. EUROPÄISCHE KOMMISSION 2020, S. 21). Darin bildet der Batteriepass eine digitale Maßnahme, um sicher Daten zu teilen, die Datentransparenz des Batteriemarktes und der Nachverfolgbarkeit zu erhöhen sowie die Ausgangsbasis für darauf aufbauende Services zu bilden (s. EUROPEAN COMMISSION 2020b).

Allerdings ist die Entwicklung des digitalen Batteriepasses bisher nicht über einen Konzeptstatus fortgeschritten, in dem der fachlich-inhaltliche und anwendungsorientierte Umfang diskutiert wird (s. BERGER ET AL. 2022, S. 1). BERGER ET AL. haben vor diesem Hintergrund den Inhalt eines digitalen Batteriepasses untersucht und ein Modell entwickelt, um die relevanten Datenpunkte abzudecken. Vier Hauptkategorien, *Batterie*, *Wertkettenakteure*, *Nachhaltigkeit* und *Diagnostik und Leistung*, bilden das inhaltliche Grundgerüst des 54 Datenpunkte umfassenden Modells (s. BERGER ET AL. 2022, S. 5). Darunter prägen sieben Datenebenen die inhaltliche Detailtiefe und geben die logische Struktur vor (s. BERGER ET AL. 2022, S. 5). Abbildung 3-24 illustriert die oberen drei Ebenen des Modells nach BERGER ET AL. (2022).

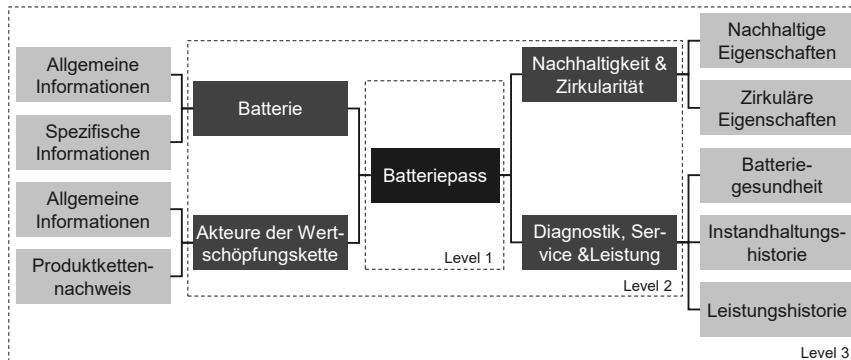


Abbildung 3-24: Fachlich-inhaltliches Konzept des digitalen Batteriepasses (BERGER ET AL. 2022, S. 5)

Der digitale Batteriepass befindet sich in einem frühen Entwicklungsstadium, sodass im Rahmen dieser Dissertationsschrift auf konzeptionelle Forschungsmodelle zurückgegriffen werden kann. Allerdings lassen die politische und wissenschaftliche Relevanz des Anwendungsfalls ein steigendes Entwicklungsinteresse erwarten, sodass weitergehende Praxiserkenntnisse in diese Arbeit einfließen können.

Digitaler Produktpass

Die Idee des digitalen Produktpasses als zentrales, produktspezifisches Informationsinstrument wird bereits seit einigen Jahren diskutiert und ist Teil der Diskussion um verschiedene Instrumente wie den digitalen Zwilling, den Materialpass oder die Lebenszyklusakte (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 9; s. PORTILLO-BARCO U. CHARNLEY 2015, S. 255). Auch wenn zwischen den Ansätzen eine inhaltliche Teilübereinstimmung besteht, zeichnet sich der digitale Produktpass durch seinen generalistischen Anspruch sowie eine übergreifende Ausrichtung auf alle relevanten Anspruchsgruppen des Produktlebenszyklus aus (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 19). GÖTZ ET AL. definieren den digitalen Produktpass als Instrument, das Produktinformationen zu Energieverbräuchen, Emissionen, Herstellung, Reparatur oder Handhabung am Ende des Lebenszyklus zur Verfügung stellt (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 19). Dazu werden alle Anspruchsgruppen bedient, um Unternehmen die Berichtspflichten zu erleichtern, der Kundschaft nachhaltige Konsumententscheidungen zu ermöglichen und Reparaturbetrieben notwendige Anleitungen zu liefern (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 19). Jedoch wird in der Wissenschaft der generalistische Ansatz aufgrund des hohen erforderlichen Grads an Datentransparenz und -offenheit kontrovers diskutiert (s. WALDEN ET AL. 2021, S. 1718).

ADISORN ET AL. stellen 2021 fest, dass der digitale Produktpass trotz einer regen wissenschaftlichen und politischen Debatte bislang nicht über eine Vor-Konzeptphase hinaus geht (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 8). Die wesentlichen Diskussionspunkte bilden dabei die Datenarchitektur, die inhaltliche Gestaltung, die Konfigurierbarkeit und die interorganisationale Zusammenarbeit. In der Konzeptionierung der Datenarchitektur stellt sich die Frage, ob der digitale Produktpass als interorganisationales Konstrukt

zentral oder dezentral verwaltet werden sollte und welche Zugriffs- und Speicherrechte gelten sollten (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 27; s. WALDEN ET AL. 2021, S. 1721f.). Zentralen Datenbanklösungen über einen europäischen Datenraum oder über die Produkthersteller stehen hohe Anfangsinvestitionen entgegen, wohingegen dezentrale Lösungen über einzelne Akteure des Produktlebenszyklus eine schnelle Realisierbarkeit versprechen, jedoch die Herausforderung gemeinsamer Schnittstellen und Standards überwinden müssen (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 27; s. WALDEN ET AL. 2021, S. 1723). Die inhaltliche Gestaltung des digitalen Produktpasses ist ebenso wenig spezifiziert. Allerdings stellen die Europäische Kommission im *Green Deal* und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz Anforderungen an den Inhalt des digitalen Produktpasses (s. EUROPEAN COMMISSION 2019, S. 8; s. BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) 2020, S. 18). Darin werden Informationen zur Herstellung, Nutzung, Reparatur und Lebenszyklusende gefordert (s. Abbildung 3-25).

Produktlebensphase	EU-Green-Deal	BMU-Digitalagenda
Herstellung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Herkunft ▪ Zusammensetzung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Soziale und ökologische Auswirkungen der Herstellung ▪ Enthaltene Materialien und Materialkombinationen
Nutzung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine direkte Angabe 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine direkte Angabe, generell Umweltigenschaften von Produkten und Dienstleistungen
Reparatur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reparatur- und Demontagemöglichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Daten zur Reparatur
Lebensende	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Handhabung am Lebensdauerende 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sachgerechte Entsorgung

Abbildung 3-25: Politische Informationsanforderungen an den digitalen Produktpass i. A. a. Götz et al. (2021) (eigene Darstellung i. A. a. GÖTZ ET AL. 2021, S. 28; EUROPEAN COMMISSION 2019, S. 8; BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) 2020, S. 18)

Die inhaltlichen Anforderungen bedingen eine entsprechende Konfigurierbarkeit des Produktpasses, um zukünftige Entwicklungen zu berücksichtigen und branchenspezifische Lösungen zuzulassen (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 29f.). Dies zeigt sich beispielsweise in den unterschiedlichen Informationsanforderungen einer digitalen Werkzeugmaschine zu einem Pflanzenschutzmittel. Die vernetzte Werkzeugmaschine liefert umfangreiche Nutzungsdaten und erfordert Reparatur- sowie Demontageinformationen. Diese sind für ein Pflanzenschutzmittel nicht relevant, jedoch ist die chemische Zusammensetzung elementar, um das Abfallmanagement zu verbessern (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 29). Vor diesem Hintergrund ist die Konfigurierbarkeit ein Kernbestandteil des digitalen Produktpasses, um branchen- und produktsspezifische Anforderungen zu berücksichtigen. Weiterhin bezieht sich die Konfigurierbarkeit auf die unternehmensübergreifende Zusammenarbeit und das Informationsangebot des digitalen Produktpasses an private sowie gewerbliche Nutzer (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 29f.). Die zugreifbaren Informationen unterscheiden sich zwischen privaten und gewerblichen Nutzern, um

bspw. Daten über die sozio-ökologischen Effekte der Herstellung oder Reparaturdaten freizugeben (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 30). Entsprechend dem Anwendungsfall ist zu prüfen, welche Informationen abrufbar sind, ohne geschützte Daten zu veröffentlichen oder das Verständnis der Leserinnen und Leser zu übersteigen. Für die Akteure des Lebenszyklus sind hier verschiedene Szenarien zu erarbeiten, sodass ein akzeptierter Grad zwischen Offenheit und Schutz gefunden wird. Dazu bildet der digitale Produktpass unter Berücksichtigung der aktuellen Gesetzeslage und der steigenden Verantwortung der Hersteller für ihre Lieferketten einen Bestandteil im Reporting relevanter Daten zur Gesetzeskonformität (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 29). Als zentraler und auf wirklichen Daten beruhende Lösung wird damit der Aufwand zur Abfrage von Emissionsdaten erheblich reduziert (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 30).

Unter Berücksichtigung der Problemstellung dieser Dissertationsschrift prägt der wissenschaftliche Diskurs um den digitalen Produktpass das Themenfeld dieser Arbeit. Der digitale Produktpass ist ein Initiator in der Erarbeitung detaillierter, branchenspezifischer Informationsmodelle für den Maschinen- und Anlagenbau und kann als übergreifendes Konstrukt dieser Arbeit angesehen werden. Allerdings können über den Produktpass noch keine Bausteine für das Dissertationsvorhaben abgeleitet und integriert werden, da in der Vor-Konzeptphase die erforderliche Detailtiefe bislang nicht erreicht wurde.

Der digitale Materialpass

Der digitale Materialpass basiert auf den Entwicklungen des *Building Information Modeling* (BIM) für Hochbauten (s. WALDEN ET AL. 2021, S. 1721). Über die Digitalisierung der Gebäudestruktur lässt sich ein individueller Materialpass generieren, der das Recyclingpotenzial aufzeigt und eine Umweltanalyse ermöglicht (s. WALDEN ET AL. 2021, S. 1721). Eine BIM enthält beispielsweise Informationen über die Geometrie, räumliche Zusammenhänge, Mengen und Eigenschaften von Bauelementen sowie Kostenrechnungen und Inventardaten (s. HONIC ET AL. 2019b, S. 343). Der Materialpass kompiliert damit die notwendigen Daten für eine Umsetzung der Kreislaufwirtschaft und des *Urban Mining* (s. HONIC ET AL. 2019a, S. 796). Der Materialpass ist eine Weiterentwicklung des Lifecycle-Assessments auf Basis des BIMs und erweitert dessen Anwendungsbereich um die Kreislaufwirtschaft und insbesondere das Recycling (s. HONIC ET AL. 2019b, S. 344f.). Aktuelle Entwicklungen befinden sich im Prozess der Standardisierung von Produktdaten im Hochbau, um eine harmonisierte Einbindung in den Materialpass zu erlauben (s. HONIC ET AL. 2019b, S. 344). HONIC ET AL. schlagen zur Realisierung des Materialpasses ein Schichtmodell vor, das in Abbildung 3-26 dargestellt ist (s. HONIC ET AL. 2019a, S. 789f.).

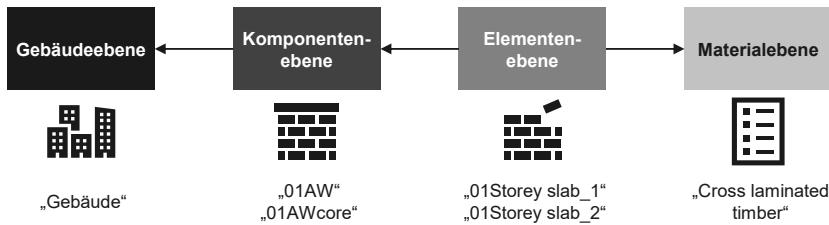


Abbildung 3-26: Schematische Darstellung des Materialpasses im Hochbau (HONIC ET AL. 2019a, S. 790)

Der Entwurf eines Materialpasses nach HONIC ET AL. teilt sich in die vier Ebenen des Gebäudelevels, des Komponentenlevels, des Elementenlevels und des Materiallevels auf (s. HONIC ET AL. 2019a, S. 789). Diese Einteilung dient dazu, sachlogisch die Beziehungen eines Hochbaus zu strukturieren, um die Komplexität zu reduzieren und die Anwendbarkeit zu erhöhen. Auf Basis dieser Logik haben HONIC ET AL. den Materialpass für einen österreichischen Gebäudekomplex erstellt und das Recyclingpotenzial ermittelt (s. HONIC ET AL. 2019a, S. 790f.). Im Vergleich einer Holz- oder Betonbauweise konnten die Autoren schon vor Konstruktion ermitteln, welche Variante eine höhere Recyclingfähigkeit (Beton 54 % zu Holz 34 %) aufweist (s. HONIC ET AL. 2019a, S. 795).

In Bezug auf die Konzeption von Informationsmodellen für Maschinen und Anlagen bildet der Materialpass einen branchenfremden Ansatz, der auf bereits bestehenden digitalen Modellen basiert. Der exklusive Fokus auf Gebäuden und Materialien umfasst ein abweichendes Themengebiet als in diesem Dissertationsvorhaben angestrebt und lässt das notwendige Ökosystem außer Acht, das für Betrieb und Recycling der Gebäude notwendig ist.

3.3 Ableitung des Forschungsbedarfs

Im vorherigen Unterkapitel wird der Stand der Forschung zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Dissertationsschrift vorgestellt. In den drei wesentlichen Themenbereichen dieses Dissertationsvorhabens (Kreislaufstrategien, zirkuläre Ökosysteme und Informationsmodellierung) werden die aktuellen Erkenntnisse jeweils anhand von systematischen Literaturrecherchen und der Erfahrung des Autors identifiziert und vorgestellt. Im Folgenden werden nun die Defizite des betrachteten Forschungsstands präsentiert, um eine Abgrenzung zum vorliegenden Dissertationsvorhaben sicherstellen zu können. Auf Basis dieser Reflexion wird die vorhandene Forschungslücke konkretisiert, die im Rahmen der Ausarbeitung dieser Dissertationsschrift adressiert wird und die Relevanz der Forschungsfragen aus Abschnitt 1.2 verdeutlicht.

Die strukturierte Untersuchung der vorgestellten Artikel erfordert die Einführung von Differenzierungskriterien zur Bewertung der Relevanz für diese Dissertationsschrift. Die Kriterien teilen sich in die Hauptkategorien der Anwendung und Modellentwicklung ein (s. Abbildung 3-27). In der Kategorie Anwendung werden die vorliegenden

Forschungsarbeiten anhand ihres Betrachtungsraums in den Rubriken *Fokus auf Investitionsgüter*, *Lebenszyklusumfassende Untersuchung*, *Anwendungsansätze der Kreislaufwirtschaft*, *Betrachtung von zirkulären Ökosystemen* und *Informationsmodellierung* bewertet. Die zweite Kategorie Modellentwicklung unterteilt sich in die zwei Themenbereiche *Modellierungszweck* und *Wissenschaftlicher Ansatz*. Der Modellierungszweck orientiert sich am methodischen Rahmen dieser Dissertationsschrift, so dass vorliegende Forschungsarbeiten anhand ihrer beschreibenden, erklärenden oder gestaltenden Absicht kategorisiert werden. Mithilfe des wissenschaftlichen Ansatzes wird die wissenschaftliche Methodik zum Erlangen des Erkenntnisgewinns der Beiträge in die Rubriken *sachlogisch* und *fallstudienbasiert* eingeordnet. Eine Übersicht und Bewertung der identifizierten und untersuchten Literatur ist in Abbildung 3-27 dargestellt. Daraus lassen sich die im Folgenden vorgestellten Forschungsbedarf identifizieren.

Im Rahmen der ersten Forschungsfrage zu relevanten Kreislaufstrategien im Maschinen- und Anlagenbau lässt sich erkennen, dass insbesondere Investitionsgüter bisher nicht ausreichend in der Literatur betrachtet werden. Während in einer Vielzahl der Literatur Anwendungsansätze für Kreislaufstrategien vorgestellt und diskutiert werden, sind diese nur in begrenztem Umfang anwendbar auf den Maschinen- und Anlagenbau. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, im Rahmen dieser Dissertationsschrift eine Eingrenzung des Themenbereichs auf die für Investitionsgüter im Maschinen- und Anlagenbau bedeutenden Kreislaufstrategien durchzuführen. Dadurch ist gewährleistet, dass produzierende Unternehmen ihre Ressourcen für erfolgversprechende Strategien aufwenden. Die zweite Forschungsfrage zu Rollen und Beziehungen in zirkulären Ökosystemen betrachtend, lässt sich feststellen, dass zirkuläre Ökosysteme in den vergangenen Jahren verstärkt im Fokus der Wissenschaft stehen. Allerdings lassen sich daraus bisher keine konkreten Rollenmodelle für zirkuläre Ökosysteme ableiten und eine Verknüpfung zum Informationsnetzwerk im Ökosystem wurde nicht identifiziert. Im Umfang dieser Dissertationsschrift werden daher die Rollen und Aktivitäten in zirkulären Ökosystemen von Investitionsgütern fokussiert betrachtet. Konträr dazu behandelt die dritte Forschungsfrage die inhaltlichen Bestandteile eines Produktinformationsmodells, das für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft erforderlich ist. Im Rahmen der Analyse wurden dazu praxisnahe Konzepte untersucht, die sich jedoch auf die Architektur von Informationssystemen konzentrieren. Diese sind auf Konzeptebene vorhanden (u. a. in Form der AAS), zeigen allerdings inhaltliche Defizite. Ebenso wurde der Themenfokus der Kreislaufwirtschaft nur untergeordnet betrachtet. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit, im Rahmen dieser Dissertationsschrift inhaltliche Komponenten zu identifizieren, die für einen nahtlosen Informationsaustausch in zirkulären Ökosystemen erforderlich sind. Grundsätzlich konnte im Rahmen der Literaturrecherche nicht identifiziert werden, dass bereits wissenschaftliche Erkenntnisse zu Informationsmodellen, die Produktinformationen im zirkulären Ökosystem austauschen, vorhanden wären.

Daher strebt der Autor in der vorliegenden Dissertationsschrift danach, die Forschungsfelder der Kreislaufwirtschaft, des Ökosystemansatzes und der

Informationsmodellierung zu vereinen und damit einen praktischen Nutzen in der industriellen Wirtschaft zu erzielen. Dazu wird eine Forschungsmethode aus einem beschreibenden und einem erklärenden Modell gewählt. Damit kann der ingenieurtechnischen Aufgabenstellung, namentlich der Abstraktion einer technischen Fragestellung in lösbare Teilsysteme, Rechnung getragen und die Ergebnisse über ein finales Modell in die Anwendung zurückgeführt werden.

	Betrachtungsraum	Anwendung		Modellentwicklung		Modellierungs- zweck	Beschreibungs- modell	Erklärungsmodell	Gestaltungsmodell	Wissenschaftlicher Ansatz	sachlogisch	fachdienstbasiert
		Fokus auf Investitionsgüter	Lebenszyklusumfass- ende Untersuchung	Anwendungsansatz der Kreislaufwirtschaft	Beobachtung von zir- kulären Ökosystemen							
Kreislaufstrategien im industriellen Kontext												
Achterberg et al. (2016)	●	●	●	○	○	●	○	○	○	○	○	○
Alamerew u. Brissaud (2019)	○	○	●	●	○	○	○	○	●	○	○	○
Blomsma et al. (2019)	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
Buchberger et al. (2019)	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
Klenk et al. (2020)	○	○	●	●	○	●	○	●	○	○	○	○
Kristoffersen et al. (2020)	○	○	●	●	○	○	○	●	○	○	○	○
Kronenberg et al. (2021)	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
Lieder et al. (2017)	●	○	●	●	○	○	○	●	○	○	○	○
Linton u. Jayaraman (2005)	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
O'Connor et al. (2016)	○	○	●	●	○	○	○	○	●	○	○	○
Potting et al. (2017)	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
Prieto-Sandoval et al. (2019)	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
Reike et al. (2018)	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
Schmidt et al. (2019)	●	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
Sihvonen u. Ritola (2015)	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
Vanegas et al. (2018)	●	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
Walker et al. (2018)	●	○	●	●	○	○	○	●	○	○	○	○
Wissenschaftliche Ansätze zirkulärer Ökosysteme												
Aarikka-Stenroos et al. (2021)	○	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○
Barquette et al. (2022)	○	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○
Boldrini u. Antheaume (2021)	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Hazen et al. (2021)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Kanda et al. (2021)	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Konietzko et al. (2020)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Parida et al. (2019)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Takacs et al. (2020)	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Trevisan et al. (2022)	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Informationsmodellierung für die Kreislaufwirtschaft												
PCDS	○	●	○	○	○	●	○	●	●	●	●	●
RAMI 4.0	●	○	○	○	○	○	○	●	●	●	●	●
AAS	●	●	○	○	○	○	○	●	●	●	●	●
digitaler Batteriepass	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
digitaler Produktpass	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
digitaler Materialpass	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Abbildung 3-27: Übersicht und Prüfung der untersuchten Literatur (eigene Darstellung)

4 Herleitung des Konzeptansatzes

Das vierte Kapitel beinhaltet die Herleitung des Konzeptansatzes zur Zielerreichung dieses Dissertationsvorhabens, ein Informationsmodell zur Umsetzung von Kreislaufstrategien im Maschinen- und Anlagenbau zu entwickeln. Das wissenschaftliche Arbeiten verlangt eine reproduzierbare und fundierte Vorgehensweise, die in systematisch hergeleiteten Modellen resultiert. Dazu werden in Unterkapitel 4.1 die formalen und inhaltlichen Anforderungen an das Dissertationsvorhaben definiert. In Unterkapitel 4.2 werden anschließend die methodischen Grundlagen geliefert, die zur Modellbildung erforderlich sind. Damit wird die Ausgangsbasis für die Modellentwicklung in Kapitel 5 bereitgestellt. Darauf folgend wird in Unterkapitel 4.3 die Vorgehensweise der Modellentwicklung beschrieben, bevor in Abschnitt 4.4 das Kapitel mit einem Zwischenfazit schließt.

4.1 Anforderungen an die zu entwickelnden Modelle

Um komplexe Zusammenhänge mithilfe geeigneter Abstraktionsmethoden in wissenschaftlichen Modellen abbilden zu können, muss formalen und inhaltlichen Anforderungen entsprochen werden. Hierbei bieten die formalen Anforderungen einen Rahmen für die Struktur und Systematik der wissenschaftlichen Modellbildung. Hingegen gewährleisten die inhaltlichen Anforderungen, dass der Gegenstand der Forschung dem angestrebten Zielbild entspricht. In diesem Unterkapitel wird ein Anforderungsprofil erstellt, mithilfe dessen das Ziel einer Informationsmodellierung für die Kreislaufwirtschaft erreicht werden kann.

4.1.1 Formale Anforderungen

Die enthaltenen Modelle zur Zielerreichung werden nach den Grundsätzen der korrekten Modellierung erstellt, um eine angemessene Güte und Qualität der vorgestellten Forschung sicherzustellen. Dabei wird anvisiert, einen optimalen Modellnutzen zu erreichen, der zwischen Erstellungsaufwand und Modellqualität ausgewogen ist (s. PATZAK 1982, S. 309). Die folgenden wissenschaftlichen Grundsätze dienen somit der Einhaltung formaler Anforderungen an diese Dissertationsschrift:

Grundsatz der Richtigkeit (s. BECKER ET AL. 2012, S. 32; s. ROSEMAN 1998, S. 6f.): Der Grundsatz der Richtigkeit beschreibt eine korrekte Modellbildung anhand der Wirklichkeit. Somit müssen zu entwickelnde Modelle eine empirische Richtigkeit sowie einen relevanten Bezug zur Realität aufweisen (s. PATZAK 1982, S. 309). Nach STACHOWIAK stellen Modelle die Abbildung von Originalen dar (s. STACHOWIAK 1973, S. 132). Überdies muss eine Modellierung formal richtig und exakt ausgearbeitet sein (s. PATZAK 1982, S. 310). Damit wird der Tatsache entsprochen, dass eine äußerlich einwandfreie Gestaltung ebenso erforderlich ist, um die Reproduzierbarkeit und Nachprüfbarkeit gewährleisten zu können.

Grundsatz der Relevanz (s. BECKER ET AL. 2012, S. 32; s. ROSEMAN 1998, S. 7): Dem Grundsatz der Relevanz liegt zugrunde, den Modellinhalt auf die dem

vorliegenden Modellierungszweck dienenden Inhalte zu verkürzen (s. STACHOWIAK 1973, S. 132; s. PATZAK 1982, S. 310). Dieser Grundsatz setzt die vollständige Kenntnis des originalen Forschungsgegenstands voraus, um eine Auswahl relevanter Bestandteile für das Modell vornehmen zu können (s. STACHOWIAK 1973, S. 132). Damit wird der Inhalt des neu entwickelten Modells nicht reduziert, sondern ein fokussierter und zweckbezogener Nutzen für die Anwender realisiert.

Grundsatz der Abstraktion (s. STACHOWIAK 1973, S. 132f.): Der Grundsatz der Abstraktion beruht darauf, dass Modelle ihren Originalen nicht eindeutig zugeordnet sind, sondern eine Ersatzfunktion erfüllen (s. STACHOWIAK 1973, S. 132). Diese Ersatzfunktion muss demnach einem Subjekt zugeordnet, zeitlich eingrenzbar und auf tatsächliche Operationen zurückzuführen sein (s. STACHOWIAK 1973, S. 132f.).

Grundsatz der Klarheit und Handhabbarkeit (s. BECKER ET AL. 2012, S. 32; s. ROSEMANN 1998, S. 8f.): Der Grundsatz der Klarheit und Handhabbarkeit setzt voraus, dass Modelle leicht anwendbar und leicht zu interpretieren sind (s. PATZAK 1982, S. 309). Dies umfasst die Lesbarkeit und Verständlichkeit der Modellbestandteile (z. B. Wortwahl, Layoutgestaltung) sowie die Nutzerfreundlichkeit für Anwender.

Grundsatz der Wirtschaftlichkeit (s. PATZAK 1982, S. 309; s. ROSEMANN 1998, S. 8): Der Grundsatz der Wirtschaftlichkeit beschreibt die Anforderung, dass der Aufwand zur Erstellung des Modells dem Nutzen gerecht wird und eine effiziente Anwendung ermöglicht wird (s. PATZAK 1982, S. 309). Im Kontext dieser Dissertation sind Forschungsmethoden zu wählen, die mit vertretbarem Aufwand die definierte Zielsetzung erreichen und eine wissenschaftlich-pragmatische Vorgehensweise darstellen.

Die vorgestellten Grundsätze werden im Sinne ihrer normativen Form in dieser Dissertationsschrift befolgt und bilden die Grundlage der zu entwickelnden Beschreibungs- und Erklärungsmodelle.

4.1.2 Inhaltliche Anforderungen

Neben den formalen Anforderungen werden im folgenden Unterabschnitt solche definiert, die die inhaltliche Qualität des Informationsmodells gewährleisten. Damit werden die Praxisrelevanz und Anwendbarkeit für Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus sichergestellt und es kann überprüft werden, ob das vorliegende Informationsmodell die inhaltliche Zielsetzung aus Unterkapitel 1.2 erreicht hat. Aus dem Forschungsbedarf, der in Abschnitt 3.3 identifiziert wurde, und den im Folgenden definierten inhaltlichen Anforderungen wird das wissenschaftliche Vorgehen in Abschnitt 4.3 abgeleitet.

Eine erste Anforderung, die sich aus Gesprächen des Autors mit relevanten Experten aus dem Maschinen- und Anlagenbau ergeben hat, ist die *kontextuelle Auswahl mehrwertstiftender Kreislaufstrategien*. In der Auswertung der Expertengespräche wurde offensichtlich, dass der Begriff der *Kreislaufwirtschaft* bekannt ist, jedoch kein Konsens über ökonomisch sinnvolle und realisierbare Strategien im Maschinen- und Anlagenbau existiert. Daher ist die erste Anforderung für eine Informationsmodellierung dieser

Dissertationsschrift eine wissenschaftlich begründete Auswahl relevanter, mehrwertstiftender Kreislaufstrategien im Maschinen- und Anlagenbau. Dadurch kann der höchstmögliche Nutzen in der Anwendung generiert und die Komplexität der Kreislaufwirtschaft reduziert werden.

Die zweite inhaltliche Anforderung umfasst die *Beschreibung des Ökosystems zur Umsetzung der ausgewählten Kreislaufstrategien*. Im Rahmen der systematischen Literaturrecherche wurde identifiziert, dass eine wissenschaftliche Untersuchung unternehmensübergreifender Kooperationen zur Kreislaufwirtschaft auf Meso-Level eine Forschungslücke darstellt (s. CAGNO ET AL. 2021, S. 28). Mithilfe der Beschreibung relevanter Funktionen und Rollen im zu entwickelnden Ökosystem wird der Komplexität interorganisationaler Zusammenarbeit Rechnung getragen, sodass ein Hilfsmittel für leitende Führungspersonen des Maschinen- und Anlagenbaus zur Verfügung steht.

Eine weitere Anforderung, die sich aus dem Aufbau von Informationsmodellen ergibt, besteht in der *Auswahl und Beschreibung relevanter Informationsentitäten*. Aus der kontextuellen Verknüpfung von Informationen zu lebensverlängernden Kreislaufstrategien ergibt sich die Notwendigkeit, die inhaltlichen Komponenten der Informationsmodellierung zuvor wissenschaftlich herzuleiten. Damit wird gewährleistet, dass eine inhaltliche Fokussierung ohne verzichtbare Informationen erstellt wird und die geforderte inhaltliche Tiefe erreicht.

Aus den vorherigen Anforderungen ergeben sich *Wirkungsbeziehungen zwischen dem zirkulären Ökosystem und den Informationsentitäten*, deren Untersuchung Teil dieses Dissertationsvorhabens ist. Die inhaltliche Verknüpfung zwischen Rollen eines zirkulären Ökosystems und der Informationsverfügbarkeit wurde bisher im Rahmen der Forschung nicht betrachtet (s. Abschnitt 3.3). Durch die Untersuchung dieser Verknüpfung in der vorliegenden Dissertationsschrift wird sichergestellt, dass Anwender des Informationsmodells künftig neben der notwendigen Informationsbasis auch die Herkunft oder den Zielort der Informationsentitäten einschätzen können.

Über die konkret inhaltlichen Anforderungen hinaus werden Voraussetzungen an den Inhalt definiert, die themenunabhängig greifen. Eine Anforderung ist die *innere Konsistenz* der zu entwickelnden Modelle. Dazu muss die finale Informationsmodellierung ein widerspruchsfreies Abbild der Wirklichkeit wiedergeben, das aufgrund seiner Verständlichkeit zur Akzeptanz des Gesamtmodells beiträgt. Darauf aufbauend wird eine *Visualisierbarkeit* in Form von sachlichen Grafiken erfordert. Durch eine geeignete visuelle Repräsentation wird eine effektive Auswertung komplexer Datenmengen erreicht (s. SCHUMANN U. MÜLLER 2000, S. 5). In der Wissenschaft können dadurch die Analyse, das Verständnis und die Kommunikation von Modellen erleichtert werden (s. SCHUMANN U. MÜLLER 2000, S. 5). Letztlich ist die *Adaptierbarkeit* der Informationsmodellierung eine zentrale Anforderung. Aufgrund der sich kontinuierlich ändernden Anforderungen an den Inhalt von Informationsmodellen in dynamischen Forschungsfeldern wie der Kreislaufwirtschaft ist es ein Anspruch dieser Dissertationsschrift, eine Weiterentwicklung der Ergebnisse zu ermöglichen und die Adaptierbarkeit des Informationsmodells sicherzustellen.

4.1.3 Zusammenführen der Anforderungen

Auf die Herleitung formaler und inhaltlicher Anforderungen folgt in Abbildung 4-1 eine Zusammenfassung, die die Basis der methodischen Grundlage im folgenden Abschnitt bildet.

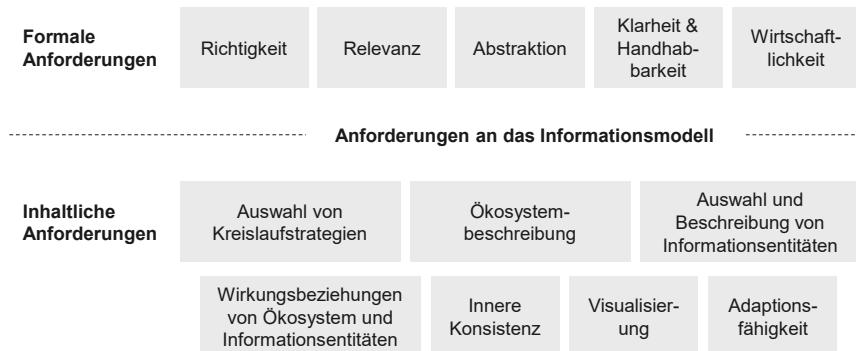


Abbildung 4-1: Formale und inhaltliche Anforderungen an das Informationsmodell (eigene Darstellung)

Unter Berücksichtigung der Anforderungen werden in den folgenden Kapiteln die Vorgehensweisen zur Erstellung dieses Dissertationsvorhabens und deren Ergebnisse dieses Dissertationsvorhabens vorgestellt. Im sechsten Kapitel folgt anschließend eine Validierung der Modelle anhand der definierten Anforderungen.

4.2 Methodische Grundlagen

Ziel dieses Unterkapitels ist die Darlegung praxisnaher und wissenschaftlicher Methoden, die zur Erfüllung der definierten Anforderungen aus Abschnitt 4.1 erforderlich sind und zur Zielerreichung der Dissertationsvorhabens beitragen. Dazu werden relevante Methoden aus den Wirtschafts- und Ingenieurwissenschaften zusammengeführt.

4.2.1 Systemdenken

Das Systemdenken oder systemorientierte Denken beschreibt eine ganzheitliche Beobachtungsweise von komplexen Erscheinungen bzw. Systemen, sodass eine formal-abstrakte, objekt-unabhängige und umfassende Untersuchung von Problemsachverhalten möglich wird (s. PATZAK 1982, S. 4; s. HABERFELLNER ET AL. 2018, S. 27). Zur Anwendbarkeit bietet das systemorientierte Strukturieren Denkmodelle an, die durch Formalisieren und Kategorisieren der Problemstellung eine effiziente Zusammenarbeit ermöglichen (s. PATZAK 1982, S. 4f.). In der Betriebswirtschaftslehre versteht sich die Systemtheorie damit ähnlich den Ingenieurwissenschaften als interdisziplinärer Ansatz, der eine terminologische, heuristische und integrative Funktion verfolgt (s. ULRICH U. HILL 1976, S. 308). Ein System kann dazu als Artefakt definiert werden, das ein abstraktes Abbild der Realität darstellt (s. WINZER 2016, S. 3). Zur Beschreibung von

Systemen, insbesondere komplexer Systeme, werden spezielle Begriffe verwendet, deren Charakterisierung zum Verständnis der Arbeit notwendig ist (s. HABERFELLNER ET AL. 2018, S. 27).

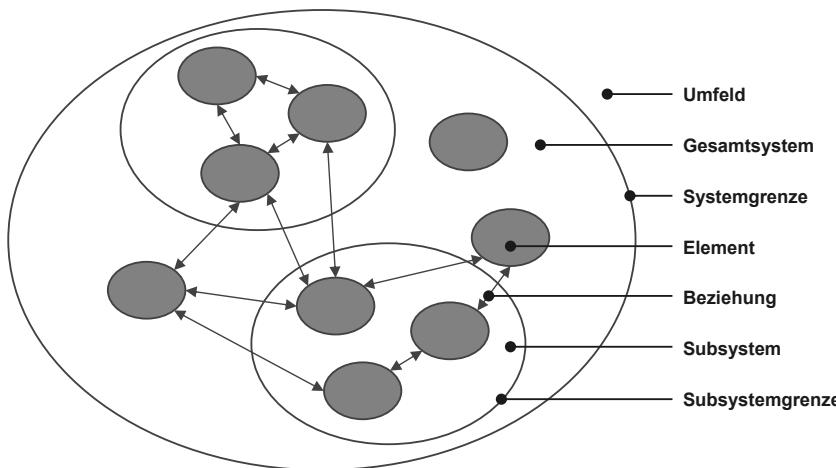


Abbildung 4-2: Aufbau und Begriffe eines komplexen Systems (eigene Darstellung i. A. a. HABERFELLNER ET AL. 2018, S. 28ff.; PATZAK 1982, S. 19)

In Abbildung 4-2 ist ein System mit seinen Begriffen visualisiert. Ein System besteht im Allgemeinen aus *Elementen*, die als Bausteine des Systems Eigenschaften besitzen und über Beziehungen verknüpft sind (s. HABERFELLNER ET AL. 2018, S. 28; s. PATZAK 1982, S. 19). Elemente besitzen *Eigenschaften* und *Funktionen*, die den Zweck des Elements im Systemzusammenhang beschreiben (s. HABERFELLNER ET AL. 2018, S. 28; s. PATZAK 1982, S. 19). Elemente können selbst wieder als Systeme betrachtet werden und sind untereinander durch *Beziehungen* verbunden. Beziehungen stellen bspw. Materialflüsse, Informationsflüsse oder Positionen zueinander dar (s. HABERFELLNER ET AL. 2018, S. 28; s. PATZAK 1982, S. 19). Die *Systemgrenze* bildet hingegen eine definierte Abgrenzung des Systems zum eingebetteten Umfeld (s. HABERFELLNER ET AL. 2018, S. 29). Das *Umfeld* umfasst außersystemische Elemente und Systeme, die Einfluss auf das betrachtete System nehmen können (s. HABERFELLNER ET AL. 2018, S. 29). Betrachtet man jedoch ein Element selbst als System, so bildet dieses ein eigenes *Sub- oder Untersystem* (s. HABERFELLNER ET AL. 2018, S. 30).

Um im Rahmen dieser Dissertationsschrift den Ansatz des Systemdenkens nutzen zu können, bietet die Disziplin der Systemtechnik, auch *Systems Engineering* genannt, einen anwendungsorientierten Gestaltungsansatz von Systemen (s. WINZER 2016, S. 4). *Systems-Engineering* wird definiert als „*Methodik, die hilft, den Prozess der Lösung von komplexen Problemen effizienter zu gestalten*“ (PATZAK 1982, S. 15; zitiert nach Haberfellner). Dazu werden die Werkzeuge bereitgestellt, die dabei unterstützen, interdisziplinäre Wissenschaften miteinander zu verbinden und Planungsrisiken in der Zusammenarbeit zu verringern (s. WINZER 2016, S. 4; s. PATZAK 1982, S. 13)

4.2.2 Allgemeine Modelltheorie

Komplexe Problemstellungen werden innerhalb des Systemdenkens mithilfe von modellhaften Ansätzen beschrieben (s. HABERFELLNER ET AL. 2018, S. 27). Abgeleitet vom lateinischen Begriff *modulus* (Maß, Maßstab), beschreibt der Begriff „Modell“ ein Abbild, Vorbild oder die Repräsentation eines bestimmten Originals (s. STACHOWIAK 1973, S. 129). In der Realität werden Modelle im Zusammenspiel mit Systemen verwendet, um die Komplexität der Realität zu verringern und kommunizierbar zu machen (s. LEHNER ET AL. 1995, S. 26). Hierbei repräsentieren die Modelle die Realität mit einem unterschiedlichen Grad an Genauigkeit (s. FORRESTER 1972, S. 73). Unter Modellbildung versteht man dagegen den Prozess zur Abbildung und Abstraktion der Realität (s. LEHNER ET AL. 1995, S. 27). In der Wissenschaft konnten sich in der allgemeinen Modelltheorie die Ausführungen nach STACHOWIAK durchsetzen (s. LEHNER ET AL. 1995, S. 27).

Demnach werden drei Hauptmerkmale verlangt, um den wissenschaftlichen Anforderungen eines Modells zu genügen (s. LEHNER ET AL. 1995, S. 27; s. STACHOWIAK 1973, S. 131): *Abbildungsmerkmal*, *Verkürzungsmerkmal* und *Pragmatisches Merkmal*. Das Abbildungsmerkmal besagt, dass „*Modelle (...) stets Modelle von etwas, nämlich Abbildungen, Repräsentationen natürlich oder künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können*“ sind (STACHOWIAK 1973, S. 131). Der Begriff des *Originals* kann ganzheitlich gefasst werden und Ursprung jeder natürlichen oder kognitiv erfahrbaren und erstellbaren Entität sein (s. STACHOWIAK 1973, S. 131). Das Verkürzungsmerkmal beschreibt, dass „*Modelle (...) im allgemeinen nicht alle Attribute des durch sie repräsentierten Originals, sondern nur solche, die den jeweiligen Modellerschaffern und/oder Modellbenutzern relevant scheinen (erfassen)*“ (STACHOWIAK 1973, S. 132). Diese Anforderung setzt voraus, dass alle Attribute des Originals und des Modells bekannt sind (s. STACHOWIAK 1973, S. 132). Das *Pragmatische Merkmal* ist dadurch definiert, dass „*Modelle (...) ihren Originalen nicht per se eindeutig zugeordnet*“ werden können, sondern eine Ersetzungsfunktion für bestimmte Subjekte innerhalb eines spezifischen Zeitintervalls und unter zweckgebundenen Einschränkungen erfüllen (s. STACHOWIAK 1973, S. 132f.). Damit wird spezifiziert, dass Modelle nicht nur eine reine Abbildung darstellen, sondern in Ihren Kontext eingebettet sind und für eine Adressatengruppe in einem Zeitintervall für einen gegebenen Zweck erstellt werden (s. STACHOWIAK 1973, S. 133).

Neben den Hauptmerkmalen, die Modelle einzuhalten haben, werden in der Modellierung Erkenntnisziele verfolgt, die eine Modellierung rechtfertigen. ZELEWSKI gliedert Modellarten anhand ihres betriebswirtschaftlichen Erkenntnisziels (s. ZELEWSKI 2008, S. 46). Im Wesentlichen benennt er drei Erkenntnisziele der Betriebswirtschaftslehre (s. ZELEWSKI 2008, S. 25f.): das *deskriptive*, das *theoretische* und das *praktische* Erkenntnisziel. Das deskriptive Erkenntnisziel, auch Beschreibungsziel, gibt reale Sachverhalte zutreffend wieder (s. ZELEWSKI 2008, S. 26). Der deskriptive Charakter des Beschreibungsziels wird dabei nicht als eigenständiges Erkenntnisziel behandelt, sondern leitet sich aus übergeordneten Erklärungs- und Gestaltungszielen ab (s. ZELEWSKI 2008, S. 26). Das theoretische Erkenntnisziel, auch Erklärungsziel, zielt darauf ab,

reale Sachverhalte zu erklären (s. ZELEWSKI 2008, S. 26). Auf Grundlage einer Sachverhaltsbeschreibung werden dazu mehrere gesetzesartige Aussagen abgeleitet, die umgangssprachlich in „Wenn-Dann-Beziehungen“ beschrieben werden können (s. ZELEWSKI 2008, S. 28). Das praktische Erkenntnisziel der Betriebswirtschaftslehre, auch Gestaltungsziel, beschreibt die Gestaltung realer Sachverhalte (s. ZELEWSKI 2008, S. 26). Zur Umsetzung der Gestaltungsziele werden Technologien genutzt, aus denen Empfehlungen für unternehmerischen Entscheidungen abgeleitet werden können (s. ZELEWSKI 2008, S. 31).

Im Rahmen dieser Dissertationsschrift sind die Modellarten expliziter Form, da sie schriftlich den Gedankenraum verlassen und veröffentlicht werden (s. ZELEWSKI 2008, S. 46). Zum Verständnis werden in Abbildung 4-3 alle Arten expliziter Modelle aufgezeigt.

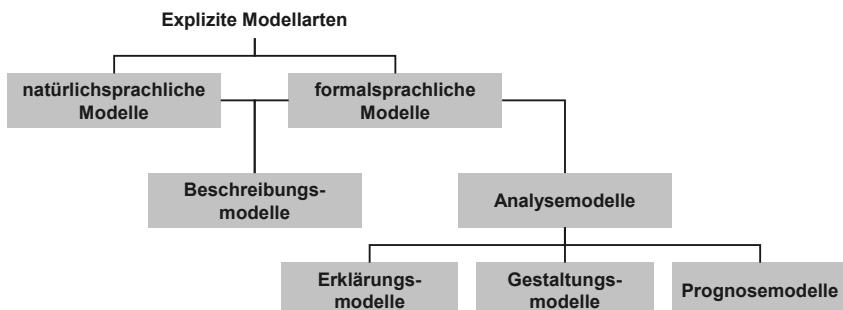


Abbildung 4-3: Beschreibung von expliziten Modellarten (eigene Darstellung i. A. a. ZELEWSKI 2008, S. 47)

Die expliziten Modelle lassen sich demnach in die natürlichsprachlichen und formalsprachlichen Modellarten aufteilen. Die natürlichsprachlichen Modelle dienen zur sprachlichen Beschreibung der Realprobleme, die mit fortschreitender Bearbeitung formalisiert und in formalsprachliche Modelle überführt werden (s. ZELEWSKI 2008, S. 46). Beide Modellarten lassen sich nach den Erkenntniszielen der Betriebswirtschaftslehre gliedern. Beschreibungsmodelle verfolgen demnach das deskriptive Erkenntnisziel, um zunächst das Realproblem systematisch zu beschreiben (s. ZELEWSKI 2008, S. 46). Als Analysemodelle sind demgegenüber die Modellarten zusammengefasst, die der Untersuchung nicht-deskriptiver Erkenntnisziele dienen und ausschließlich in formalsprachlicher Form vorliegen (s. ZELEWSKI 2008, S. 46). Untergruppen davon sind die Erklärungs- und Gestaltungsmodelle, die auf die Erfüllung von Erklärungen bzw. Gestaltungszielen abzielen (s. ZELEWSKI 2008, S. 46). Dagegen verfolgen Prognosemodelle derivative Erkenntnisziele, die die Konsequenzen aus den in Modellen getroffenen Annahmen untersuchen (s. ZELEWSKI 2008, S. 48). Im Rahmen dieser Dissertationsschrift werden Beschreibungs- und Erklärungsmodelle angewendet, um das Forschungsziel einer Informationsmodellierung für Kreislaufstrategien umsetzen zu können.

4.2.3 Klassifizierung und Typisierung

Grundlegend wird die Klassifizierung von BAILEY als eine der zentralen Konzeptualisierungstechniken zur Komplexitätsreduktion und Charakterisierung von Elementen beschrieben (s. BAILEY 1994, S. 1). Sie ist definiert als Einordnung von Entitäten in Gruppen oder Klassen auf der Basis ihrer Ähnlichkeit (s. BAILEY 1994, S. 1; 2005, S. 889). Die Methode beschreibt dabei den Prozess der Gruppierung wie auch das erarbeitete Endresultat (s. BAILEY 1994, S. 6; s. WHEATON 1968, S. 5). In der Wissenschaft hatte die Methode ihren Ursprung bereits im antiken Griechenland im Bemühen, Ordnung in den vermeintlich chaotischen Zustand der Natur zu bringen (s. LAMBERT 2015, S. 50f.; s. HUXLEY 2007, S. 12). In der Informatik werden Klassifizierungssysteme als gemeinsame Methode zum Wissensaustausch und zur Entwicklung einer gemeinsamen Terminologie verwendet (s. VESSEY ET AL. 2005, S. 245). Als Grundlagenmethode zur Systematisierung von Beschreibungszielen wird sie ebenso von ZELEWSKI in der Betriebswirtschaftslehre angewendet (s. ZELEWSKI 2008, S. 26f.).

Neben der Klassifizierung umfassen die Typisierung und die Morphologie die wichtigsten analytischen Forschungsmethoden in der Betriebswirtschaftslehre (s. WELTER 2006, S. 113). Analytische Forschungsmethoden zielen auf die systematische Ordnung anhand von Differenzierungsmerkmalen ab (s. WELTER 2006, S. 113). In der Unterscheidung zwischen Typisierung und Klassifizierung ist die Anzahl der Merkmale entscheidend: Während die Klassifizierung mit einem Merkmal auskommt, werden für eine Typisierung mindestens zwei Merkmale benötigt (s. WELTER 2006, S. 113; s. ZELEWSKI 2008, S. 27). Davon abzugrenzen ist die Morphologie, die alle theoretischen und sinnvollen Kombinationen von Merkmalsausprägungen erfasst und neben der reinen Beschreibung neue Lösungen offenlegen kann (s. WELTER 2006, S. 114). In Abbildung 4-4 ist die vollständige Gegenüberstellung der analytischen Forschungsmethoden abgebildet.

	Erforderliche Anzahl Merkmale	Logische Wahrheit der Lösungen?	Faktische Wahrheit der Lösungen?	Primäre Anwendung
Typisierung	> 1	ja	ja	Systematik, Entscheidungsunterstützung
Klassifizierung	1	ja	ja	Systematik, Entscheidungsunterstützung
Morphologie	> 1	ja	nicht zwingend	Systematik, Entscheidungsunterstützung und Aufdeckung neuer Lösungen

Abbildung 4-4: Abgrenzung von Typisierung, Klassifizierung und Morphologie (WELTER 2006, S. 114)

Die Typisierung ist dementsprechend auch als konzeptionelle Klassifizierung zu verstehen, da die Typen einem Konzeptansatz folgen statt einer empirischen Erhebung (s. BAILEY 1994, S. 5). Grundsätzlich werden im Rahmen dieser Dissertationsschrift nur qualitative Klassifizierungen genutzt, die ohne Quantifizierung und statistische

Analysen auskommen (s. BAILEY 1994, S. 6). Dagegen werden Taxonomien von BAILEY als empirische Klassifizierungen definiert, die zwar ähnlich zu Typologien aufgebaut sind, allerdings nur empirische Objekte einordnen (s. BAILEY 1994, S. 6). Dies wird begründet mit ihrer Herkunft aus der Biologie (s. BAILEY 1994, S. 6). Neben den qualitativen Klassifizierungen stützen sich die quantitativen Klassifizierungen auf zahlenbasierte Methoden, deren Berechnung im Allgemeinen von Computern übernommen wird (s. BAILEY 1994, S. 6f.).

Im Rahmen dieser Dissertationsschrift wird die Methode der qualitativen Klassifizierung zur Beschreibung relevanter Produktinformationen für die Kreislaufwirtschaft angewendet. Im Grundsatz ist es das Ziel der Klassifizierung, die Varianz innerhalb einer Klasse möglichst gering zu halten, während die Varianz zwischen Klassen maximiert wird (s. BAILEY 1994, S. 1). Zudem muss eine Klassifizierung „*exhaustive (und) mutually exclusive*“ konzipiert sein, d. h. es muss für jedes Element eine Klasse geben und kein Element darf zwei Klassen zuweisbar sein (s. BAILEY 1994, S. 3).

In der Informatik haben VESSEY ET AL. den Klassifizierungsprozess definiert und in drei Phasen unterteilt (s. VESSEY ET AL. 2005, S. 249; s. WHEATON 1968, S. 5f.): das Ziel der Klassifizierung, die Kriterien für die Klassifizierung und die Methode zur Durchführung der Klassifizierung. Die Definition des Ziels einer Klassifizierung umfasst die Abwägung, ob eine generalistische oder spezifische Klassifizierung anzufertigen ist (s. VESSEY ET AL. 2005, S. 249). Während die spezifische Klassifizierung einem klar definierten und praktikablen Zweck dient, führt dies auch zu einer Vielzahl an Klassifizierungen für spezifische Anwendungsgebiete und erhöht die Schwierigkeit einer Generalisierung (s. VESSEY ET AL. 2005, S. 249). Dagegen bedient eine allgemeine Klassifizierung mehrere Ziele und bildet eine übergreifende Struktur, ohne ein spezifisches Problem zu lösen (s. VESSEY ET AL. 2005, S. 249). Die Auswahl passender Kriterien stellt einen Erfolgsfaktor einer guten Klassifizierung dar und umfasst zum einen die genaue Eingrenzung des zu untersuchenden Subjekts sowie zum anderen die Kriterien zur Beschreibung, Unterscheidung und Gruppierung (s. VESSEY ET AL. 2005, S. 249; s. BAILEY 1994, S. 2). Die Methode der Klassifizierung beschreibt die eindeutige Einordnung von Elementen in Klassen anhand von klaren Definitionen und Richtlinien (s. VESSEY ET AL. 2005, S. 249).

4.2.4 Fallstudienforschung

Die Fallstudienforschung ist begründet auf der Explorationsstrategie nach KUBICEK, die entgegen der traditionellen Hypothesenbildung und anschließender Veri- oder Falsifikation auf einem erfahrungsbasierten Wissensprozess zur Bildung von wissenschaftlichen Theorien aufbaut (s. KUBICEK 1977, S. 13). Diese Methodik ist im Einklang mit der *Grounded Theory*, einem Prozess, in dem eine wissenschaftliche Theorie oder Modelle datenbasiert hergeleitet werden (s. GLASER U. STRAUSS 2006, S. 1). EISENHARDT hat auf diesen Grundlagen den Ansatz der Fallstudienforschung (engl. *Case Study Research*) entwickelt, um den Prozess der Theoriebildung zu ordnen (s. EISENHARDT 1989, S. 534). Ergänzend definiert YIN Fallstudien als Forschungsstrategien mit

dem Ziel, das Wissen über sozial-ökonomische Phänomene datenbasiert zu beschreiben und zu verstehen (s. YIN 2003, S. 1f.). Dazu werden Datensammlungsmethoden wie Interviews, Umfragen und Beobachtungen genutzt (s. EISENHARDT 1989, S. 534). Die Fallstudienforschung findet ihren Anwendungsbereich insbesondere in der Forschung von Organisations- und Managementprozessen, urbanen Stadtveränderungen sowie Entwicklungsprozessen in der Industrie (s. YIN 2003, S. 2). In Abbildung 4-5 ist der Prozess der Theorieentwicklung aus Fallstudien nach EISENHARDT abgebildet.

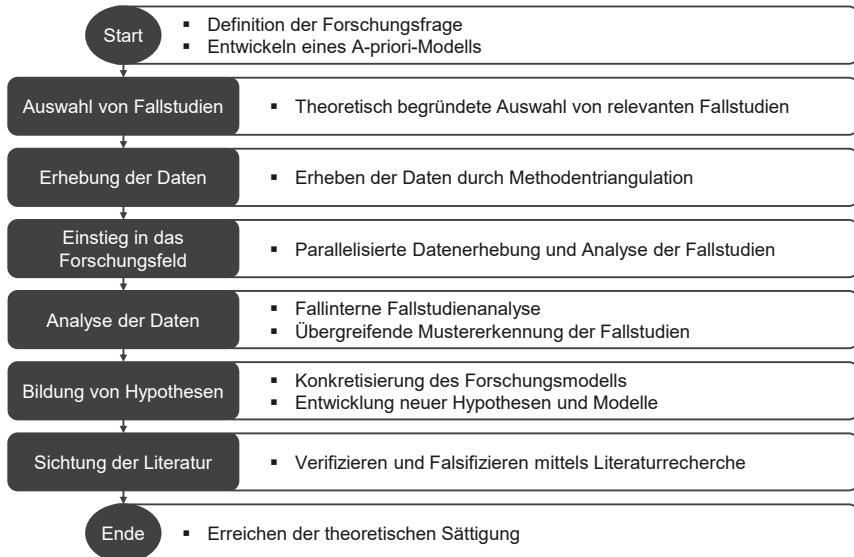


Abbildung 4-5: Prozess der Fallstudienforschung nach EISENHARDT (eigene Darstellung i. A. a. EISENHARDT 1989, S. 533)

Der Prozess der Fallstudienforschung beginnt mit einer initialen Definition der Forschungsfrage (s. EISENHARDT 1989, S. 536). Ähnlich zur traditionellen, hypothesenbasierten Forschungsmethodik ist der Untersuchungsfokus elementar, um die generierten Datenmengen systematisch und effizient auswerten zu können (s. EISENHARDT 1989, S. 536). Überdies wird im ersten Schritt ein A-priori-Modell entwickelt, um mit Hilfe des definierten Forschungsgerüsts die Ergebnisse effizienter bewerten zu können (s. EISENHARDT 1989, S. 536). Ebenso gilt es zu berücksichtigen, dass es sich um provisorische Konstrukte handelt, die sich im Laufe des Fallstudienforschungsprozesses verändern können (s. EISENHARDT 1989, S. 536).

Im zweiten Schritt werden relevante Fallstudien für den Forschungskontext ausgewählt. Analog zur hypothesenbasierten Wissenschaft ist die Auswahl der Forschungsobjekte entscheidend für die Qualität der zu erlangenden Ergebnisse (s. EISENHARDT 1989, S. 537). Aufgrund der eingeschränkten Anzahl von Fallstudien, die umfangreich bearbeitet werden können, sind theoriefundierte Quellen für den Auswahlprozess vorzuziehen (s. EISENHARDT 1989, S. 537). YIN empfiehlt dazu eine Anzahl von 6 bis 10

Fallstudien, um eine ausreichende Grundgesamtheit zu erreichen (s. YIN 2003, S. 47). Für den Fall widersprüchlicher Fallstudien muss allerdings das ursprüngliche Modell überarbeitet und der Prozess wiederholt werden (s. YIN 2003, S. 47). Statistische oder zufällige Auswahlverfahren sind dagegen nicht zu präferieren (s. EISENHARDT 1989, S. 537).

Der dritte Schritt des Fallstudienansatzes beschreibt Datenerhebungsmethoden, die bspw. Beobachtungen, Interviews und Archivdateien umfassen (s. EISENHARDT 1989, S. 537). Ziel ist es, eine möglichst solide Datenbasis für die zu entwickelnden Theorien und Modelle zu erschaffen (s. EISENHARDT 1989, S. 538). Über die Methodentriangulation werden mehrere Methoden zur Datenerhebung kombiniert, um dadurch die zugrunde liegende Datenbasis zu stärken (s. EISENHARDT 1989, S. 538). EISENHARDT hebt hervor, dass eine Kombination aus qualitativen und quantitativen Fallstudien synergetische Ergebnisse erzielen können (s. EISENHARDT 1989, S. 538). Weiterhin beschreibt EISENHARDT den Vorteil der Einbindung mehrerer untersuchender Personen, die unterschiedliche Perspektiven aufdecken und damit die Konfidenz der Ergebnisse erhöhen (s. EISENHARDT 1989, S. 538).

Eine Herausforderung, die der Fallstudienforschung zugrunde liegt, ist die kontinuierliche Parallelisierung von Datenerhebung und -auswertung (s. EISENHARDT 1989, S. 538). Die Parallelisierung ermöglicht dem Forschenden eine flexible Datenerhebung und schnelle Adaption der Fallstudien und Erkenntnisse (s. EISENHARDT 1989, S. 539). Zudem lässt sich durch das kurzyklische Vorgehen eine hohe Vergleichbarkeit zwischen den Fallstudien durch die Untersuchenden erreichen (s. EISENHARDT 1989, S. 539).

Die Datenanalyse ist das Kernelement der Fallstudienforschung (s. EISENHARDT 1989, S. 539). Dazu werden Fallstudien zunächst individuell und anschließend übergreifend auf Muster untersucht (s. EISENHARDT 1989, S. 539f.). Die Untersuchenden werden ermutigt, möglichst verschiedene Blickwinkel anzuwenden, um über die initialen Aufälligkeiten hinauszureichen (s. EISENHARDT 1989, S. 541). EISENHARDT beschreibt diesen Teil als den am wenigsten standardisierten Prozessschritt aufgrund der Tatsache, dass jeder Forschende seine eigenen Analysemethoden nutzt und das vollständige Vorgehen oftmals verborgen bleibt (s. EISENHARDT 1989, S. 539).

Im sechsten Schritt wird auf Basis der Erkenntnisse eine Theorie oder ein Modell gebildet (s. EISENHARDT 1989, S. 541). Dazu wird das weiterentwickelte A-priori-Modell ergänzt und durch Überprüfen von Mustern über die Fallstudien hinweg hinterfragt (s. EISENHARDT 1989, S. 543). EISENHARDT betont, dass das Forschungsteam an dieser Stelle die Validität und Konsistenz des Konstruktks bewerten muss und den Prozess so transparent wie möglich veröffentlicht, sodass sich die Lesenden einen eigenen Eindruck verschaffen können (s. EISENHARDT 1989, S. 544).

Den Abschluss des Fallstudienforschungsprozesses bildet der Abgleich der Fallstudienerkenntnisse mit der wissenschaftlichen Literatur (s. EISENHARDT 1989, S. 544). Ziel ist es, die Erkenntnisse an existierende Literatur anzuschließen, um ihre interne Validität und Generalisierbarkeit zu erhöhen (s. EISENHARDT 1989, S. 545). Dies ist in

der Fallstudienforschung besonders entscheidend, da die Erkenntnisse im Regelfall nur auf einer geringen Anzahl an Fallstudien beruhen (s. EISENHARDT 1989, S. 545). Die Theorie ist abgeschlossen, sobald die inkrementelle Verbesserung neuer Fallstudien zu minimal geworden ist und eine theoretische Sättigung erreicht wurde (s. EISENHARDT 1989, S. 545).

4.2.5 Ökosystemmodellierung

Die Ökosystemmodellierung fundiert auf der Analyse von Geschäftsökosystemen, die bereits in Unterabschnitt 2.2.4 definiert wurden. Im Allgemeinen beschreibt der Begriff des Ökosystems in wirtschaftlichem Kontext eine Gruppe von interagierenden Unternehmen, deren Aktivitäten voneinander abhängen und auf ein zentrales Wertversprechen abzielen (s. JACOBIDES ET AL. 2018, S. 2256; s. CONRAD ET AL. 2022, S. 4). Dazu wird zwischen drei Typen von Ökosystemen unterschieden (s. JACOBIDES ET AL. 2018, S. 2256f.): Geschäftsökosystemen, Innovationsökosystemen und Plattformökosystemen. Die in dieser Dissertationsschrift untersuchten Geschäftsökosysteme beziehen sich auf Unternehmen und ihre Umwelt (s. JACOBIDES ET AL. 2018, S. 2257). Dagegen bilden sich Innovationsökosysteme um neue Innovationen oder Wertversprechen und Plattformökosysteme entwickeln sich um die technische Infrastruktur einer Plattform (s. JACOBIDES ET AL. 2018, S. 2257). Geschäftsökosysteme formen eine Gemeinschaft aus Organisationen, Institutionen und Personen, die ein Wertversprechen verfolgen, aber ebenso Einfluss auf individuelle Unternehmen und seine Geschäftspartner ausüben (s. TEECE 2007, S. 1325).

Dazu definiert ADNER vier strukturelle Kernelemente, die zur Charakterisierung von Ökosystemen dienen (s. ADNER 2017, S. 43): Aktivitäten, Akteure, Positionen und Beziehungen. Aktivitäten spezifizieren diskrete Tätigkeiten, die zur Erfüllung des Wertversprechens ausgeführt werden müssen (s. ADNER 2017, S. 43). Die Akteure umfassen die Entitäten, die zur Ausführung der Aktivitäten am Ökosystem teilnehmen (s. ADNER 2017, S. 43). Ein einzelner Akteur kann mehrere Aktivitäten ausführen und eine Aktivität kann durch mehrere Akteure erfüllt werden (s. ADNER 2017, S. 43). Positionen definieren den Raum der Akteure im Ökosystem, den sie aufgrund ihrer Aktivitäten einnehmen (s. ADNER 2017, S. 43). Die Beziehungen definieren abschließend den Transfer von Materialien, Informationen und Kapital zwischen Akteuren innerhalb des Ökosystems (s. ADNER 2017, S. 43). In gesättigten Ökosystemen bleiben diese vier Kernelemente über lange Zeiträume stabil und Veränderung zeigt sich in der Regel durch den Austausch einzelner Akteure (s. ADNER 2017, S. 44).

Angelehnt an die Ökosystemanalyse nach WIENINGER ET AL. und ADNER bildet die Aktivitäts- und Funktionsbeschreibung die Voraussetzung, eine vollständige Modellierung des Ökosystems im Rahmen dieser Dissertationsschrift bewerkstelligen zu können (s. ADNER 2017, S. 43; s. WIENINGER ET AL. 2019, S. 4). Eine Methode zur umfassenden Modellierung eines Ökosystems mit seinen Kernelementen beschreibt das *Value Flow Model* von DEN OUDEN (s. DEN OUDEN 2011, S. 154ff.). Während für traditionelle Geschäftsmodelle der Business-Model-Canvas ein geeignetes Werkzeug zur

Gestaltung darstellt, beschreibt DEN OUDEN das *Value Flow Model* als Pendant für Ökosysteme (s. DEN OUDEN 2011, S. 154). Die Methode des *Value Flow Models* beschreibt dazu die Leistungsangebote, Interaktionen und Wertschöpfung zwischen Akteuren im Ökosystem (s. DEN OUDEN 2011, S. 154). Angelehnt an die Kernelemente von ADNER definiert DEN OUDEN ebenso den Begriff des *Akteurs* als Rolle, der eine bestimmte Funktion oder Aufgabe im Ökosystem übernimmt (s. DEN OUDEN 2011, S. 155). Dazu definiert DEN OUDEN 13 typische Rollen (s. Abbildung 4-6), die zur Modellierung vorgegeben werden (s. DEN OUDEN 2011, S. 172).

Symbol	Rolle	Definition
	Kunde	Nutzer, Käufer oder Mitgestalter, die die Zielgruppe des Wertversprechens darstellen
	Intermediär	Akteure wie Einzelhändler oder Makler, die in direktem Kundenkontakt stehen und ihre Angebote vertreiben
	Systemanbieter	Akteure, die verschiedene Waren und Dienstleistungen in ein vollständiges System integrieren und am Markt anbieten
	Warenanbieter	Akteure, die insb. physische Waren herstellen und ihrer Kundschaft anbieten
	Dienstleister	Akteure, die Leistungen und Tätigkeiten anbieten, die direkt dem Wertversprechen dienen oder als ergänzende Dienstleistung beauftragt werden
	Inhaltsanbieter	Geschäftsakteure, die im Kundenauftrag Inhalte kreieren und diese direkt an den Kunden liefern
	Lieferant	Akteure, die Waren oder Dienstleistungen für Anbieter bereitstellen, die in deren Systeme integriert werden, aber keinen Endkundenkontakt besitzen
	Enabler	Anbieter von Grundleistungen wie Infrastruktur oder Sicherheitsdienste, die zur Durchführung der Geschäftstätigkeiten notwendig sind. Versorgungsunternehmen werden im Value-Flow-Modell nicht modelliert.
	Investoren	Geldgeber, die die Entwicklung und Umsetzung des Wertversprechens mit finanziellen Mitteln unterstützen
	Marketing & Kommunikation	Unternehmen, die sich auf die kommerzielle Vermarktung neuer Wertversprechen spezialisiert haben
	Förderer	Personen mit politischem Einfluss, die ein Projekt vor unerwünschten, legislativen Eingriffen schützen können
	Wettbewerber	Konkurrenten, die Verbündete im Aufbau von Legitimität oder Nachfrager für radikale Innovationen darstellen können
	Staatlicher Akteur	Politische oder staatliche Akteure, die Rahmenbedingungen festlegen oder einen hohen Einfluss auf das Ökosystem ausüben

Abbildung 4-6 Übersicht der Rollen zur Ökosystemmodellierung (eigene Darstellung i. A. a. DEN OUDEN 2011, S. 172)

Ferner beschreibt DEN OUDEN das Element der *Motivation*, das Anreize und Interessen von Akteuren widerspiegelt und in einer Beschreibung formuliert (s. DEN OUDEN 2011, S. 155). In gefestigten Systemen können die Motivationen der Akteure als stabil

angenommen werden, erreichen jedoch eine hohe Signifikanz, wenn die Nachhaltigkeit und Stabilität eines entwickelten Ökosystems überprüft wird (s. DEN OUDEN 2011, S. 155). Das dritte Element besteht aus *der Kompatibilität und dem Einfluss* der Motivation eines Akteurs zum zentralen Wertversprechen (s. DEN OUDEN 2011, S. 156). Die Kompatibilität charakterisiert, ob ein Akteur positiv, neutral und negativ kongruent zum zentralen Wertversprechen und den Gründungsmitgliedern eingestellt ist und welchen Einfluss dieser geltend machen kann (s. DEN OUDEN 2011, S. 156). *Investment und Durchlaufzeit* bilden das vierte Element und legen die Investitionshöhe und den Zeithorizont zur Realisierung des Teils der Wertschöpfung dar, den ein Akteur zum zentralen Wertversprechen beiträgt (s. DEN OUDEN 2011, S. 157f.). In der Ökosystemgestaltung gilt dieses Element zentral, um für Unternehmen eine Vorlage der Investitionsentscheidung zu schaffen (s. DEN OUDEN 2011, S. 158). Das fünfte Element besteht im *Value Flow Model* aus den *Transaktionen* (s. DEN OUDEN 2011, S. 158). Transaktionen beschreiben Aktivitäten zwischen Akteuren oder Ressourcen, Informationen und Materialien, die zwischen diesen ausgetauscht werden (s. DEN OUDEN 2011, S. 158). DEN OUDEN definiert dazu die vier Transaktionstypen der *Waren und Dienstleistungen*, des *Kapitals*, der *Informationen* und der *immateriellen Güter* (s. DEN OUDEN 2011, S. 158f.). Waren und Dienstleistungen beschreiben physische Güter sowie Dienstleistungen, die als Bestandteil des Wertversprechens angeboten werden. Kapital stellt die finanziellen Geldflüsse dar, die im Rahmen der Wertschöpfung ausgetauscht werden. Informationsflüsse bilden eine zentrale Komponente, die in Innovationsökosystemen elementar für den Erfolg des Ökosystems ist. Immaterielle Güter beschreiben abschließend ideelle Werte, die bspw. aus Reputation oder Aufmerksamkeit bestehen (s. DEN OUDEN 2011, S. 159).

Um verschiedene Wertschöpfungsstufen zu erreichen, unterteilt DEN OUDEN das *Value Flow Model* in die vier Gruppen des Wertschöpfungskerns, der komplementären Angebote, des Lieferantennetzwerks und der weiteren Stakeholder (s. DEN OUDEN 2011, S. 159ff.). Der Wertschöpfungskern besteht aus Kunden und Akteuren, die die direkte wertschöpfende Aktivitäten mit dem Kunden austauschen (s. DEN OUDEN 2011, S. 159). Die Gruppe der komplementären Angebote bildet ergänzende Aktivitäten ab, die zwar direkt mit dem Kunden durchgeführt werden können, jedoch nicht von zentraler Bedeutung für das Wertversprechen sind (s. DEN OUDEN 2011, S. 161). Das darauf folgende Lieferantennetzwerk hat dagegen unterstützende Funktion und wird nur durch weitere Stakeholder außerhalb der beschriebenen Gruppen ergänzt (s. DEN OUDEN 2011, S. 161). Abbildung 4-7 zeigt einen Auszug des Ökosystems eines Dienstleisters für gesunde Ernährung und visualisiert die vier Gruppen anhand farblich abgestufter Ovale. Im Rahmen dieser Dissertationsschrift wurde im Beispiel zur Übersichtlichkeit auf einige Transaktionen verzichtet, sodass einzelne Rollen ohne Interaktionen dargestellt sind.

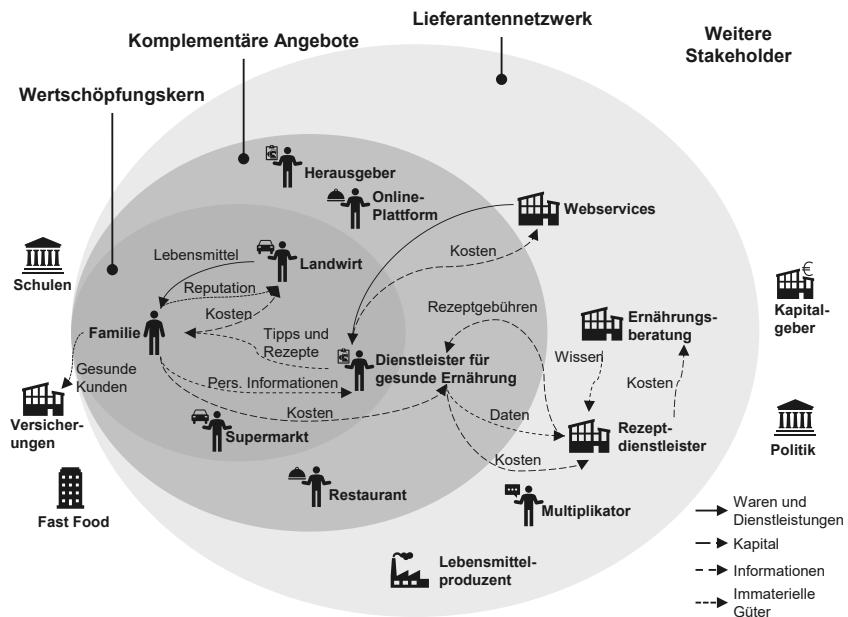


Abbildung 4-7: Beispiel eines *Value Flow Models* anhand eines Dienstleisters für gesunde Ernährung (eigene Darstellung i. A. a. DEN OUDEN 2011, S. 161)

Die Grundelemente dieser Methode finden bereits weitreichende Anwendung in der Praxis und werden von HEISING ET AL. zur Visualisierung eines Additive-Manufacturing-Blueprints angewendet (s. HEISING ET AL. 2022, S. 223). Am FIR an der RWTH Aachen wird diese Methode regelmäßig in Forschungs- und Industrieprojekten angewandt. So wurde beispielsweise im Forschungsprojekt COPPA mithilfe des *Value Flow Models* der Kreislauf von Lebensmittelverpackungen modelliert und untersucht, um eine Informationsplattform zur Steigerung der Rezyklatmenge aufzubauen. Zusammengefasst liefert das Vorgehen von DEN OUDEN eine geeignete Methode zur Erstellung des Beschreibungsmodells zirkulärer Ökosysteme im Rahmen dieser Dissertationsschrift.

4.2.6 Informationsmodellierung

Die Notwendigkeit zur Modellierung von Informationen nach klar definierten und strukturierten Regeln ergibt sich aus der interdisziplinären Kommunikation zwischen Experten mit Domänenwissen und Informatikern, die zur Softwareentwicklung erforderlich ist (s. BERNER 2016, S. 8). Aufgrund der unterschiedlichen Hintergründe und Kenntnisse wird eine interdisziplinär einfach zu verstehende Modellierungssprache benötigt, die als effektives Kommunikationsmittel dienen kann (s. BERNER 2016, S. 13). Informationsmodelle werden daher im Allgemeinen als konzeptionelle Datenmodelle oder abstrakte Modelle verstanden (s. BERNER 2016, S. 15; s. PRAS U.

SCHOENWAELDER 2003, S. 3). Eine umfassende Differenzierung zwischen Daten und Informationen lässt sich in Unterabschnitt 2.3.1 nachlesen.

Aus dem englischen *Information Modeling* abgeleitet, bildet das *Entity-Relationship-Modell* die Modellierungsgrundlage dieser Dissertationsschrift (s. BALZERT 2009, S. 199). Das Entity-Relationship-Modell (ER-Modell) wurde 1976 von CHEN entwickelt und dient dem Ziel, reine Datenmodelle um semantische Informationen zu ergänzen (s. CHEN 1976, S. 9f.; s. BALZERT 2009, S. 199; s. SCHENCK U. WILSON 1994, S. 18). Dabei handelt es sich um ein statisches, konzeptionelles Datenmodell, das sich primär in der Entwicklung von Datenbanken etabliert hat (s. BALZERT 2009, S. 199f.; s. KLEUKER 2016, S. 24). ER-Modelle bestehen dazu aus drei Elementen zur Beschreibung von Daten (s. GADATSCH 2019, S. 9; s. CHEN 1976, S. 11f.; s. SCHENCK U. WILSON 1994, S. 17; s. BALZERT 2009, S. 201ff.):

- **Entitätstypen (engl. *Entities*):** Entitätstypen sind abstrakte Konstrukte, die die Repräsentation eines Elements der realen Welt darstellen. Dies kann bspw. die Gesamtheit aller Mitarbeiter oder Maschinen umfassen. Die Benennung erfolgt im Plural, damit mehrere Entitäten im Entitätstyp erfasst sind.
- **Beziehungstypen (engl. *Relationships*):** Beziehungstypen beschreiben die Verbindung zwischen Entitätstypen. So können einzelne Mitarbeiter z. B. mehrere Maschinen bedienen. Die Benennung erfolgt ebenfalls im Plural.
- **Attribute:** Attribute liefern eine spezifische Beschreibung von Entitäts- oder Beziehungstypen sowie deren angegebene Maßeinheiten. Sie lassen sich in beschreibende und identifizierende Attribute unterteilen. Beschreibende Attribute liefern anwendungsrelevante Eigenschaften zu Entitäts- oder Beziehungstypen, wohingegen identifizierende Attribute, auch Schlüsselattribute genannt, einen eindeutigen Identifikationsschlüssel einer Entität aus einer Entitätsmenge liefern.

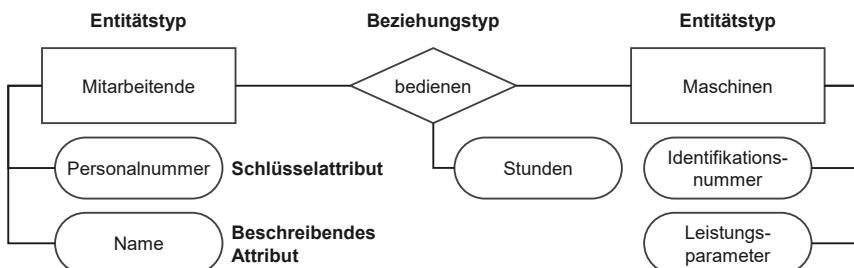


Abbildung 4-8: Modellierungsbeispiel des Entity-Relationship-Modells (eigene Darstellung i. A. a. GADATSCH 2019, S. 11; BALZERT 2009, S. 203)

Abbildung 4-8 visualisiert ein Modellierungsbeispiel aus dem Personalmanagement, das die Erfassung von geleisteten Arbeitsstunden von Mitarbeitern an Maschinen beschreibt (s. GADATSCH 2019, S. 10). Die Mitarbeiter und Maschinen werden als Entitäten beschrieben, wohingegen die zusammenhängende Aktivität des *Bedienens* als Beziehungstyp definiert wird. Die Entitäts- und Beziehungstypen werden über

Schlüsselattribute wie die *Personalnummer* eindeutig zugeordnet und über die Attribute wie *Stunden* oder *Leistungsparameter* näher beschrieben. In diesem Beispiel ist die Beziehung zwischen den Entitätstypen noch unbestimmt. CHEN hat zur Beschreibung einfacher oder komplexer Beziehungen drei grundlegende Kardinalitäten definiert (s. GADATSCH 2019, S. 11f.; s. CHEN 1976, S. 30): 1:1-Beziehungen, 1:N-Beziehungen und M:N-Beziehungen. Der 1:1-Beziehungstyp erfasst die eindeutige Zuordnung zwischen Entitäten (s. GADATSCH 2019, S. 11). Im vorgestellten Beispiel würde das bedeuten, dass nur ein Mitarbeiter die Maschine bedienen darf und ebendiese nur einem Mitarbeiter zugeordnet wird. Der 1:N-Beziehungstyp beschreibt das Zusammenwirken aus einer einfachen und einer mehrfachen Beziehung (s. GADATSCH 2019, S. 12). Wäre die Beziehung *Mitarbeiter-bedienen* mit einer 1 und die Beziehung *bedienen-Maschinen* mit einem N gekennzeichnet, würde modelliert, dass je Mitarbeiter eine Maschine bedient werden darf, die Maschinen jedoch von mehreren Mitarbeitern bedient werden dürfen. Der M:N-Beziehungstyp ist dementsprechend definiert als Mehrfachbeziehung in beide Richtungen, sodass mehrere Mitarbeiter mehrere Maschinen bedienen dürfen und andersherum (s. GADATSCH 2019, S. 12f.).

Neben der hier vorgestellten Notation von ER-Modellen nach CHEN wurden in der Wissenschaft weitere Darstellungsmöglichkeiten entwickelt, um vor allem die Beziehungstypen besser darstellen zu können (s. BALZERT 2009, S. 202; s. GADATSCH 2019, S. 33ff.). Die weiteren Notationsmöglichkeiten sind zur Vollständigkeit in Abbildung 4-9 dargestellt, jedoch wird im Rahmen dieser Dissertationsschrift vorwiegend die CHEN-Notation genutzt.

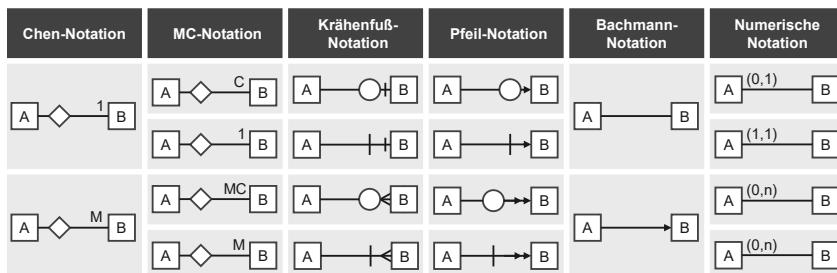


Abbildung 4-9: Alternative Notationen für Entity-Relationship-Modelle (BALZERT 2009, S. 202)

Neben der visuellen Darstellung von ER-Modellen hat STOREY 1991 ein Vorgehen zu deren Erstellung entwickelt, das inzwischen in der Forschung und Entwicklung Anwendung findet (s. STOREY 1991, S. 49ff.; s. COHEN U. GIL 2021, S. 4). Daraufhin haben COHEN U. GIL das Vorgehen von STOREY adaptiert und vier Schritte definiert (s. COHEN U. GIL 2021, S. 4; s. STOREY 1991, S. 49): (1) Literaturrecherche, (2) Einbindung von Stakeholdern, (3) Entwicklung des Informationsmodells und (4) Validierung mithilfe von Fallstudien. In Schritt (1) und (2) wird laut COHEN U. GIL ein Verständnis für das zu modellierende System geschaffen, um die konkreten Problemstellungen zu identifizieren und Fallstudien zu entwickeln (s. COHEN U. GIL 2021, S. 4). Schritte (3) und (4)

umfassen die Gestaltung des ER-Modells sowie deren Validierung anhand konkreter Fallstudien aus der Praxis (s. COHEN U. GIL 2021, S. 4). Überdies hat STOREY den Schritt der Modellierung stärker fokussiert und vertieft (s. STOREY 1991, S. 49). Demnach ist es notwendig, zunächst die Entitätstypen und ihre Attribute zu identifizieren, bevor die Beziehungstypen samt Attributen erfasst werden (s. STOREY 1991, S. 49f.). Anhand einer fokussierten iterativen Überprüfung auf Modellierungsfehler und -probleme wird im Anschluss die Anwendbarkeit und Praxisnäher sichergestellt (s. STOREY 1991, S. 49f.). Das vorgestellte Vorgehen bildet die Basis der Vorgehensweise, die im Rahmen dieser Dissertationsschrift angewandt wird. Dadurch wird eine wissenschaftliche und sachlogische Fundiertheit der Modellierung sichergestellt.

4.3 Konkretisierung der Vorgehensweise

Ausgehend von der Zielstellung einer Informationsmodellierung zur Umsetzung von Kreislaufstrategien für Investitionsgüter in zirkulären Ökosystemen werden drei Beschreibungsmodelle, ein Erklärungsmodell und ein rollenspezifisches Informationsmodell entwickelt. Angelehnt an die zentralen betriebswirtschaftlichen Erkenntnisziele wird damit die komplexe Wirklichkeit zunächst mithilfe wissenschaftlicher Modelle beschrieben und in einer Weise verknüpft, dass die Komplexität erklärt werden kann. Die Adaptivität und Modularität dieses Vorgehens erlauben eine strukturierte Erarbeitung der Inhalte dieser Dissertationsschrift. Unter Berücksichtigung einer sich konstant verändernden Umwelt lassen sich dadurch zukünftige Fortschritte in Technologie und Politik einbeziehen und ermöglichen eine langfristige Anwendbarkeit und Adoptionsmöglichkeit. Dazu gilt es, übergreifend die folgende Forschungsfrage zu beantworten:

Wie lassen sich Produktinformationen mit den Rollen für die Umsetzung von Kreislaufstrategien verknüpfen und in einem Informationsmodell zusammenführen?

Diese Forschungsfrage beruht auf der offenen Herausforderung, dass für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft Ökosysteme etabliert werden müssen und in ebendiesen Informationen zwischen Akteuren geteilt werden, um eine ökonomische Rentabilität zu erreichen (s. O'CONNOR ET AL. 2016, S. 5884; s. WALDEN ET AL. 2021, S. 1717). Das Ziel dieser Dissertationsschrift ist somit die Modellierung und Verknüpfung von Rollen der Kreislaufwirtschaft und Produktinformationen zur Umsetzung von Kreislaufstrategien. Die Informationsmodellierung liefert die adressatenspezifische Aufbereitung der Erkenntnisse für Softwareingenieure und Führungskräfte. Die einzelnen Beschreibungsmodelle und das Erklärungsmodell sind daher aufeinander aufbauend gestaltet und stehen in direkter Abhängigkeit zueinander. Abbildung 4-10 veranschaulicht die Vorgehensweise und Interdependenz der Modelle dieses Dissertationsvorhabens. Im Folgenden wird auf die einzelnen Modelle näher eingegangen.

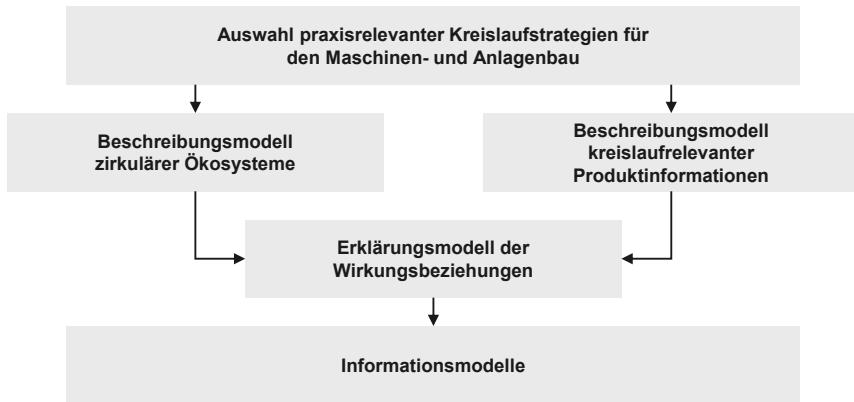


Abbildung 4-10: Konkretisierung der Vorgehensweise (eigene Darstellung)

Die Notwendigkeit einer Eingrenzung auf praxisrelevante Kreislaufstrategien für Investitionsgüter resultiert aus Diskussionen mit Industrievertretern und einer Untersuchung aktueller Literatur (s. Unterkapitel 3-3). Insbesondere in Gesprächen mit Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus wurde festgestellt, dass noch kein ausreichendes Verständnis des Konzepts der Kreislaufwirtschaft zum Zeitpunkt der Identifikation dieses Dissertationsvorhabens im Jahr 2021 erreicht wurde, um eine Anwendung auf Produkte der Gesprächspartner durchführen zu können. Aufgrund dessen wurde die erste Forschungsfrage wie folgt gewählt:

Welche Kreislaufstrategien existieren für Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus?

Das Ziel der Exploration von Kreislaufstrategien im Maschinen- und Anlagenbau ist die Eingrenzung des Betrachtungsraums auf vielversprechende Lösungen für Investitionsgüter. Das Vorgehen bezieht dazu jeweils wissenschaftliche und praktische Quellen ein, die eine Ableitung vorteilhafter Kreislaufstrategien ermöglichen.

Aufgrund der Auswirkungen der praktischen Umsetzung von Kreislaufstrategien über die Systemgrenzen des eigenen Unternehmens hinweg ist eine unternehmensübergreifende Betrachtung erforderlich. Dieser Erkenntnis folgend wird der Ökosystemansatz gewählt, um Implikationen ausgewählter Kreislaufstrategien auf vernetzte Akteure des Ökosystems zu untersuchen und zu beschreiben. Das Beschreibungsmodell zirkulärer Ökosysteme untersucht entsprechend die folgende Forschungsfrage:

Welche Rollen sind für die Umsetzung der Kreislaufstrategien notwendig und in welchen Beziehungen müssen diese zueinander stehen?

Dieses Beschreibungsmodell zielt darauf ab, die Rollen und Beziehungen im Ökosystem wissenschaftlich zu beschreiben, sodass in die Kreislaufwirtschaft eintretende Unternehmen in die Lage versetzt werden, ein solches Ökosystem eigenständig aufzubauen oder zu orchestrieren. Im Rahmen der Modellierung werden zunächst vorhandene, etablierte Ökosysteme als Fallstudien identifiziert, um daraus allgemeingültige

Rollen und Beziehungen abzuleiten. Dazu wird sich auf die Methoden der Fallstudienforschung und Ökosystemmodellierung (s. Unterabschnitt 4.2.4 und 4.2.5) gestützt.

Vor dem Hintergrund der übergeordneten Forschungsfrage ist neben der Rollen- auch eine Informationsbetrachtung erforderlich. Die Untersuchung von Produktinformationen, die der Umsetzung von Kreislaufstrategien zuträglich sind, resultiert aus der Forschungs- und Wissenslücke digitaler Informationsbestandteile für unternehmensübergreifende Datenbanken. Wie in Unterabschnitt 3.2.3 und Abschnitt 3.3 näher erläutert, beschränken sich die derzeitigen Aktivitäten auf die Entwicklung einer allgemeingültigen Architektur und nicht auf die anwendungsspezifischen Inhalte ebendieser. Demnach wird im zweiten Beschreibungsmodell der folgenden Forschungsfrage nachgegangen:

Welche Produktinformationen werden für die Umsetzung der Kreislaufstrategien benötigt und wie können diese klassifiziert werden?

Das zweite Beschreibungsmodell dient dazu, die erforderlichen Produktinformationen zu identifizieren und zu klassifizieren. Dazu wird anhand einer Anforderungsanalyse ein Katalog mit Informationskategorien erstellt, der als Basis der Untersuchung der existierenden Informationslandschaft dient. In der Klassifizierung wird sich auf die Methoden aus Unterabschnitt 4.2.3 gestützt.

Im anschließenden Erklärungsmodell werden die Wirkungsbeziehungen zwischen den Rollen im Ökosystem sowie den ausgewählten Informationseinheiten untersucht, um die folgende Forschungsfrage zu lösen:

Wie lassen sich die Produktinformationen mit den Rollen verknüpfen und in einem Informationsmodell vereinen?

Im Gegensatz zur Beschreibung der Sachverhalte wird damit ein Erklärungsziel verfolgt, das die Grundlage zur Erstellung des finalen Informationsmodells darstellt. Im Rahmen dieses Modells wird analysiert, wie die wechselseitigen Wirkungsbeziehungen zwischen den definierten Rollen und den identifizierten Informationseinheiten erklärt werden können. Damit wird ein zentrales Erkenntnisinteresse der vorliegenden Dissertationsschrift verfolgt.

Das Erklärungsmodell wird zum Abschluss des Dissertationsvorhabens in ein nutzbares Informationsmodell für Softwareingenieure überführt, sodass eine Basis für den Aufbau von digitalen Produktpässen für Kreislaufstrategien im Maschinen- und Anlagenbau geschaffen werden kann. Dadurch wird neben dem Produktkreislauf auch ein Informationskreislauf etabliert, der erheblich dazu beiträgt, die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Kreislaufwirtschaft positiv zu beeinflussen.

4.4 Zwischenfazit

Kapitel vier diente der Herleitung des Konzeptansatzes für diese Dissertationsschrift. Zunächst wurden die Anforderungen an die zu entwickelnden Modelle auf formaler und inhaltlicher Ebene definiert. Die formalen Anforderungen beinhalten die Grundsätze

der korrekten Modellierung und stellen damit eine angemessene Güte und Qualität der vorgestellten Forschung sicher. Dazu basiert diese Dissertationsschrift auf den Grundsätzen der Richtigkeit, der Relevanz, der Abstraktion, der Klarheit und Handhabbarkeit sowie der Wirtschaftlichkeit. Die inhaltlichen Anforderungen grenzen den Untersuchungsbereich ein und gewährleisten eine korrekte thematische Ausrichtung des Dissertationsvorhabens. Dies umfasst eine Auswahl von Kreislaufstrategien für Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus, die Beschreibung relevanter Ökosysteme, die Auswahl relevanter Informationsentitäten sowie deren Wirkungsbeziehungen. Ferner wurden Anforderungen an die innere Konsistenz, die Visualisierbarkeit und die Adaptierbarkeit der Ergebnisse gestellt.

Neben den inhaltlichen und formalen Anforderungen diente Kapitel vier zur Präsentation der erforderlichen methodischen Grundlagen. Dazu wurden zunächst das Systemdenken und die allgemeine Modelltheorie näher erläutert, bevor auf die Modellmethoden dieser Dissertationsschrift eingegangen wurde. Die vorgestellten Methoden beinhalten die Klassifizierung und Typisierung, die Fallstudienforschung, die Ökosystemmodellierung sowie die Informationsmodellierung. Aufbauend auf den Anforderungen und methodischen Grundlagen wurde in Unterkapitel 4.3 anschließend die Vorgehensweise dieser Dissertationsschrift konkretisiert. Zunächst wurden praxisrelevante Kreislaufstrategien für den Maschinen- und Anlagenbau ausgewählt und für den betrachteten Anwendungsfall bewertet. Diese Eingrenzung erlaubte anschließend eine spezifische Beschreibung von Rollen und Beziehungen strategiespezifischer zirkulärer Ökosysteme im darauffolgenden Beschreibungsmodell. Im dritten Beschreibungsmodell wurde auf Basis der Kreislaufstrategien die inhaltliche Informationsbasis für den Austausch im Ökosystem entwickelt. Zusammengeführt wurden die Beschreibungsmodelle im Erklärungsmodell, in dem die wechselseitigen Wirkungsbeziehungen zwischen den Ökosystemrollen und Informationskategorien verdeutlicht werden. Dieses Modell resultiert in einem Informationsmodell, das neben dem Produktkreislauf die Grundlage eines Informationskreislaufs schafft und damit positiv zur ökonomischen Prävalenz ausgewählter Kreislaufstrategien im Maschinen- und Anlagenbau beiträgt.

5 Detaillierung des Informationsmodells

In den vorherigen Kapiteln wurde die Vorgehensweise zur Zielerreichung dieser Dissertationsschrift vorgestellt. Kapitel 5 verfolgt die Zielstellung, die spezifischen Modelle dieses Dissertationsvorhabens herzuleiten und zu detaillieren. In Unterkapitel 5.1 wird zunächst eine Auswahl von Kreislaufstrategien für Investitionsgüter des Maschinen- und Anlagenbaus durchgeführt. Unter Berücksichtigung der Forschungsmethodik nach BOCKEN ET AL. wird zunächst aus der wissenschaftlichen Literatur eine Auflistung der existierenden Kreislaufstrategien erstellt, bevor diese mithilfe von Geschäfts- und Nachhaltigkeitsberichten aus dem Maschinen- und Anlagenbau auf ihre Anwendbarkeit untersucht werden (vgl. BOCKEN ET AL. 2014). Das darauffolgende Unterkapitel 5.2 spezifiziert das Beschreibungsmodell des zirkulären Ökosystems. Anhand von Fallstudien und bestehender Literatur werden Rollen und Beziehungen zwischen Akteuren im zirkulären Ökosystem identifiziert. Daraus wird abgeleitet, zwischen welchen Entitäten in der Umsetzung von Kreislaufstrategien ein Informationsaustausch stattfinden muss. Nachfolgend wird in Unterkapitel 5.3 eine Klassifizierung von Produktinformationen in Form des dritten Beschreibungsmodells entwickelt. Mithilfe einer Anforderungsanalyse wird der Informationsbedarf identifiziert, mit den verfügbaren Informationsentitäten abgeglichen und anschließend in einer Klassifizierung strukturiert. In Unterkapitel 5.4 wird auf Basis der entwickelten Partialmodelle des zirkulären Ökosystems und der identifizierten Produktinformationen für die ausgewählten Kreislaufstrategien ein Erklärungsmodell konzipiert. Die darin untersuchten Wirkungsbeziehungen geben Aufschluss über das Systemverhalten eines vernetzten, zirkulären Ökosystems. Im Rahmen von Unterkapitel 5.5 werden die Erkenntnisse des Erklärungsmodells in ein anwendbares Informationsmodell überführt, das Softwareingenieure in der Wissensformalisierung unterstützt. Abbildung 5-1 visualisiert den Aufbau von Kapitel 5 und den darin enthaltenen Modellen.

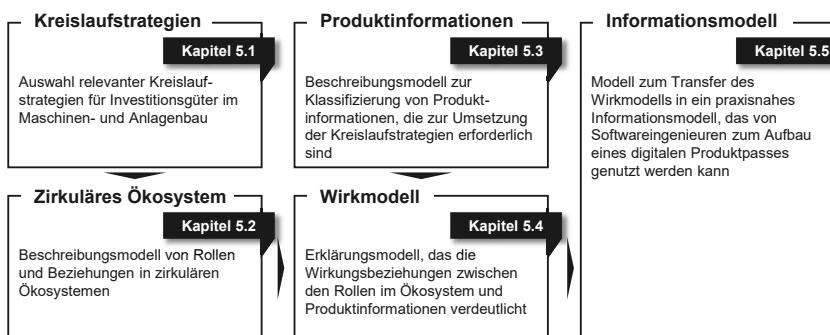


Abbildung 5-1: Aufbau von Kapitel 5 und Modellübersicht (eigene Darstellung)

5.1 Identifikation und Auswahl praxisrelevanter Kreislaufstrategien

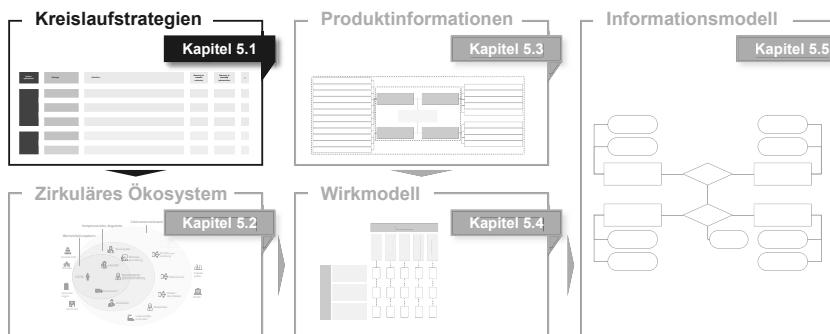


Abbildung 5-2: Identifikation und Auswahl praxisrelevanter Kreislaufstrategien (eigene Darstellung)

Dieses Unterkapitel dient der Beantwortung der ersten eingrenzenden Forschungsfrage:

Welche Kreislaufstrategien existieren für Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus?

Diese Forschungsfrage wird auf eine praktische Problemstellung zurückgeführt, die im Vorfeld dieser Dissertationsschrift in verschiedenen Interviews mit Experten aus der produzierenden Industrie identifiziert wurde. Es wurde festgestellt, dass zwar das Servicegeschäft einen strategisch relevanten Stellenwert im Unternehmen entwickelt hat, dies jedoch nicht im Rahmen übergreifender Kreislaufstrategien betrachtet wird. Demnach stellen die Modifikation und Generalüberholung von bestehenden Maschinen und Anlagen zwar einen lukrativen und sicheren Markt dar, allerdings wird dies nur individuell betrachtet. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse lässt sich feststellen, dass Kreislaufstrategien eine strategische Relevanz entwickeln, jedoch ein Verständnis über existierende, umsetzbare Kreislaufstrategien fehlt. Aus wissenschaftlicher Sicht besteht bisher kein Konsens über den Umfang und die Definitionen von Kreislaufstrategien (s. Unterkapitel 3.3), sodass im Rahmen dieses Unterkapitels zunächst ein einheitliches Verständnis geschaffen und anschließend eine Auswahl für den Anwendungsbereich des Maschinen- und Anlagenbaus getroffen wird.

Das methodische Vorgehen erfolgt dazu in drei Schritten angelehnt an BOCKEN ET AL. (s. BOCKEN ET AL. 2014, S. 45). Zunächst wird im Zuge einer systematischen Literaturrecherche eine wissenschaftlich fundierte Übersicht existierender Kreislaufstrategien erstellt (s. Unterabschnitt 5.1.1). Daraufhin werden die identifizierten Kreislaufstrategien kategorisiert und auf kongruente Definitionen verglichen, um ein einheitliches Verständnis in dieser Dissertationsschrift zu erzielen (s. Unterabschnitt 5.1.2). Abschließend werden mithilfe von Fallstudien aus der produzierenden Industrie eine Bewertung und Validierung der Kreislaufstrategien durchgeführt, um ihre Anwendbarkeit für Investitionsgüter des Maschinen- und Anlagenbaus feststellen zu können (s.

Unterabschnitt 5.1.3). Das Ergebnis stellt die Auswahl relevanter Kreislaufstrategien für den weiteren Verlauf der Dissertationsschrift dar und wird durch eine Klassifizierung relevanter Kreislaufstrategien erweitert. Das Vorgehen von Abschnitt 5.1 ist in der folgenden Abbildung 5-3 visualisiert.

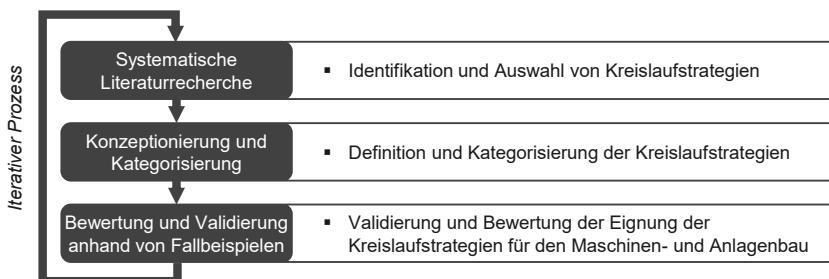


Abbildung 5-3: Forschungsmethodik nach BOCKEN ET AL. (eigene Darstellung i. A. a. BOCKEN ET AL. 2014, S. 45)

5.1.1 Literaturbasierte Ableitung von Kreislaufstrategien

Aufbauend auf dem aktuellen Stand der Erkenntnisse aus Unterkapitel 3.2 und dem grundlegenden Verständnis aus Unterabschnitt 2.2.3 dient das vorliegende Unterkapitel der Untersuchung existierender Kreislaufstrategien aus der wissenschaftlichen Literatur. In Unterabschnitt 3.2.1 wurde bereits eine umfangreiche systematische Literaturrecherche für existierende Kreislaufstrategien vorgestellt, die die Grundlage der folgenden Analyse darstellt. Abbildung 3-3 beschreibt den Auswahlprozess der Literaturrecherche, in dem 17 wissenschaftliche Arbeiten für die Auswertung identifiziert und ausgewählt wurden. Eine tiefergehende Analyse der Beiträge zeigt, dass nicht alle Ansätze eine Einordnung anwendbarer Kreislaufstrategien zum Ziel haben. Demnach wurde in drei der ausgewählten Quellen nicht auf spezifische Kreislaufstrategien eingegangen; daher werden diese nicht weiter für die Ableitung der Kreislaufstrategien berücksichtigt. KLENK ET AL. untersuchen zirkuläre Produktionsnetzwerke mithilfe einer optimierten Simulation und fokussieren vor diesem Hintergrund die Geschäftsmodellentwicklung und die Erfolgswahrscheinlichkeit des Netzwerks (s. KLENK ET AL. 2020, S. 129). Einen Beitrag zur Auswahl relevanter Kreislaufstrategien können sie nicht leisten. O'CONNOR ET AL. fokussieren in ihrer Forschung die Elektronikindustrie vor dem Hintergrund der Ressourcenknappheit Seltener Erden (s. O'CONNOR ET AL. 2016, S. 5879). Dazu leiten die Autoren acht spezifische Strategien ab, die zur Materialsicherheit in der Elektronikindustrie beitragen und für Investitionsgüter nur eine untergeordnete Rolle spielen (s. O'CONNOR ET AL. 2016, S. 5882ff.). Im dritten Artikel von VANEGAS ET AL. untersuchen die Autoren lediglich den Prozess der Demontage, der nicht als eigenständige Kreislaufstrategie definiert wird (s. VANEGAS ET AL. 2018). VANEGAS ET AL. motivieren ihre Arbeit zwar mit der Umsetzung des *Reuse* und des *Remanufacturing*, gehen jedoch nicht näher darauf ein. Abbildung 5-4 zeigt die inhaltliche

Übersicht der verbleibenden 14 wissenschaftlichen Artikel mit einer Auflistung der genannten Kreislaufstrategien.

Autoren		ACHTERBERG ET AL. (2016)	ALAMEREV U. BRISSAUD (2019)	BLOOMSA ET AL. (2019)	BUCHBERGER ET AL. (2019)	KRISTOFFERSEN ET AL. (2020)	KRONENBERG ET AL. (2021)	LEIDER ET AL. (2017)	LINTON U. JAYARAMAN (2005)	POTTING ET AL. (2017)	PRIETO-SANDOVAL ET AL. (2019)	REIKE ET AL. (2018)	SCHMIDT ET AL. (2019)	SIVONEN U. RITOLA (2015)	WALKER ET AL. (2018)
Kreislaufstrategie															
Refuse, Reinvent			X	X	X							X			
Rethink	X		X	X	X					X	X		X		X
Reduce, Restore			X	X	X					X	X	X		X	
Retrofit			X		X			X							
Repair	X	X	X	X	X			X	X	X	X			X	X
Reuse	X		X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X
Refurbish	X	X	X	X	X				X		X			X	X
Remanufacture	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X		
Repurpose			X	X	X	X			X		X			X	
Recycle	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X			X	X
Cascade			X		X										
Recover			X	X	X				X		X			X	X
Remine											X				

Abbildung 5-4: Übersicht wissenschaftlich beschriebener Kreislaufstrategien (eigene Darstellung)

Aus der Übersicht der verbleibenden 14 wissenschaftlichen Arbeiten kann abgeleitet werden, dass das Themenfeld der Kreislaufstrategien breit gefasst ist. Neben den vier Zyklen *Instandhaltung*, *Wiederverwendung*, *Wiederaufbereitung* und *Recycling*, die von der ELLEN MACARTHUR FOUNDATION definiert wurden, werden in der aktuellen wissenschaftlichen Literatur weitere neun Kreislaufstrategien einbezogen (s. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2013, S. 24). In der Produktentwicklungsphase werden mit den Strategien *Refuse*, *Rethink* und *Reduce* Maßnahmenbündel identifiziert, die bereits vor Produktherstellung und -nutzung die ökologischen Auswirkungen reduzieren. Hervorzuheben ist, dass die Strategie des *Retrofit* von existierenden Investitionsgütern in der Wissenschaft eine weniger starke Bedeutung für die Kreislaufwirtschaft erfährt. In der wissenschaftlichen Literatur dominieren die Kreislaufstrategien des *Reuse*, *Repair*, *Refurbish* und *Remanufacture* in den betrachteten Artikeln. Gleichwohl wird das *Recycling* in der Vielzahl der Beiträge beschrieben und manifestiert damit die Notwendigkeit, Rohstoffe am Lebenszyklusende sortenrein in den Kreislauf zurückzuführen zu

müssen. Weiterhin werden zusätzliche Abstufungen für die Rohstoffwiederverwendung definiert, die von einer Kaskadierung zu minderwertigeren Materialien bis zur Materialbeschaffung auf Abfalldeponien (hier: *Remine*) reicht. Die detaillierten Definitionen sowie eine Kategorisierung der Kreislaufstrategien folgen im nächsten Unterabschnitt 5.1.2.

5.1.2 Definition und Kategorisierung der Kreislaufstrategien

Basierend auf der Literaturrecherche und Auswertung des vorherigen Abschnitts werden im Folgenden Kategorien und Definitionen der identifizierten Kreislaufstrategien abgeleitet. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Abbildung 5-5 dargestellt. Die 13 identifizierten Strategien lassen sich in vier übergreifende Kategorien einordnen, die entlang des Produktlebenszyklus verlaufen. Die Kategorien orientieren sich an der Einteilung von POTTING ET AL., die in ihrem Beitrag Kreislaufstrategien im Lebenszyklus anordnen und eine Priorisierung vornehmen (s. POTTING ET AL. 2017, S. 4). Nach POTTING ET AL. sind ebensolche Kreislaufstrategien vorzuziehen, die früh im Produktlebenszyklus umgesetzt werden können (s. POTTING ET AL. 2017, S. 4). Eine höhere Auslastung durch innovative Geschäftsmodelle ist demnach einer reinen Lebensdauerverlängerung zu bevorzugen (s. POTTING ET AL. 2017, S. 4). POTTING ET AL. kategorisieren in die drei Kategorien der *intelligenten Produktnutzung und -herstellung*, der *Lebensdauerverlängerung des Produkts und seiner Komponenten* sowie der *sinnvollen Verwendung der Materialien* (s. POTTING ET AL. 2017, S. 5). Eine alternative Kategorisierung liefern REIKE ET AL. in ihrem Beitrag. Dort gruppieren sie in *kundennahe, produktaktualisierende* und *entsorgende* Kreislaufstrategien (s. REIKE ET AL. 2018, S. 256). BLOMSMA ET AL. erweitern die bisher beschriebenen Kategorien um eine Unterscheidung zwischen Strategien im aktuellen Nutzungszyklus und in neuen Nutzungszyklen bei bspw. abweichenden Nutzern (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 14; s. KRISTOFFERSEN ET AL. 2020, S. 250). Der Verfasser dieser Dissertationsschrift folgt der Argumentation von BLOMSMA ET AL. Es werden die vier Kategorien der *zirkulären Produktentwicklung*, des *unternehmensinternen Werterhalts*, des *unternehmensübergreifenden Werterhalts* und der *Nutzung der Rohstoffe* definiert (s. Abbildung 5-5). Die Kategorie der *zirkulären Produktentwicklung* umfasst Kreislaufstrategien der Ideenfindung, Produktgestaltung und -herstellung, die zu Anfang des Lebenszyklus vor der Nutzungsphase Verwendung finden. Daran anschließend wird die Lebensdauerverlängerung in unternehmensintern und unternehmensübergreifend aufgeteilt. Neben den Vorarbeiten von BLOMSMA ET AL. zeigt sich in den betrachteten Fallstudien aus Abschnitt 5.2, dass beim Remanufacturing von Komponenten und mobilen Maschinen ein Eigentümerwechsel stattfindet. Insbesondere für das Geschäftsmodell und Wertversprechen des Remanufacturings ist ein Eigentümerwechsel relevant. Ebenjene Produkte werden demnach zwischen Nutzungszyklen aufbereitet, sind daher in der Regel vorrätig verfügbar und bieten neben dem Preis auch einen Zeitvorteil (s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 6; s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 10). Der *unternehmensinterne Werterhalt* beschreibt daher Vorgehensweisen zur Instandhaltung und Aktualisierung von Maschinen und Anlagen in der Nutzungsphase bei einem Nutzer. Der *unternehmensübergreifende Werterhalt*

ist definiert durch eine Weiterverwendung von Maschinen und Anlagen unter einem neuen Nutzer und schließt ggf. erforderliche Aufbereitungsmaßnahmen ein. Abschließend beschreibt die Kategorie der *Nutzung der Rohstoffe* potenzielle Kreislaufstrategien zur Rückgewinnung von Materialien oder von der in ihnen enthaltenen Energie.

Kategorie	Strategie	Definition
Zirkuläre Produktentwicklung	Refuse, Reinvent	Das Produkt als solches wird obsolet, indem seine Funktionen in andere Produkte integriert werden
	Rethink	Steigerung der Produktlebensdauer und Auslastung durch technische Anpassungen und neue Geschäftsmodelle
	Reduce, Restore	Reduktion des Ressourceneinsatzes in der Produktion sowie Nutzung von Sekundärmaterialien
Unternehmens-interner Werterhalt	Retrofit	Verlängerung des Lebenszyklus durch Erweiterung des Funktionsumfangs eines bestehenden Produkts
	Repair	Instandhaltung des Produkts, sodass seine Funktionalität erhalten bleibt
Unternehmens-übergreifender Werterhalt	Reuse	Weiterverwendung eines unveränderten Produkts durch einen anderen Kunden
	Refurbish	Funktionelle und optische Instandsetzung eines Produkts, um einen möglichst originalgetreuen Zustand herzustellen
	Remanufacture	Funktionelle und optische Instandsetzung eines Produkts auf den Originalzustand
	Repurpose	Einsatz von gebrauchten Komponenten in einem neuen Produkt mit sich unterscheidender Funktionalität
Nutzung der Rohstoffe	Recycle	Verarbeitung von Materialien aus gebrauchten Produkten, um Rohstoffe mit gleicher oder ähnlicher Qualität herzustellen
	Cascade	Verarbeitung von Materialien aus gebrauchten Produkten, um Rohstoffe mit niedrigerer Qualität herzustellen
	Recover	Thermische Verwertung von Material aus gebrauchten Produkten
	Remine	Rohstoffgewinnung aus Abfalldeponien

Abbildung 5-5: Übersicht der kategorischen Einordnung und Definitionen der Kreislaufstrategien (eigene Darstellung)

In Abbildung 5-5 werden die vier Kategorien und die identifizierten Kreislaufstrategien aufgezeigt. Eine umfangreiche Definition der Kreislaufstrategien findet im Folgenden statt.

Refuse, Reinvent

Die Kreislaufstrategie *Refuse* und *Reinvent* basiert auf dem Grundsatz der Vermeidung. Ein Produkt wird so gestaltet, dass es selbst redundant und obsolet wird (s. BUCHBERGER ET AL. 2019, S. 12). Das Ziel ist die Integration der Funktionen in andere Produkte. Eine Umsetzung der Strategie wird bspw. durch eine radikale Änderung in der Gestaltung oder neue Technologien erreicht und kann zu einer ganzheitlichen Aufgabe des Produkts führen (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 16; s. POTTING ET AL. 2017, S. 15). Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Dissertationsschrift ist nicht bekannt, dass der *Refuse*-Ansatz in der Industrie explizit mit dem Ziel der Ressourcenreduktion

angewandt wird (s. BUCHBERGER ET AL. 2019, S. 12). Als Beispiel für eine konkrete Umsetzung kann die Verwendung von Mehrwegutensilien in Abholrestaurants und Cafés genannt werden. Zuvor genutzte Einwegartikel werden dadurch kontinuierlich abgelöst (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 16).

Rethink

Unter der Kreislaufstrategie *Rethink* werden in der Literatur zwei Definitionen zusammengefasst. Zum einen wird darunter eine geometrische und technische Produktveränderung durch langlebige Materialien zur Lebensdauerverlängerung von Produkten verstanden (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 16; s. BOCKEN ET AL. 2016, S. 310). Zum anderen beschreibt diese Kreislaufstrategie die Veränderung des Geschäftsmodells und des Nutzungsverhaltens durch die Kunden, um die Auslastung des Produkts zu erhöhen (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 16; s. BOCKEN ET AL. 2016, S. 312). BOCKEN ET AL. referenzieren dazu auf TUKKER, der bereits 2004 identifizierte, dass Sharing-Konzepte einen positiven, ökologischen Effekt haben und ein bewusster Konsum der Kundschaft gefördert werden kann (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 16; s. TUKKER 2004, S. 256). Eine erfolgreiche Anwendung der *Rethink*-Strategie stellen gängige Sharing-Modelle von Mobilitätslösungen, z. B. im Pkw- und E-Scooter-Bereich, dar (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 16). Der positive Umwelteffekt dieses Geschäftsmodells wurde von DABBOUS U. TARHINI in einer empirischen Studie belegt, in der Sharing-Geschäftsmodelle aus OECD-Ländern zwischen 2004 und 2018 verglichen wurden (s. DABBOUS U. TARHINI 2021, S. 64).

Reduce, Restore

POTTING ET AL. definieren die Kreislaufstrategie des *Reduce* oder *Restore* als Ansatz, um in der Produktentstehungs- und Nutzungsphase die Effizienz zu erhöhen, indem weniger Materialien und natürliche Ressourcen eingesetzt werden (s. POTTING ET AL. 2017, S. 16). BLOMSMA ET AL. erweitern diese Definition um die Zielgröße des *Gentani*. Aus dem Japanischen übersetzt bedeutet das, einen Herstellungsprozess mit minimal möglichem Ressourceneinsatz zu betreiben (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 16). Neben einer Weiterverwendung ungenutzter Ressourcen im Sinne einer industriellen Symbiose können auch Sekundärmaterialien verwendet werden, um den Ressourceneinsatz zu reduzieren (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 16; s. MESTRE U. COOPER 2017, 1626). Unter industrieller Symbiose werden lokale, industrielle Cluster verstanden, in denen ein reger Ressourcenaustausch stattfindet, um gegenseitig Abfallprodukte weiterverwenden zu können (s. CHATZIDIMITRIOU ET AL. 2021, S. 761). Um *Reduce*-Strategien umsetzen zu können, stehen Unternehmen im Entwicklungsprozess zudem einige technische Designstrategien zur Verfügung (s. MESTRE U. COOPER 2017, 1626):

- Auswahl von Materialien mit niedrigem Umwelteinfluss (z. B. Sekundärmaterialien)
- Reduktion der Materialnutzung (z. B. Gewichtsreduktion)
- Optimierung der Produktionstechnologien (z. B. Prozessschrittreduktion)
- Optimierung des Vertriebs (z. B. wiederverwendbare Verpackungen)

- Reduktion des Umwelteinflusses während der Nutzungsphase (z. B. Energieverbrauchsreduktion)
- Optimierung des initialen Lebenszyklus (z. B. modulare Produktstruktur)
- Optimierung des Lebenszyklusendes (z. B. Produktwiederverwendung)
- Entwicklung neuer Konzepte (z. B. Dematerialisierung)

Die vorgestellten Designstrategien bilden Ansätze zur Anpassung an die Produktstruktur, bieten aber ein erhöhtes Potenzial in Kombination mit weiteren Kreislaufstrategien. Demnach beeinflussen neue Geschäftsmodelle das Produktdesign oder implizierte Aufbereitungsprozesse den Modularisierungsgrad eines Produkts.

Retrofit

Unter *Retrofit* wird die Verlängerung der Nutzungsphase eines Produkts verstanden, indem sein Wert und seine Funktionalität im Vergleich zu vorherigen Versionen gesteigert werden (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17; s. LINTON U. JAYARAMAN 2005, S. 1814). Dazu werden in der Regel ästhetische oder funktionale Upgrades durchgeführt, die bspw. Neulackierungen und Softwareupdates beinhalten (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17). In der Praxis ist das Retrofitting bereits in Produkten des Elektronik- und Softwarebereichs sowie in militärischen Produkten etabliert (s. LINTON U. JAYARAMAN 2005, S. 1814). Das Retrofitting wird durch den Hersteller, den Kunden oder einen Dritten durchgeführt, allerdings werden die erforderlichen Aktualisierungsbestandteile in der Regel vom ursprünglichen Hersteller entwickelt und zur Verfügung gestellt (s. LINTON U. JAYARAMAN 2005, S. 1815).

Repair

Der Ausgangspunkt der *Repair*-Strategie ist in der Regel ein nicht vollständig funktionsfähiges Produkt, das wieder in den Zustand voller Funktionsfähigkeit gebracht wird (s. ALAMEREW U. BRISSAUD 2019, S. 176; s. BUCHBERGER ET AL. 2019, S. 13–14). Der Grundgedanke dieser Strategie ist der Wert- und Funktionserhalt des Produkts für einen langen Lebenszyklus, sodass bereits in der Produktentwicklung die Reparierbarkeit beachtet werden muss (s. BUCHBERGER ET AL. 2019, S. 14). Ein üblicher Umfang der *Repair*-Strategie beinhaltet die Bereitstellung von Ersatzteilen und Verbrauchsmaterialien sowie das Angebot von Reparatur- und Wartungsdienstleistungen (s. SCHMIDT ET AL. 2019, S. 4). In der Instandhaltung von Maschinen und Anlagen wird die *Repair*-Strategie für Investitionsgüter bereits sehr aktiv verfolgt.

Reuse

Die Kreislaufstrategie des *Reuse* wird der Kategorie *Unternehmensübergreifender Werterhalt* zugeordnet, da in der Regel ein Eigentümerwechsel stattfindet. *Reuse* beschreibt die Verlängerung des natürlichen Produktlebenszyklus mit vollständiger Funktionstüchtigkeit, indem es in einem neuen Kontext (z. B. neuer Nutzer oder Standort) verwendet wird (s. POTTING ET AL. 2017, S. 13; s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17; s. BUCHBERGER ET AL. 2019, S. 13; s. KLENK ET AL. 2019, S. 29). In der Literatur umfassen die Definitionen insbesondere vollständige und intakte Endprodukte, wohingegen die

Weiterverwendung von Baugruppen und Komponenten an eine einfache Demontage gekoppelt ist (s. VANEGAS ET AL. 2018, S. 324–325; s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17). Umgesetzt wird die Reuse-Strategie oft über Sekundärmarkte, deren Größe mit dem Erfolg des Internets kontinuierlich gesteigert werden konnte. Allerdings beschreiben BUCHBERGER ET AL. auch zwei Herausforderungen, die eine flächendeckende Umsetzung des Reuse bisher verhindert haben (s. BUCHBERGER ET AL. 2019, S. 13): Zum einen erfordert die Nutzung über mehrere Lebenszyklen ein entsprechend ausgelegtes Produktdesign und zum anderen setzen derzeitige Marktmechanismen keine monetären Anreize für Hersteller, eine langfristige Produktnutzung zu gewährleisten (s. BUCHBERGER ET AL. 2019, S. 13). Im privaten Handel wird die Reuse-Strategie bereits aktiv angewendet, z. B. über Plattformen wie *eBay* oder *kleinanzeigen* (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17). Sobald ein Produkt das Lebenszyklusende bei einer Privatperson erreicht hat, wird es auf dem Gebrauchtmarkt weiterverkauft und findet eine Anwendung unter einem neuen Nutzer.

Refurbish

Die Kreislaufstrategie *Refurbish* beschreibt das funktionelle und optische Instandsetzen von Produkten und Komponenten, um ein definiertes Qualitätsniveau zu erreichen, das geringer als das Originale ist (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17; s. THIERRY ET AL. 1995, S. 119). Neben einer Reinigung von Oberflächen und einem Austausch von defekten Komponenten beinhaltet das Refurbishment auch die Überarbeitung von Bauteilen, um geometrische Maße einzuhalten und Bauteilgruppen anzugeleichen (s. LUND 1984, S. 4). Die Qualitätsstandards sind dazu geringer als für Originalteile, weshalb die Produktqualität in der Regel unterhalb der von Neuprodukten liegt und eine kürzere Restlebensdauer zu erwarten ist (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17; s. THIERRY ET AL. 1995, S. 119). Herausforderungen dieser Strategie liegen in der Sammlung gebrauchter Ware als Hersteller sowie im Entwerfen eines Refurbishment-Prozesses, um das gewünschte Qualitätsniveau zu erreichen (s. BUCHBERGER ET AL. 2019, S. 14). Populär ist der Ansatz des *Refurbishments* hauptsächlich in der Konsumgüterelektronik, deren Angebot an überholten (engl. *refurbished*) Produkten inzwischen sehr umfangreich ist. Freie Anbieter verkaufen gebrauchte, überprüfte und optisch aufgearbeitete Mobiltelefone und Computer an Verbraucher (s. MACIEJ 2019). Das Potenzial des Ansatzes zeigt sich an den jährlichen Marktwachstumsraten von ca. 10 % (INTERNATIONAL DATA CORPORATION 2021).

Remanufacture

In der Literatur gibt es zum Stand des Verfassens dieser Dissertationsschrift zwei Perspektiven auf die Definition der *Remanufacture*-Strategie: die Aufbereitung gebrauchter Produkte in ihrer Gesamtheit oder in Einzelteilen (vgl. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17; vgl. POTTING ET AL. 2017, S. 15). Die Definition nach BLOMSMA ET AL. umfasst das *Remanufacturing* gebrauchter Produkte in seiner Gesamtheit und beschreibt *Remanufacturing* als Prozess der Generalüberholung und Wiederverwendung, sodass mindestens ein identischer Zustand des Neuprodukts erreicht wird und eine erneute Garantie mit gleicher Laufzeit vergeben werden kann (s. ALAMEREW U. BRISSAUD 2019,

S. 176; s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17; s. IJOMAH 2009, S. 91; s. LUND 1984, S. 1). Dadurch ergibt sich eine Überschneidung mit der Definition des *Refurbish*, sodass sich die Strategien in der Praxis nur geringfügig unterscheiden. Im Kontrast dazu steht die Definition nach POTTING ET AL. Sie definieren das *Remanufacturing* als Weiterverwendung von Einzelteilen gebrauchter Produkte, um aus noch funktionsfähigen Komponenten neue Produkte mit gleichem Funktionsumfang zu produzieren (s. POTTING ET AL. 2017, S. 15). Durch diese Vorgehensweise lässt sich der Nutzungszyklus langlebiger Produktbestandteile, nicht jedoch des gesamten Produkts, verlängern (s. BUCHBERGER ET AL. 2019, S. 14; s. POTTING ET AL. 2017, S. 15; s. KIRCHHERR ET AL. 2017, S. 224). Im Automobilsektor wird die *Remanufacturing*-Strategie bereits eingesetzt. Exemplarisch werden dazu Mercedes-Benz und Renault genannt, die Gebrauchtteile aus dem Antriebsstrang (z. B. Motoren und Getriebe) überholen und anbieten (s. DAIMLER AG 2019; s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17). Für diese Dissertationsschrift wird sich im Folgenden auf die Definition nach BLOMSMA ET AL. gestützt, da ein digitaler Produkt-pass zunächst das vollständige Endprodukt umfasst, bevor relevante Komponenten und Bauteile integriert werden.

Repurpose

Die Strategie *Repurpose* beschreibt eine alternative Nutzung von gebrauchten Produkten (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17; s. POTTING ET AL. 2017, S. 15). Dazu durchlaufen die Produkte in der Regel einen Aufbereitungsprozess und werden anschließend verändert, sodass sie eine neue Funktionalität ausführen können (s. BUCHBERGER ET AL. 2019, S. 14). Die Anwendung dieser Strategie ist beliebt im Handwerk und unter Künstlern (s. REIKE ET AL. 2018, S. 258). Ein prototypisches Beispiel ist die Aufbereitung und Weiterverwendung von Transportcontainern als mobile Wohnbauten (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17; s. LYNCH 2016). Allerdings ist die Umsetzung mit hohen Kosten für die Veränderung verbunden. Daher lassen sich weitere Entwicklungen dort beobachten, wo die Funktionalität der Komponenten in ihrem Grundsatz nicht verändert wird, wie das Beispiel der Nutzung von Fahrzeugbatterien als stationäre Speicher zeigt (vgl. SCHULZ-MÖNNINGHOFF U. EVANS 2023). Im Maschinenbau lässt sich diese Strategie nur für modulare Produkte beobachten. Dies zeigt sich am Beispiel von Handhabungstechnik in der Montage, die standardmäßig aus Kranelementen und einem Greifmittel besteht. Durch den Wechsel des Greifmittels lassen sich Handhabungsgeräte ökonomisch sinnvoll für neue Anwendungsfälle nutzen.

Recycle

Im Kontrast zu den bisher vorgestellten Kreislaufstrategien lässt sich die *Recycling*-Strategie durch ihren Fokus auf die verbauten Produktmaterialien abgrenzen. Die Kreislaufstrategie des *Recycling* zielt darauf ab, mithilfe mechanischer und chemischer Prozesse eine ähnliche oder gleiche Materialgüte wie das Originalmaterial zu erlangen, um weitere Lebenszyklen aus denselben Materialien zu ermöglichen (s. REIKE ET AL. 2018, S. 258; § 3 Absatz 25 KrWG; s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17). Im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes werden dazu jegliche Verwertungsverfahren, die zur Aufbereitung eines Materials für seinen ursprünglichen Zweck dienen, eingeschlossen

(§ 3 Absatz 25 KrWG). Die entstehenden Grundstoffe werden unter dem Begriff Sekundärmaterialien zusammengefasst und bilden die Ausgangsbasis in der Herstellung neuer, unverwandter Produkte (s. REIKE ET AL. 2018, S. 258; s. WORRELL U. REUTER 2014, S. 10).

Eine Herausforderung dieser Strategie ergibt sich aus der Vielfältigkeit der sich im Umlauf befindlichen Materialien, sodass eine sortenreine Aufbereitung hohen Aufwand erfordert (s. REIKE ET AL. 2018, S. 258). Daraus ergeben sich verschiedene Qualitätsstufen für Sekundärmaterialien, die sich in Reinheit und Marktwert unterscheiden (s. REIKE ET AL. 2018, S. 258). Mit Ausnahme von Metallen, deren Qualität durch Recycling nur geringfügig sinkt, können viele Sekundärmaterialien nur mit einem Wertabschlag am Rohstoffmarkt platziert werden (s. REIKE ET AL. 2018, S. 258). REIKE ET AL. unterscheiden darüber hinaus zwischen Primärrecycling und Sekundärrecycling (s. REIKE ET AL. 2018, S. 258). Das Primärrecycling umfasst das Business-to-Business-Geschäft mit Materialien, die bspw. in Form von Produktionsabfällen überschüssig sind, aber eine hohe Sortenreinheit aufweisen. Das Sekundärrecycling beschreibt den Recyclingprozess von Haushaltsabfällen, der in regionalen Aufbereitungszentren durchgeführt wird (s. REIKE ET AL. 2018, S. 258). Im Rahmen dieser Dissertationsschrift wird vor allem Business-to-Business-Markt mit Maschinenkomponenten betrachtet.

Cascade

Das Kaskadieren wird definiert als iterative Transformation der chemischen oder physikalischen Struktur des Materials, die im Allgemeinen einen geringeren Materialwert zur Folge hat (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17). Beispiele dafür sind die Verarbeitung von genutzter Kleidung zu Dämmmaterialien oder der Einsatz von Kaffeesatz als Düngemittel in der Landwirtschaft (s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17). Im Maschinen- und Anlagenbau wird die Kaskadierung zum Beispiel in der Windindustrie angewandt, indem ausgemusterte, zerkleinerte Rotorblätter als Additiv in der Zementherstellung verwendet werden (s. VESTAS WIND SYSTEMS A/S 2022, S. 33; s. GENERAL ELECTRIC COMPANY 2021, S. 71).

Recover

Ist weder eine funktionale noch materielle Weiterverwendung von Produkten oder Komponenten realisierbar, wird auf die *Recover*-Strategie zurückgegriffen. Ihre Anwendung zielt nicht auf eine Komponenten- oder Materialrückführung in einen Stoffkreislauf ab, sondern auf die Energieverwertung der Materialien zur Herstellung neuer Produkte (s. REIKE ET AL. 2018, S. 259; s. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17). Neben Verbrennungsprozessen führen auch Vergasung und Kompostierung zur Herstellung von Treibstoffen und thermischer Energie (s. KALMYKOVA ET AL. 2018, S. 196).

Remine

Die Kreislaufstrategie des *Remine* wird von REIKE ET AL. ergänzt, um den Fokus auch auf die Rückgewinnung von Rohstoffen aus bereits deponierten Produkten und Komponenten zu legen (s. REIKE ET AL. 2018, S. 256). Remining ist in vielen Ländern als informeller Sektor entstanden und variiert dabei zwischen der Notwendigkeit der

Rohstoffsuche zur Existenzsicherung in Entwicklungsländern bis zum systematischen Überprüfen von Abfalldeponien auf der Suche nach wertbringenden Metallen (s. REIKE ET AL. 2018, S. 257).

In ihrer Gesamtheit geben die 13 Kreislaufstrategien einen Überblick über die umfangreichen Möglichkeiten, die im Kontext der Kreislaufwirtschaft für Unternehmen zur Verfügung stehen. Jedoch lässt sich feststellen, dass sich nicht alle Kreislaufstrategien gleichermaßen für Investitionsgüter und Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus eignen. Um eine geeignete Auswahl treffen zu können, werden im folgenden Unterabschnitt 5.1.3 Geschäfts- und Nachhaltigkeitsberichte untersucht und darin enthaltene Initiativen den identifizierten Kreislaufstrategien zugeordnet.

5.1.3 Fallstudienbasierte Analyse der Kreislaufstrategien

Die relevanten Kreislaufstrategien, die im weiteren Verlauf dieser Dissertationsschrift die Grundlage des zu entwickelnden Informationsmodells darstellen, werden durch eine fallstudienbasierte Analyse ausgewählt. Die Fallstudien sind dazu theoretisch begründet und nicht zufällig auszuwählen (s. EISENHARDT 1989, S. 533). Im Folgenden werden die Auswahlkriterien der Fallstudien betrachtet.

Die Unternehmensgröße wird als Auswahlkriterium gewählt, um innovationsstarke Unternehmen und Vorreiter im Bereich der Kreislaufwirtschaft in den Fallstudien zu berücksichtigen. Es wird angenommen, dass Großunternehmen und Konzerne ihre Entwicklungsbudgets auch in die Kreislaufwirtschaft investieren und daher als Vorreiter in dem Bereich zur Fallstudienforschung beitragen. Im Falle des gewählten Fallstudienaufbaus sind zudem die Informationsverfügbarkeit und -genauigkeit von Großunternehmen höher, da sie einer regelmäßigen, standardisierten Nachhaltigkeitsberichtspflicht unterliegen, deren Bericht durch Wirtschaftsprüfer geprüft wird. Kleine und mittlere Unternehmen können dagegen weniger Mittel in Forschung und Entwicklung investieren und sind dadurch weniger innovativ (s. PFÄFFLIN 2007, S. 3).

Als zweites Auswahlkriterium beeinflusst das angebotene Produktportfolio die Wahl der Fallstudie. Bezugnehmend auf die Fokussierung dieser wissenschaftlichen Arbeit auf Investitionsgüter des Maschinen- und Anlagenbaus werden Unternehmen mit einem Produktportfolio in diesem Bereich gewählt. Angrenzende Produktgruppen werden ebenfalls berücksichtigt. Hierbei wird neben der Ähnlichkeit auch die Übertragbarkeit der Erkenntnisse betrachtet, sodass neben dem Maschinen- und Anlagenbau auch traditionell innovativere Branchen einbezogen werden.

Das dritte Auswahlkriterium ist die Verfügbarkeit von validierten Informationen in Form eines Geschäfts- oder Nachhaltigkeitsberichts. Um im Sinne der empirischen Forschung auf korrekte und verfügbare Daten zurückgreifen zu können, wurden die Fallstudien aussortiert, die keine aktuelle und umfangreiche Berichterstattung vorweisen konnten.

In Summe besteht der Untersuchungsgegenstand aus 15 veröffentlichten Geschäfts- und Nachhaltigkeitsberichten von Unternehmen aus dem Maschinen- und

Anlagenbau, dem Automobilbau, dem Schiffbau und der Logistik. Das Ziel ist die Auswertung hinsichtlich Initiativen, die sich den identifizierten Kreislaufstrategien zuordnen lassen. Um in den von den Unternehmen selbst veröffentlichten Berichten eine möglichst hohe Objektivität und wissenschaftliche Standards zu wahren, wird sich auf die in Unterabschnitt 5.1.2 vorgestellten Definitionen bezogen, die dadurch von der gewählten Terminologie in den Berichten abweichen kann. So wird beispielsweise in der Fallstudie der VESTAS WIND SYSTEMS A/S unter dem Begriff des *Recyclings* die Materialrückführung der Rotorblätter von Windkraftanlagen beschrieben, die jedoch nach detaillierter Analyse ein Kaskadieren des Rohstoffs darstellt (vgl. VESTAS WIND SYSTEMS A/S 2022, S. 33; vgl. BLOMSMA ET AL. 2019, S. 17). Die Auswahl der Geschäfts- und Nachhaltigkeitsberichte ist in der folgenden Tabelle 5-1 zusammengefasst:

Tabelle 5-1: Auswahl der Fallstudienunternehmen

Art der Berichterstattung	Unternehmen	Berichtsjahr	Quellenverweis
Nachhaltigkeitsbericht	A.P. Moller – Maersk	2021	(A.P. MOLLER - MAERSK 2022)
Nachhaltigkeitsbericht	Aixtron SE	2021	(AIXTRON SE 2022)
Nachhaltigkeitsbericht	BMW AG	2019	(BMW GROUP 2020)
Nachhaltigkeitsbericht	DMG Mori AG	2021	(DMG MORI AG 2021)
Nachhaltigkeitsbericht	Enercon GmbH	2020	(ENERCON GMBH 2021)
Nachhaltigkeitsbericht	GEA Group AG	2021	(GEA GROUP AG 2022)
Nachhaltigkeitsbericht	General Electric Company	2021	(GENERAL ELECTRIC COMPANY 2021)
Geschäftsbericht	Jungheinrich AG	2021	(JUNGHEINRICH AG 2022)
Nichtfinanzialer Bericht	Krones AG	2021	(KRONES AG 2022)
Geschäftsbericht	Liebherr-International AG	2020	(LIEBHERR-INTERNATIONAL AG 2021)
Nachhaltigkeitsbericht	Mercedes-Benz Group AG	2021	(MERCEDES-BENZ GROUP AG 2022)
Nachhaltigkeitsbericht	Siemens AG	2021	(SIEMENS AG 2021)
Nachhaltigkeitsbericht	TRUMPF GmbH + Co. KG	2020/21	(TRUMPF GMBH + Co. KG 2021)
Nachhaltigkeitsbericht	Vestas Wind Systems A/S	2021	(VESTAS WIND SYSTEMS A/S 2022)
Nachhaltigkeitsbericht	Volkswagen AG	2021	(VOLKSWAGEN AG 2022)

Somit werden im Rahmen der Fallstudienbetrachtung acht herstellende Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau, drei aus dem Automobilsektor, zwei aus der Windkraftindustrie und jeweils ein Hersteller aus dem Schiffsbau sowie der Intralogistik einbezogen. Der Berichtszeitraum umfasst die Jahre 2019 bis 2021 und beinhaltet Nachhaltigkeitsberichte, die im Falle einer fehlenden aktuellen Version durch Geschäftsberichte ersetzt wurden. Das Ergebnis der Fallstudienanalyse wird in Abbildung

5-6 vorgestellt. Mit einem Kreuz aufgezeigt sind Unternehmen, aus deren Bericht erkennlich wurde, dass sie diese Kreislaufstrategie verfolgen oder testen. Dabei wird nicht unterschieden zwischen dem jeweiligen Umfang der Anwendungen, sodass prototypische wie auch serielle Umsetzungsvarianten berücksichtigt wurden.

Kategorie	Unternehmen	Kreislaufstrategie												Summe		
		A.P. MÖLLER – MAERSK (2022)	AXTRON SE (2022)	BMW GROUP (2020)	DMG MORI AG (2021)	ENERCON GMBH (2021)	GEA GROUP AG (2022)	GENERAL ELECTRIC COMPANY (2021)	JUNGHEINRICH AG (2022)	KRONES AG (2022)	LIEBHERR-INTERNATIONAL AG (2021)	MERCEDES-BENZ GROUP AG (2022)	SIEMENS AG (2021)	TRUMPF GMBH + CO. KG (2021)	VESTAS WIND SYSTEMS A/S (2022)	VOVSKWAGEN AG (2022)
Zirkuläre Produktentwicklung	Refuse, Reinvent														0	
	Rethink		X	X	X						X			X	5	
	Reduce, Restore			X	X		X		X		X	X		X	8	
Unternehmens-interner Werterhalt	Retrofit							X				X			2	
	Repair		X	X		X		X	X			X			7	
Unternehmensübergreifender Werterhalt	Reuse			X	X		X	X	X		X	X			7	
	Refurbish				X			X	X		X	X	X		8	
	Remanufacture					X	X	X		X	X	X		X	8	
	Repurpose			X			X				X			X	4	
Nutzung der Rohstoffe	Recycle	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		X	12	
	Cascade							X					X		2	
	Recover							X							1	
	Remine														0	
Summe		1	3	5	6	1	5	8	6	1	2	7	7	0	6	6

Abbildung 5-6: Fallstudienbasierte Bewertung von Kreislaufstrategien (eigene Darstellung)

Unter den betrachteten Fallstudien fällt der Hersteller von Werkzeugmaschinen Trumpf dadurch auf, dass in seinem Nachhaltigkeitsbericht keine der betrachteten Kreislaufstrategien berücksichtigt wird (vgl. TRUMPF GMBH + Co. KG 2021). Dafür berichtet das Unternehmen im Ausblick, dass die Kreislaufwirtschaft bereits von einigen Kunden angefragt wird, jedoch noch intensiver Arbeit bedarf (s. TRUMPF GMBH + Co. KG 2021, S. 48).

Die Kreislaufstrategie des *Refuse* ist zudem in keinem der betrachteten Berichte vertreten und kann damit aus der weiteren Analyse ausgeschlossen werden. Allerdings ist das Vereinen von mehreren Funktionen in einem zentralen Produkt, sodass parallel

existierende Produkte redundant werden, durchaus eine attraktive Strategie der Industrie, die jedoch nicht als Kreislaufstrategie deklariert wird. Das Integrieren neuer Funktionen in eine Werkzeugmaschine kann demnach zur Redundanz von Prozessschritten und entsprechender Ausrüstung führen, deren Motivation neben Ressourceneffizienz auch die technologische Weiterentwicklung darstellt. Zwar platziert DMG Mori im Kapitel des Ressourcenmanagements ein hohes Level der Technologieintegration, jedoch lässt sich dies nicht auf die Umsetzung einer Kreislaufstrategie zurückführen (s. DMG MORI AG 2021, S. 28).

Im Gegensatz dazu wird die Kreislaufstrategie des *Rethink* mehrfach in Geschäfts- und Nachhaltigkeitsberichten aufgeführt. Demnach berichten jeweils Aixtron, BMW, DMG Mori, Mercedes-Benz und VW von Maßnahmen, die die Langlebigkeit verlängern oder das Nutzungsverhalten intensivieren (s. AIXTRON SE 2022, S. 26; s. BMW GROUP 2020, S. 57–68; s. DMG MORI AG 2021, S. 28; s. MERCEDES-BENZ GROUP AG 2022, S. 223; s. VOLKSWAGEN AG 2022, S. 61ff.). Die Fahrzeughersteller stellen dazu alternative Mobilitätskonzepte vor, die eine höhere Produktnutzungsquote ermöglichen (s. BMW GROUP 2020, S. 57; s. VOLKSWAGEN AG 2022, S. 15; s. MERCEDES-BENZ GROUP AG 2022, S. 223). Die Maschinenbauer fokussieren hingegen die lange Lebensdauer ihrer Komponenten und die Anpassungen im Produktentwicklungsprozess (s. AIXTRON SE 2022, S. 26; s. DMG MORI AG 2021, S. 28). Demnach hat DMG Mori als Hersteller von Werkzeugmaschinen das recyclingbasierte Design als Bestandteil in ihrem Produktentwicklungsprozess verankert (s. DMG MORI AG 2021, S. 26).

Die Kreislaufstrategie des *Reduce* wird von acht Unternehmen für die Materialauswahl und den Ressourceneinsatz in der Produktherstellung angewandt. Neben einer Reduktion der eingesetzten Produktionsressourcen, wie das Beispiel von BMW zeigt, die pro Fahrzeug 45 % im Vergleich zu 2006 einsparen konnten, setzen andere Hersteller auf den Einsatz von Sekundärmaterialien (s. BMW GROUP 2020, S. 65). Demnach möchte Siemens den Einsatz von Sekundärrohstoffen stärken und Volkswagen im Fahrzeuginnenraum Kunststoffzyklate verwenden (s. SIEMENS AG 2021, S. 91; s. VOLKSWAGEN AG 2022, S. 62). Darüber hinaus wird unter *Reduce* die Einsparung von Wasser und Energie im Produktionsprozess verstanden und entsprechend von weiteren Unternehmen fokussiert (s. GEA GROUP AG 2022, S. 40; s. DMG MORI AG 2021, S. 28).

Eine explizite Betrachtung des *Retrofit* konnte im Rahmen der Analyse der nachhaltigen Berichterstattung bei zwei produzierenden Unternehmen identifiziert werden. Demnach ist das Modernisieren von bestehenden Anlagen ein Bestandteil des „Robust Eco Design“-Ansatzes des Maschinenbauunternehmens Siemens, das innerhalb des Ordnungsrahmens mehrere Kreislaufstrategien vereint (s. SIEMENS AG 2021, S. 93). Der Konkurrent General Electric hat ein dediziertes Retrofitting-Programm für eine Auswahl ihrer medizinischen Bildgebungsgeräte, das ein umfassendes Upgrade der Soft- und Hardware ermöglicht, ohne das komplette System zu wechseln (s. GENERAL ELECTRIC COMPANY 2021, S. 72).

Repair als Kreislaufstrategie, die durch geeignete Instandhaltungsmaßnahmen die Funktionalität des Produkts so lange wie möglich erhält, wird in den untersuchten Berichten siebenfach genannt. Dieses Ergebnis erscheint in dieser Analyse jedoch verzerrt, da die Instandhaltung von Maschinen und Anlagen sehr verbreitet ist. Im Allgemeinen weisen einzelne Komponenten eine geringere Lebensdauer als das Gesamtprodukt auf, sodass sich der reine Austausch als wirtschaftlichste Lösung erweist (s. LINTON U. JAYARAMAN 2005, S. 1813). Für Investitionsgüter trifft diese Beschreibung im Regelfall zu, sodass die Instandhaltung für industrielle Maschinen und Anlagen eine hohe Verbreitung findet (s. LINTON U. JAYARAMAN 2005, S. 1813). In der durchgeführten Auswertung wird die Instandhaltung weniger als eigenständiges Themenfeld der Kreislaufwirtschaft eingeordnet, sondern wird als Kombination mit weiteren Initiativen genannt. Dahingehend plant Vestas Wind Systems Reparaturkreisläufe für Kleinteile in Kombination mit einem erweiterten Refurbishment einzuführen und die GEA Group beschreibt das Condition-Monitoring im Rahmen ihrer Digitalisierungsprojekte (s. VESTAS WIND SYSTEMS A/S 2022, S. 19; s. GEA GROUP AG 2022, S. 42).

Eine übliche Kreislaufstrategie für mobile Maschinen und Anlagen stellt die Eigentumsübertragung im Rahmen des *Reuse* dar. Das Reuse grenzt sich insofern von den bisherigen Kreislaufstrategien ab, als dass hierbei ein Eigentumsübergang zu einem neuen Nutzer vollzogen wird. Unter den untersuchten Fallstudien betreiben sieben herstellende Unternehmen eine eigene Gebrauchtabteilung, die von der Weiternutzung einzelner Komponenten bis zum Weiterverkauf kompletter Maschinen reicht. Mercedes-Benz beispielsweise besitzt seit 1996 ein Gebrauchtteilecenter, in dem Gebrauchtwagen zerlegt und auf wiederverwendbare Komponenten untersucht werden (s. MERCEDES-BENZ GROUP AG 2022, S. 173). Ebenso befindet sich Jungheinrich im Aufbau eines Gebrauchtstaplergeschäfts und DMG Mori hat im Jahr 2021 insgesamt 600 Gebrauchtmassen verkauft (s. JUNGHEINRICH AG 2022, S. 27; s. DMG MORI AG 2021, S. 28).

Die funktionelle und optische Instandsetzung auf einen möglichst originalgetreuen Zustand im Rahmen der *Refurbish*-Strategie wird von acht Unternehmen verfolgt. Herzuheben ist, dass neben einzelnen Pilotprojekten bereits eigene Geschäftsbereiche zum Refurbishment aufgebaut wurden. Demnach verkauft DMG Mori im Rahmen seines Serviceangebots jährlich eine hohe Zahl von gebrauchten Maschinen, die im Vorhinein einen Refurbishment-Prozess durchlaufen (s. DMG MORI AG 2021, S. 28). Ebenso präsentiert Mercedes-Benz die Aufbereitung komplexer Fahrzeugkomponenten wie Getriebe, sodass sie in ihrer Funktion wieder Neuteilen entsprechen (s. MERCEDES-BENZ GROUP AG 2022, S. 173). Ansonsten wird im Healthcare-Geschäftsbereich von General Electric das Refurbishment für medizinische Bildgebungsgeräte aktiv angewandt, was durchschnittlich die Aufbereitung und Weiterverwendung von 8.000 Komponenten jährlich ermöglicht (s. GENERAL ELECTRIC COMPANY 2021, S. 72). Laut General Electric wird damit nicht nur die Ressourcennutzung erhöht, sondern Kliniken können gleichermaßen ihre Investitionskosten senken (s. GENERAL ELECTRIC COMPANY 2021, S. 72). Korrespondierend hat Jungheinrich in Dresden ein eigenständiges Aufbereitungswerk aufgebaut, das im Jahr 2021 fast 6.000 Gebrauchtstapler

aufbereitet hat (s. JUNGHEINRICH AG 2022, S. 27f.). Vestas Wind Systems ist dagegen in seiner Entwicklung in einem Anfangszustand und hat sich das Ziel gesetzt, bis 2030 eine Nutzungsquote von 55 % für aufbereitete Komponenten zu erreichen (s. VESTAS WIND SYSTEMS A/S 2022, S. 19). Damit soll in 55 % aller Fälle, in der eine zu reparierende Turbine ein Ersatzteil benötigt, eine aufbereitete Komponente zum Einsatz kommen (s. VESTAS WIND SYSTEMS A/S 2022, S. 34). Für das Jahr 2021 wurde zuletzt eine Quote von 15 % erzielt, die jedoch bereits 33 % des Gewichts einer Turbine ausmacht (s. VESTAS WIND SYSTEMS A/S 2022, S. 34).

Die Kreislaufstrategie des *Remanufacturings* wird in der Auswertung ebenso von acht Unternehmen verfolgt, lässt sich in der Berichterstattung aufgrund seiner fehlenden definitorischen Abgrenzung zur Refurbish-Strategie allerdings nicht eindeutig trennen. General Electric spricht in seinem Nachhaltigkeitsbericht daher von „*refurbished and/or remanufactured*“ (s. GENERAL ELECTRIC COMPANY 2021, S. 72). Dagegen erwähnt die GEA Group die fünf R-Strategien aus *Reduce, Reuse, Repair, Remanufacture* und *Recycle* als Zielrichtung, die bis 2026 alle Ersatzteile und das Verpackungsmaterial erfüllen müssen (s. GEA GROUP AG 2022, S. 40). Zum Stand des Berichts bietet die GEA Group nur in Einzelfällen eine Rücknahme und Aufbereitung der Anlagen an, um sie für zukünftige Betriebsjahre vorzubereiten (s. GEA GROUP AG 2022, S. 140).

Davon unterscheidet sich die Kreislaufstrategie des *Repurpose*, da hier die ursprüngliche Funktionalität durch eine neue Anwendung ersetzt wird. Insgesamt vier Unternehmen nennen neue Anwendungen für bestehende Komponenten ihrer Produkte. Vor allem im Automobilbereich liegt ein großer Fokus auf der Weiterverwendung existierender Fahrzeugbatterien als stationäre Energiespeicher, sobald deren Kapazität für eine Anwendung im Fahrzeug nicht mehr ausreicht (s. MERCEDES-BENZ GROUP AG 2022, S. 174; s. BMW GROUP 2020, S. 68; s. VOLKSWAGEN AG 2022, S. 62). Ebenfalls wird die Repurpose-Strategie von General Electric im Rahmen der Ressourcenknappheit zu Anfang der Covid-19-Pandemie erwähnt. Als Alternative der Produktion von Neuware hat General Electric diese Strategie verfolgt, um kurzfristig Gesundheitsüberwachungsgeräte liefern zu können (s. GENERAL ELECTRIC COMPANY 2021, S. 46).

Das *Recycling* wird von insgesamt zwölf Unternehmen im Rahmen des Nachhaltigkeits- oder nichtfinanziellen Berichts genannt. Die hohe Anzahl an Nennungen ist für die betrachteten Automobilhersteller darin begründet, dass die europäische Richtlinie für Altfahrzeuge eine Recyclingfähigkeit von 85 % und stoffliche Verwertbarkeit von 95 % vorschreibt². Dieser Vorgabe entsprechen die untersuchten Automobilhersteller laut ihrer Berichterstattung. Einschränkend ist zu erwähnen, dass Mercedes-Benz damit der Norm ISO 22628 entspricht und Volkswagen die Recyclingquoten nur für seine in Europa zugelassenen Fahrzeuge erfüllt (s. BMW GROUP 2020, S. 68; s. MERCEDES-BENZ GROUP AG 2022, S. 175; s. VOLKSWAGEN AG 2022, S. 63). Dagegen gibt Jungheinrich an, dass seine Produkte am Lebenszyklusende nahezu vollständig

² EU-Richtlinie 2000/53/EG vom 18.09.2000, Artikel 7, Absatz 4 (Stand: 30.03.2023)

recyclingfähig sind (s. JUNGHEINRICH AG 2022, S. 27). Eine uneindeutige Strategie verfolgen Aixtron, Siemens und Enercon, die im Allgemeinen die Bedeutung des Recyclings und einer recyclinggerechten Gestaltung ihrer Produkte betonen (s. AIXTRON SE 2022, S. 26; s. SIEMENS AG 2021, S. 91; s. ENERCON GMBH 2021, S. 22). Mit einem Anteil von 49 % der eingesetzten Guss- und Blechteile, die zu 50 % aus recyceltem Stahlschrott bestehen, erreicht der Werkzeugmaschinenhersteller DMG Mori bereits eine hohe Transparenz über den Ressourceneinsatz der Herstellung (s. DMG MORI AG 2021, S. 28). Zudem sind die Maschinen von DMG derzeit zu 99 % recycelbar (s. DMG MORI AG 2021, S. 28). Die GEA Group platziert das Recycling nur innerhalb ihres Ordnungsrahmens der fünf R-Strategien, der für alle Ersatzteile und Verpackungsmaterialien gelten soll (s. GEA GROUP AG 2022, S. 40). Als Hersteller von Anlagen im Lebensmittelbereich wird der Fokus auf die Integration innovativer Verpackungsmaterialien gelegt, statt die eigens hergestellten Produktionsanlagen recycelbar zu machen (s. GEA GROUP AG 2022, S. 53). Ferner setzt sich der Windkraftanlagenhersteller Vestas Wind Systems das ambitionierte Ziel, bis 2030 100 % seiner Rotorblätter recyceln zu können (s. VESTAS WIND SYSTEMS A/S 2022, S. 19).

Die Strategie des *Cascade* wird nur von zwei Unternehmen aus der Windkraftbranche genannt: Vestas Wind Systems und General Electric präsentieren ein Verfahren, in dem Rotorblätter ausgedienter Windkraftanlagen in der Zementherstellung hinzugefügt werden (s. VESTAS WIND SYSTEMS A/S 2022, S. 33; s. GENERAL ELECTRIC COMPANY 2021, S. 71). General Electric gibt an, dass 65 % der Rotorblättermasse Eingangsrohstoffe im Zementherstellungsprozess ersetzen kann, wohingegen weitere 28 % Wärmeenergie spenden (s. GENERAL ELECTRIC COMPANY 2021, S. 71). Damit sollen laut den Prozessverantwortlichen in Summe 27 % Kohlenstoffdioxid und 13 % Wasser im Zementherstellungsprozess eingespart werden, womit zwei forschungsrelevante Problemstellungen erfolgreich adressiert würden (s. GENERAL ELECTRIC COMPANY 2021, S. 71). Allerdings handelt es sich in beiden Fallbeispielen bisher nur um Forschungs- oder Pilotprojekte, deren industrielle Anwendung es noch zu beweisen gilt. Trotzdem deckt dieses Fallbeispiel auch die Kreislaufstrategie Recover ab, denn der enthaltene Kohlenstoff in den Rotorblättern wird in thermische Energie umgewandelt. Die Kreislaufstrategie des *Remine* findet unter den betrachteten Unternehmen bisher keine Anwendung.

5.1.4 Auswahl praxisrelevanter Kreislaufstrategien

Aus der Analyse der Berichterstattung produzierender Unternehmen wird abgeleitet, dass das *Recycling*, *Reduce/ Restore* und weiterhaltende Strategien von den betrachteten Kreislaufstrategien die höchste Relevanz besitzen. Ferner hat sich die wissenschaftliche Terminologie aus Unterabschnitt 5.1.2 bislang nicht in der Praxis etabliert, sodass spezifische Projekte anders oder mehrfach zugeordnet wurden. Am Anwendungsfall der Kaskadierung und energetischen Verwertung von Rotorblättern zeigt sich, dass eine Kaskadierungsstrategie unter *Recycling* geführt wird.

Das Ziel dieser Dissertationsschrift, ein Informationsmodell zur Umsetzung von Kreislaufstrategien im Maschinen- und Anlagenbau zu entwickeln, erfordert die Eingrenzung und Auswahl relevanter Kreislaufstrategien. Obwohl das *Recycling* die höchste Anzahl an Nennungen verzeichnet, setzt diese Strategie erst nach der Nutzungsdauer des Produkts ein und die positiven ökologischen Auswirkungen sind daher geringer. Das *Recycling* trifft ebenso wenig die strategische Ausrichtung des FIR an der RWTH Aachen. Die Kreislaufstrategie *Reduce/ Restore* ist auf Maßnahmen in der Produktentwicklung ausgerichtet und fokussiert daher die Produktlebenszyklusphase vor einer Nutzung. Der Bereich des *Circular Product Designs* besitzt bereits eine hohe wissenschaftliche Aufmerksamkeit und die Überschneidung mit der strategischen Ausrichtung des FIR an der RWTH Aachen ist nur geringfügig vorhanden (vgl. MESTRE U. COOPER 2017). Weiterhin entfaltet der digitale Produktpass sein vollständiges Potenzial erst in der Nutzungsphase, sodass ein Forschungsschwerpunkt dort zu bevorzugen ist. Daher wird unter Abwägung der zuvor geteilten Erkenntnisse der Fokus dieses Dissertationsvorhabens auf die übergreifende Kategorie des *unternehmensübergreifenden Werterhalts* gelegt (s. Abbildung 5-7). Diese Kategorie zeichnet sich durch eine hohe Relevanz in der Praxis, einen Fokus auf die Nutzungsphase, hohe ökologische Einsparpotenziale, einen strategischen Fit mit den Institutszielen und einen Schwerpunkt des digitalen Produktpasses aus. Aufgrund der terminologischen Varianz in der Praxis wird dazu die komplette Kategorie des *unternehmensübergreifenden Werterhalts* ausgewählt. Weiterhin werden unternehmensübergreifende Strategien mit Eigentümerwechsel fokussiert, da sich gerade beim Eigentümerwechsel ein hohes Anwendungspotenzial des digitalen Produktpasses abzeichnet.

Kategorie	Strategie	Definition
Zirkuläre Produktentwicklung	Refuse, Reinvent	Das Produkt als solches wird obsolet, indem seine Funktionen in andere Produkte integriert werden
	Rethink	Steigerung der Produktlebensdauer und Auslastung durch technische Anpassungen und neue Geschäftsmodelle
	Reduce, Restore	Reduktion des Ressourceneinsatzes in der Produktion sowie Nutzung von Sekundärmaterialien
Unternehmensinterner Werterhalt	Retrofit	Verlängerung des Lebenszyklus durch Erweiterung des Funktionsumfangs eines bestehenden Produkts
	Repair	Instandhaltung des Produkts, sodass seine Funktionalität erhalten bleibt
Unternehmensübergreifender Werterhalt	Reuse	Der unternehmensübergreifende Werterhalt ist definiert durch einen Eigentümerwechsel und gegebenenfalls erforderliche Instandsetzung des Produkts mit dem übergeordneten Ziel, das Produkt in weitere Kreisläufe zu überführen.
	Refurbish	
	Remanufacture	
	Repurpose	
Nutzung der Rohstoffe	Recycle	Verarbeitung von Materialien aus gebrauchten Produkten, um Rohstoffe mit gleicher oder ähnlicher Qualität herzustellen
	Cascade	Verarbeitung von Materialien aus gebrauchten Produkten, um Rohstoffe mit niedrigerer Qualität herzustellen
	Recover	Thermische Verwertung von Material aus gebrauchten Produkten
	Remine	Rohstoffgewinnung aus Abfalldeponien

Abbildung 5-7: Auswahl der Kategorie von Kreislaufstrategien für den Maschinen- und Anlagenbau (eigene Darstellung)

Diese Auswahl erlaubt es, sich zum einen auf die in der Praxis relevanten Kreislaufstrategien und zum anderen auf einen klar abgrenzbaren Bereich zu konzentrieren. Im folgenden Unterkapitel 5.2 werden die für diese Kreislaufstrategien erforderlichen Rollen mit der Ökosystemmodellierung ermittelt und deren Interaktionen analysiert.

5.1.5 Zusammenfassung und Reflexion

Ziel von Unterkapitel 5.1 ist die Auswahl relevanter Kreislaufstrategien für Investitionsgüter im Maschinen- und Anlagenbau zur weiteren Betrachtung in dieser Dissertationsschrift. Zunächst wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt, um eine wissenschaftlich-theoretische Einordnung abzuleiten. Dazu wurden in Unterkapitel 3.2 bereits 17 wissenschaftliche Arbeiten identifiziert, aus denen 14 in die Analyse einbezogen wurden. Auf Basis dieser Arbeiten wurden 13 Kreislaufstrategien identifiziert, die sich für Investitionsgüter im Maschinen- und Anlagenbau eignen. Darauf folgend wurden diese Strategien in Kategorien gruppiert und detailliert. Zur Auswahl relevanter Kreislaufstrategien wurden anschließend 15 Nachhaltigkeits- und Geschäftsberichte von Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau sowie aus dem Automobilbau analysiert, um den Anwendungsgrad der identifizierten Kreislaufstrategien zu bestimmen. Dabei zeigte sich ein sehr differenziertes Bild aus der Wirtschaft im

Hinblick auf den Inhalt der betrachteten Berichte. Während einzelne Unternehmen sehr detailliert qualitativ und quantitativ ihre nachhaltigen Maßnahmen präsentieren, werden an anderer Stelle die Konzepte zu Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft beschrieben, ohne auf eigene Initiativen einzugehen. Die Analyse zeigt auf, dass Recycling weiterhin als Kreislaufstrategie dominiert und die meisten Nennungen verzeichnet. Allerdings wird die Nutzung oftmals staatlich vorgegeben und erfordert von Herstellern nur eine begrenzte Veränderung ihrer Prozesse, ihres Geschäftsmodells oder ihrer Produkte. Von größerer wissenschaftlicher Relevanz ist daher die verstärkte Nennung der Kreislaufstrategien des *Reuse*, *Refurbish* und *Remanufacture*. Aufgrund der theoretisch-wissenschaftlichen Herkunft sind diese Kreislaufstrategien in der Praxis allerdings nicht strikt voneinander abgrenzbar. Angesichts dessen wird in dieser Dissertationsschrift die Kategorie des *unternehmensübergreifenden Werterhalts* fokussiert. Durch diese Erkenntnisse konnte die erste Forschungsfrage der Dissertation beantwortet werden:

Welche Kreislaufstrategien existieren für Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus?

Aufgrund der Erarbeitung dieser Ergebnisse im Jahr 2022 fehlt in den beschriebenen Kreislaufstrategien eine neue Entwicklung aus dem Umfeld von Professor Schuh an der RWTH Aachen. Dort wird das Konzept der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft diskutiert, das eine regelmäßige Aktualisierbarkeit von Produkten berücksichtigt (s. SCHUH ET AL. 2023, S. 311). Durch eine konsequente Modularität wird eine Produktstruktur geschaffen, die es ermöglicht, in regelmäßigen Abständen die aktuellen Innovationen und Designentwicklungen in das bestehende Produkt zu integrieren (s. SCHUH ET AL. 2023, S. 311). Diese Kreislaufstrategie kann aufgrund ihres wertsteigernden Potenzials oberhalb der *Reuse*-Strategie eingeordnet werden, wird jedoch in diesem Dissertationsvorhaben nicht stärker berücksichtigt.

5.2 Beschreibungsmodell zirkulärer Ökosysteme

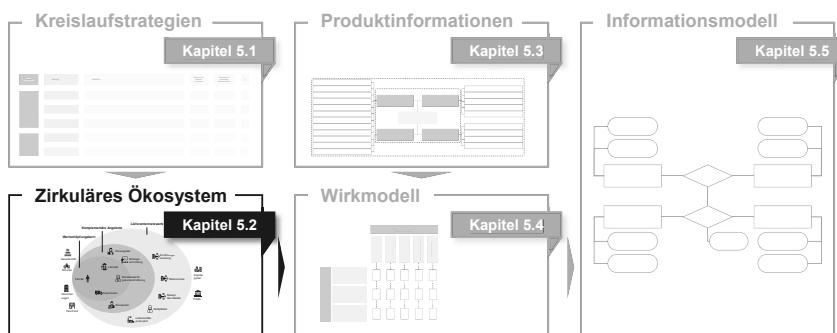


Abbildung 5-8: Einordnung des zirkulären Ökosystems in die Grundstruktur der Dissertation (eigene Darstellung)

In Unterkapitel 5.2 dieser Dissertationsschrift wird die Forschungsfrage beantwortet:

Welche Rollen sind für die Umsetzung der Kreislaufstrategien notwendig und in welchen Beziehungen müssen diese zueinander stehen?

Die Notwendigkeit der Bearbeitung dieser Forschungsfrage ergibt sich aus dem Stand der Erkenntnisse in Unterabschnitt 3.2.2. Eine systematischen Literaturrecherche ergab, dass der Forschungsbereich zirkulärer Ökosysteme in den vergangenen Jahren zunehmend wissenschaftliches Interesse erfuhr. Allerdings befasst sich die Wissenschaft bisher bislang nicht mit einer umfassenden und generalisierten Betrachtung von zirkulären Ökosystemen von Investitionsgütern. Vor dem Hintergrund des Remanufacturings betonen THIERRY ET AL. die Bedeutung der Analyse des eigenen Wertschöpfungsnetzwerks, um den Informationsfluss zu erhöhen und Kooperationen zu verbessern (s. THIERRY ET AL. 1995, S. 132; s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 6). Unter den identifizierten Forschungsartikeln werden relevante Beiträge zur Begriffsbildung zirkulärer Ökosysteme (vgl. AARIKKA-STENROOS ET AL. 2021), zur Geschäftsmodellierung in zirkulären Ökosystemen (vgl. BOLDRINI U. ANTHEAUME 2021; vgl. TAKACS ET AL. 2020) und zu Transformationspfaden hin zu zirkulären Ökosystemen (vgl. KANDA ET AL. 2021; vgl. TREVISAN ET AL. 2022) geleistet. Einzig PARIDA ET AL. beschreiben den Transformationsprozess, den große Unternehmen durchlaufen müssen, wenn sie die Rolle des Orchestrators in ihrem Kreislaufsystem annehmen (s. PARIDA ET AL. 2019). Daraus ergibt sich das Forschungsdefizit einer systematischen Betrachtung des zirkulären Ökosystems und der erforderlichen Rollen, die neben Großunternehmen auch für kleine und mittlere Unternehmen von Interesse sein könnten. In den folgenden Abschnitten wird daher darauf abgezielt, eine Blaupause für zirkuläre Ökosysteme von Investitionsgütern im Maschinen- und Anlagenbau zu entwickeln.

Dazu wird in diesem Unterkapitel das Beschreibungsmodell eines zirkulären Ökosystems entwickelt, um die relevanten Rollen und Aufgaben innerhalb des Kreislaufprozesses komplexer Produkte zu identifizieren. Zunächst wird dazu das methodische Vorgehen in Unterabschnitt 5.2.1 vorgestellt. Zur Erkenntnisentwicklung wird sich auf die Fallstudienforschung nach EISENHARDT gestützt und entsprechende Fallstudien werden in Unterabschnitt 5.2.2 ausgewählt und beschrieben. In Unterabschnitt 5.2.3 wird darauf aufbauend das zirkuläre Ökosystem hergeleitet, bevor in Unterabschnitt 5.2.4 eine Detailübersicht der identifizierten Rollen und ihrer Aktivitäten gegeben wird.

5.2.1 Methodisches Vorgehen zur Beschreibung des Ökosystems

Die Modellierung des Ökosystems zum unternehmensübergreifenden Werterhalt stützt sich auf das Vorgehen nach DEN OUDEN, das bereits in Unterabschnitt 4.2.5 beschrieben wird (s. DEN OUDEN 2011, S. 143ff.). Allerdings fokussiert DEN OUDEN das Identifizieren von Rollen und Definieren von Beziehungen im Ökosystem, sodass eine weitere Methode zum Präzisieren der rollenspezifischen Aktivitäten erforderlich wird. Die Wertkette nach PORTER stellt ein analytisches Instrument dar, das die strategisch relevanten Tätigkeiten eines Unternehmens gliedert (s. PORTER 2014, S. 61). PORTER

identifiziert darüber das Tätigkeitsprofil eines Unternehmens und erörtert die Wettbewerbsvorteile, die sich aus den operativen Tätigkeiten ergeben (s. PORTER 2014, S. 61).

Das Grundmodell von PORTER besteht aus einem Bereich der Wertaktivitäten, der unterscheidbare Unternehmensaktivitäten beschreibt, und der Gewinnspanne, die als Differenz zwischen Gesamtwert und Summe der Kosten der Wertaktivitäten gemessen wird (s. PORTER 2014, S. 66). Jede Wertaktivität kann zudem über verschiedene Charakteristika beschrieben werden. Darunter zählen bspw. gekaufte Eingangsvariablen, menschliche Ressourcen, Technologie sowie Informationen (s. PORTER 2014, S. 67). Das vollständige Wertkettenmodell ist in Abbildung 5-9 dargestellt.



Abbildung 5-9: Modell der Wertkette nach PORTER (PORTER 2014, S. 64)

Die beschriebenen Wertaktivitäten bestehen aus primären und unterstützenden Tätigkeiten. Primäre Tätigkeiten skizzieren die physische Produktherstellung und den Produktvertrieb, wohingegen unterstützende Aktivitäten die Aufgabe haben, die primären Aktivitäten möglichst effizient aufrechtzuerhalten (s. PORTER 2014, S. 67). Die konkrete Unterteilung der Aktivitäten in Eingangslogistik, Operationen, Marketing und Vertrieb, Ausgangslogistik und Kundendienst ist in Abbildung 5-9 aufgezeigt (s. PORTER 2014, S. 68f.):

- *Eingangslogistik* beschreibt die Tätigkeiten im Zusammenhang mit Empfang, Lagerung und Distribution der Betriebsmittel eines Produkts.
- *Operationen* enthält Aktivitäten, die zur Verarbeitung von Eingangsvariablen zur finalen Produktform notwendig sind. Dies beinhaltet Produktionsschritte wie die maschinelle Bearbeitung, Verpackung und Montage.
- *Marketing und Vertrieb* ist definiert durch Tätigkeiten zur Vermarktung des Produkts an potenzielle Abnehmer.

- *Ausgangslogistik* beschreibt Tätigkeiten, die zur Distribution des Produkts an die Abnehmer erforderlich sind. Darunter fallen etwa Lagerung und Materialtransport.
- *Kundendienst* enthält Aktivitäten zur Erhaltung und Förderung des Produktwerts und umfasst bspw. Reparaturen, Ersatzteillieferungen und die Instandhaltung.

Die unterstützenden Tätigkeiten lassen sich demgegenüber nicht in einzelnen Schritten zuordnen, sondern gewährleisten übergreifend einen reibungslosen Betriebsablauf (s. PORTER 2014, S. 67). Die unterstützenden Tätigkeiten werden nach PORTER wie folgt definiert (s. PORTER 2014, S. 69ff.):

- Die *Beschaffung* beschreibt die Funktion des Einkaufs im Unternehmen, die je nach Branche einen erheblichen Stellenwert einnimmt und sich dafür verantwortlich zeigt, die erforderlichen Rohstoffe und Verbrauchswaren in ausreichender Qualität und zu angemessenen Kosten einzukaufen.
- Die *Technologieentwicklung* beschreibt die kontinuierliche Weiterentwicklung eingesetzter Technologien im Unternehmen, die von Produktinnovationen bis zu Prozessverbesserungen im administrativen Bereich reichen.
- Die *Personalwirtschaft* beschreibt Tätigkeiten zum Management der menschlichen Ressourcen und umfasst bspw. die Rekrutierung sowie die Einstellung und Weiterbildung von Beschäftigten.
- Die *Unternehmensinfrastruktur* beschreibt weiterführende Unternehmensaktivitäten wie Geschäftsführung, Rechnungswesen, Finanzwesen oder Qualitätsgrenzen.

In der Anwendung des Modells der Wertkette werden die Aktivitäten nach technologischen und ökonomischen Gesichtspunkten logisch getrennt und auf die gewünschte Detailtiefe gebracht, da oftmals eine hohe Anzahl an möglichen tiefergehenden Aktivitäten verfügbar ist (s. PORTER 2014, S. 75). Der Zweck der Nutzung der Wertkette hat damit einen hohen Einfluss auf die Auswahl und Einordnung der zu betrachtenden Aktivitäten, sodass sich Wertketten vom selben Unternehmen je nach Betrachtungszweck unterscheiden können (s. PORTER 2014, S. 75). Daher darf die Bezeichnung der Aktivitäten willkürlich erfolgen, sodass ein bestmöglich Einblick in den Geschäftsbeitrieb ermöglicht wird (s. PORTER 2014, S. 78).

Neben der eigenen Wertkette muss ein Unternehmen sich auch in das allgemeine Wertsystem einpassen können, um seine Wettbewerbsvorteile realisieren zu können (s. PORTER 2014, S. 63). Daher wird im Rahmen dieser Dissertationsschrift die Wertkette nach PORTER um Elemente der Ökosystemgestaltung ergänzt. Dazu wird sich auf das Rollenmodell von LEWRICK gestützt, das eine rollenbasierte Positionierung im Ökosystem ermöglicht (s. LEWRICK 2021, S. 236f.). Somit werden die *Motivation*, der *Wertbeitrag* zum Ökosystem und das *Geschäftsmodell* als Beschreibungselemente zur Wertkette nach PORTER hinzugefügt und in Abbildung 5-10 präsentiert.

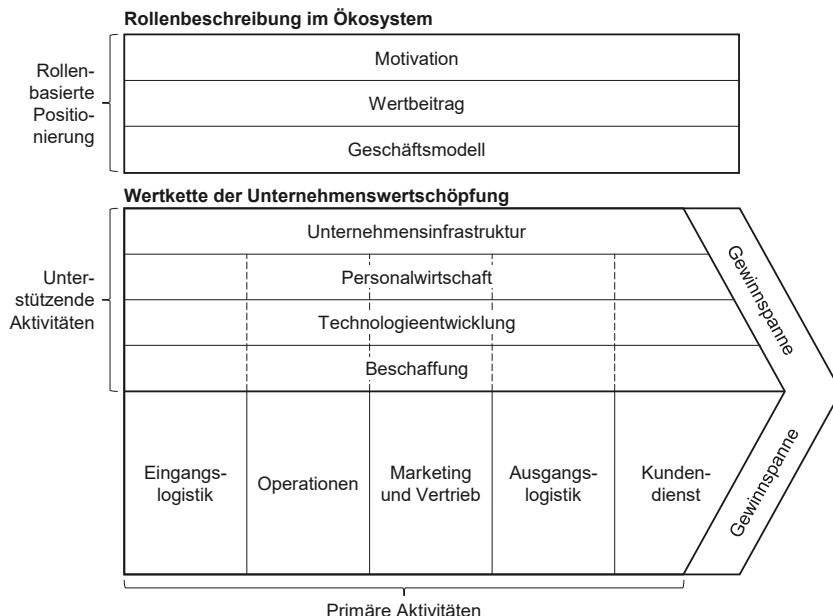


Abbildung 5-10: Die Wertkette nach PORTER ergänzt um die Rollenbeschreibung im Ökosystem (eigene Darstellung i. A. a. PORTER 2014, S. 64; LEWRICK 2021, S. 237)

Die **Motivation** beschreibt die primären Gründe, warum ein Akteur am Ökosystem teilnimmt (s. LEWRICK 2021, S. 236). Mithilfe des **Wertbeitrags** kann nachvollzogen werden, ob durch den Akteur das übergreifende Wertversprechen erreicht wird und welchen Mehrwert der Akteur in das Ökosystem einbringt (s. LEWRICK 2021, S. 236). Das **Geschäftsmodell** beschreibt die Logik des aktuellen Wirtschaftens eines Akteurs (s. LEWRICK 2021, S. 237).

Das vollständige Ökosystem und der entwickelte Ordnungsrahmen werden in den folgenden Abschnitten mithilfe des Ansatzes der Fallstudienforschung erarbeitet. Durch die Anwendung der vorgestellten Methodik wird sowohl auf Ökosystem- als auch auf Unternehmenslevel ein Verständnis für die Aktivitäten und Interaktionen entwickelt.

5.2.2 Auswahl und Analyse der ausgewählten Fallstudien

Die Auswahl der zu betrachtenden Fallstudien ist theoretisch zu begründen und nicht zufällig auszuwählen (s. EISENHARDT 1989, S. 533). Daher werden die Auswahlkriterien im Folgenden vorgestellt. Die Anzahl der Fallstudien orientiert sich an der Empfehlung von YIN, sodass zehn Fallstudien ausgewählt wurden, um eine aussagekräftige Grundgesamtheit zu erreichen (s. YIN 2003, S. 47).

Das erste Auswahlkriterium umfasst das Betrachtungsobjekt der Fallstudie. In dieser Dissertationsschrift liegt der Fokus auf Investitionsgütern in Form von Maschinen und Anlagen, deren Eigenschaften sich auf in den betrachteten Fallstudien wiederfinden lassen müssen. Dadurch wurden Betrachtungsobjekte der Konsumgüter- und Elektronikindustrie sowie zur Kreislaufwirtschaft von Kunststoffen nicht berücksichtigt. Aufgrund der vorhandenen Datenlage sind auch Fallstudien enthalten, die Investitionsgüter betrachten, jedoch ihren Fokus auf bestimmte Bauteilgruppen oder Komponenten legen.

Das zweite Auswahlkriterium bezieht sich auf die betrachteten Kreislaufstrategien der Fallstudien. Entsprechend der Einschränkung im vorherigen Abschnitt werden nur Fallstudien einbezogen, die Kreislaufstrategien des unternehmensübergreifenden Werthalts fokussieren. Demnach umfassen die ausgewählten Fallstudien das *Reuse*, *Refurbish*, *Remanufacture* und *Repurpose* von Investitionsgütern.

Das dritte Auswahlkriterium richtet sich auf den inhaltlichen Fokus. In den Fallstudien müssen der Prozess der Lebenszyklusverlängerung betrachtet werden und Interaktionen zwischen den Akteuren des Ökosystems beinhaltet sein. Dadurch wird gewährleistet, dass Aussagen zum zirkulären Ökosystem für die Umsetzung ausgewählter Kreislaufstrategien getroffen werden können. Insbesondere eine Vielzahl von Beiträgen zur Geschäftsmodellentwicklung in der Kreislaufwirtschaft konnten somit nicht berücksichtigt werden.

Unter Einbeziehung der hier vorgestellten Auswahlkriterien werden in Summe zehn Fallstudien zur detaillierten Analyse herangezogen. Eine Übersicht der Fallstudien ist in Tabelle 5-2 zu sehen, deren detaillierte Vorstellung im Anhang A3 zu finden ist.

Tabelle 5-2: Auswahl der Fallstudien zu zirkulären Ökosystemen

Betrachtungs-objekt	Unternehmen	Kreislauf-strategie	Quellenverweis
Baumaschinen	Hitachi Construction Machinery Europe	Remanufacture	BOOTSMA 2016, Fallstudiengespräch durch den Autor (2023)
Fahrzeugkomponenten	ATP Industries Group	Remanufacture	MORRIS 2016
Hydraulikkomponenten	PSS – Steering & Hydraulics Division	Remanufacture	BRAMMER 2016
Flurförderzeuge	Toyota Material Handling	Reuse, Remanufacture	NIELSEN 2016
Schwerfahrzeuge	unbekannt	Refurbish, Remanufacture	RÖNKKÖ ET AL. 2021
Lastkraftwagen	Renault Trucks	Remanufacture	BOURGEOIS U. LELEUX 2005
Fahrzeugbatterien	Mercedes-Benz	Repurpose	SCHULZ-MÖNNINGHOFF U. EVANS 2023
Werkzeugmaschinen	unbekannt	Remanufacture	SONG ET AL. 2023
Landwirtschaftsmaschinen	John Deere	Remanufacture	CHANDRASEKHAR U. FRAZER JOHNSON 2018
Werkzeugmaschinen	SparePartsNow	Reuse, Refurbish	Fallstudiengespräch durch den Autor (2023)

Die Auswahl der Fallstudien beinhaltet nicht nur Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau, sondern auch aus angrenzenden Industriezweigen. Obwohl es in der Umsetzung wertenhaltender Kreislaufstrategien Unterschiede gibt, steigt die Relevanz mit dem Spezialisierungs- und Individualisierungsgrad der Industrie (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 6). Die Differenzen der Industrien sind insbesondere in der Regulatorik und dem Marketing präsent, aus technischer Perspektive werden allerdings zum Großteil ähnliche Materialien verwendet (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 6). Zudem kann der Maschinen- und Anlagenbau stärker von aufbereitenden Kreislaufstrategien profitieren, da die Verfügbarkeit spezialisierter Produkte besser monetarisierbar ist (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 6).

Die Fallstudien konzentrieren sich auf die Kreislaufstrategie des Remanufacturings, da dieses Konzept bereits seit einigen Jahrzehnten besteht und als erprobt gilt (s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 7; s. CHANDRASEKHAR U. FRAZER JOHNSON 2018, S. 2). Demnach haben Renault Trucks und John Deere das Konzept bereits Ende der 1990er-Jahre eingeführt und seitdem kontinuierlich erweitert (s. CHANDRASEKHAR U. FRAZER JOHNSON 2018, S. 2; s. RENAULT TRUCKS SASU 2022; s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 7). Schon bevor das Konzept eine öffentliche Wirkung erzielte, die zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Dissertationsschrift gegeben ist, zeigte das Remanufacturing

Mehrwerde durch eine schnelle Verfügbarkeit von Austauschkomponenten und einen Kostenvorteil von 30 % – 50 % gegenüber Neuteilen (s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 6; s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 10; s. MORRIS 2016, S. 1; s. BRAMMER 2016, S. 2; s. BOOTSMA 2016, S. 2). Die schnelle Verfügbarkeit liegt darin begründet, dass spezialisierte Komponenten bedarfsgerecht gefertigt werden müssen, eine gebrauchte Komponente allerdings sofort zur Aufbereitung verfügbar ist. In der Praxis hat sich daher ein Tauschsystem etabliert. Im Zuge dessen werden aufbereitete (*remanufactured*) Komponenten mit einer zusätzlichen Pfandgebühr verkauft und der Pfandbetrag wird bei Rückgabe der gebrauchten Komponente erstattet (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3; s. BRAMMER 2016, S. 1; s. MORRIS 2016, S. 1). John Deere kalkuliert infolgedessen mit einer Rückkehrrate von über 75 %, damit der Betrieb dedizierter Remanufacturing-Zentren ökonomisch rentabel ist (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 4). Im Gegensatz zum *Reuse*, das sich ebenfalls als Kreislaufstrategie etabliert hat, besitzt das Remanufacturing aufgrund des wissenschaftlichen Interesses an der Kreislaufwirtschaft eine hohe Informationsverfügbarkeit an Fallstudien. Eine detaillierte Beschreibung aller Fallstudien lassen sich in Anhang A3 finden.

Anhand der ausgewählten Fallstudien ist eine wissenschaftlich fundierte Untersuchung des zirkulären Ökosystems für Kreislaufstrategien des unternehmensübergreifenden Werterhalts von Maschinen und Anlagen möglich. Die Auswahl der branchenübergreifenden Fallstudien aus dem B2B-Bereich erlaubt es, ein abstrahiertes Bild des Ökosystems zu ermitteln. Einschränkend ist zu erwähnen, dass über die Hälfte der Fallstudien von europäischen Unternehmen und Ökosystemen handelt, sodass es eine interkontinentale Gültigkeit des Beschreibungsmodells noch zu beweisen gilt. Die abgeleitete Beschreibung des Ökosystems wird im folgenden Unterabschnitt 5.2.3 detailliert vorgestellt.

5.2.3 Beschreibung des zirkulären Ökosystems für Investitionsgüter

Die Basis des Ökosystemansatzes ist zunächst die akkurate Definition des Wertversprechens, das im Ökosystem dem Nutzer angeboten wird (s. LEWRICK 2021, S. 7). Das Wertversprechen des betrachteten Ökosystems wurde bereits in Unterkapitel 5.1 herausgearbeitet und bezieht sich auf die identifizierten Kreislaufstrategien des *unternehmensübergreifenden Werterhalts* von Investitionsgütern. Das Wertversprechen des betrachteten Ökosystems besteht aus einem Angebot von Maschinen und Anlagen, die bereits mindestens einen Nutzungszyklus durchlaufen haben und daraufhin innerhalb des Ökosystems überprüft und, falls notwendig, aufbereitet werden. Dem Nutzer können dadurch eine schnellere Verfügbarkeit und Preise in Höhe von 50 % – 70 % des Neuwerts für aufbereitete Maschinen angeboten werden (s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 6; s. MORRIS 2016, S. 1; s. BOOTSMA 2016, S. 2; s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 10). Auf Grundlage dieses zentralen Wertversprechens wird das zirkuläre Ökosystem im folgenden Unterabschnitt modelliert. Zunächst werden dazu die erforderlichen Rollen identifiziert, um darauf folgend deren Beziehungen zu beschreiben.

Herleitung der Rollen von zirkulären Ökosystemen

Die ausgewählten Fallstudien bilden die Basis der Analyse erforderlicher und relevanter Rollen von zirkulären Ökosystemen für Investitionsgüter. Aufgrund der Nutzung von Sekundärliteratur über Suchterme ist hervorzuheben, dass eine Vielzahl der Fallstudien aus Sicht von Remanufacturing-Entitäten der Produkthersteller oder unabhängigen Remanufacturer beschrieben werden. Daher ist der *Original Equipment Manufacturer* (OEM) als Produkthersteller eine zentrale Rolle im zirkulären Ökosystem. Eine Ausnahme bildet die Fallstudie von SparePartsNow, deren primäres Geschäftsmodell darauf beruht, das Ersatzteilgeschäft von gebrauchten und aufbereiteten Komponenten ohne OEM abzuwickeln und dadurch Transaktionskosten zu reduzieren. Der Nutzer bildet die zweitgenannte Rolle im zirkulären Ökosystem. Das Geschäftsmodell der meisten Anbieter gebrauchter und aufbereiteter Produkte gegenüber dem Nutzer beruht auf dem Angebot einer günstigeren und schnelleren Alternative im Vergleich zum Teilewiederaufbau oder Neuteilen. Daher ist der Nutzer Adressat des Wertversprechens im zirkulären Ökosystem und gilt als zentrale Rolle. Darauf folgt die Rolle des Händlers, der als Intermediär zwischen Nutzer und Hersteller von neuen, gebrauchten und aufbereiteten Produkten agiert. Abhängig von der Vertriebsstrategie und erforderlichen Kundennähe des OEMs unterscheidet sich die Einbindung des Händlers zwischen den Fallstudien. Während Toyota seine Flurförderzeuge vorwiegend eigenständig vertreibt, nutzen John Deere und Renault ein umfangreiches Händlernetzwerk zur Kundenbindung (s. NIELSEN 2016; s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3; s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 7). Als verbindende Entität zwischen Nutzer und OEM ist die Rolle des Händlers somit im Kern des zirkulären Ökosystems einzuordnen.

In den Fallstudien werden die Remanufacturer in zwei Rollen aufgeteilt: *Original Equipment Remanufacturer* (OER) und unabhängige Remanufacturer. OER sind eigenständige Entitäten der OEM, die mit der Aufbereitung von Originalmaschinen beauftragt werden. Aus den Fallstudien geht hervor, dass sie in der Regel in Konkurrenz zu unabhängigen Remanufacturer stehen, deren Geschäftsmodell die Aufbereitung von gebrauchten Maschinen diverser Hersteller darstellt. Die unabhängigen Remanufacturer sind oftmals bereits am Markt etabliert, bevor ein OEM das Geschäftspotenzial entdeckt und eine eigene OER gründet. John Deere hat seinen OER zunächst als Joint-Venture mit der Springfield Remanufacturing Corporation gegründet, bevor sie das Unternehmen komplett übernommen haben (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 2). Ferner werden in den Fallstudien individuelle Servicedienstleister beschrieben, die beim Nutzer vor Ort Aufbereitungen durchführen können und aufbereitete Komponenten einsetzen. Insbesondere in der Instandhaltung werden für komplexe Komponenten aufbereitete Teile genutzt, um Kosten zu senken (s. BOOTSMA 2016). Für die Kreislaufstrategie des Repurpose wird eine eigene Rolle des Repurposers genannt, der die Umfunktionierung des Produkts durchführt. In der Fallstudie zum Repurpose von Fahrzeugbatterien muss diese Rolle auch die Anforderungen der neuen Nutzergruppe detailliert kennen, um einen kundenzentrierten Repurpose-Prozess durchlaufen zu können (s. SCHULZ-MÖNNINGHOFF U. EVANS 2023, S. 563). Überdies werden die Rollen des Komponentenlieferanten, des Recyclers und der Politik in

den Fallstudien erwähnt, ohne detailliert ihre Aufgaben im Ökosystem zu beschreiben. Der Komponentenlieferant ist Zulieferer von Komponenten, die ersetzt werden müssen und der Recycler nimmt zu ersetzende Komponenten zum Materialwert ab. Die Politik, in ihrer Funktion als gesetzgebende und regulierende Institution, wird speziell als Anreizgeber für die Förderung der Kreislaufwirtschaft wahrgenommen. Eine detaillierte Übersicht der abgeleiteten Rollen und ihrer Relevanz in den ausgewählten Fallstudien ist in Abbildung 5-11 zu sehen.

Rolle	Definition	Fallstudien									
		Hitachi - Baumaschinen	ATP - Fahrzeug- komponenten	PSS - Hydraulik- komponenten	Toyota - Flurförderzeuge	unbekannt - Schwerfahrzeuge	Renault - Lastkraftwagen	Mercedes-Benz - Fahrzeugbatterien	unbekannt - Werkzeug- maschinen	John Deere - Landwirt- schaftsmaschinen	SparePartsNow - Werkzeugmaschinen
Nutzer	Anwender und Inbetriebnehmer des originalen und aufbereiteten Produkts	X	X	X	X	X	X			X	X
OEM	Inverkehrbringer und Hersteller des Originalprodukts	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Händler	Intermediär zwischen Nutzer und Anbieter von neuen und aufbereiteten Produkten	X	X				X			X	X
OER	Subsidiäre Unternehmensgesellschaft des OEM zur Aufbereitung von Originalprodukten	X			X	X	X		X	X	
Unabhängiger Remanufacturer	Eigenständige Entität zur Aufbereitung von gebrauchten Produkten		X	X		X	X	X		X	X
Repurposer	Entität zur Aufbereitung und Umfunktionierung des gebrauchten Produkts für einen neuen Anwendungsfall								X		
Service-dienstleister	Vom Nutzer beauftragter Dienstleister zur Instandhaltung, Reparatur und Aufbereitung von gebrauchten Produkten			X			X				X
Komponenten-lieferant	Hersteller von Komponenten des Originalprodukts und Inverkehrbringer von Ersatzteilen			X			X			X	X
Recycler	Entität zur Verwertung des Materials gebrauchter Produkte	X		X	X	X		X			
Logistik-unternehmen	Lagerung und Transport von Produkten zwischen den wertschöpfenden Rollen	X				X					X
Politik	Institutionen mit gesetzgebenden und regulierenden Aufgaben im Sinne der Gesellschaft						X	X			
Neue Nutzergruppe	Anwender und Inbetriebnehmer von aufbereiteten Produkten in neuem Anwendungsfeld								X		

Abbildung 5-11: Übersicht der abgeleiteten Rollen in zirkulären Ökosystemen (eigene Darstellung)

Auf Basis der identifizierten Rollen wird im Folgenden das vollständige zirkuläre Ökosystem für den unternehmensübergreifenden Werterhalt von Investitionsgütern modelliert.

Fluss von Waren und Dienstleistungen

Das zirkuläre Ökosystem wird nach dem Forschungsansatz von DEN OUDEN beschrieben (s. DEN OUDEN 2011, S. 143ff.). Auf Grundlage der identifizierten Rollen wird dazu der Fluss von Waren und Dienstleistungen, von monetären Mitteln, von Informationen und von immateriellen Gütern im Folgenden modelliert. In Abbildung 5-12 ist zunächst das zirkuläre Ökosystem für den unternehmensübergreifenden Werterhalt mit Waren- und Dienstleistungsfluss visualisiert.

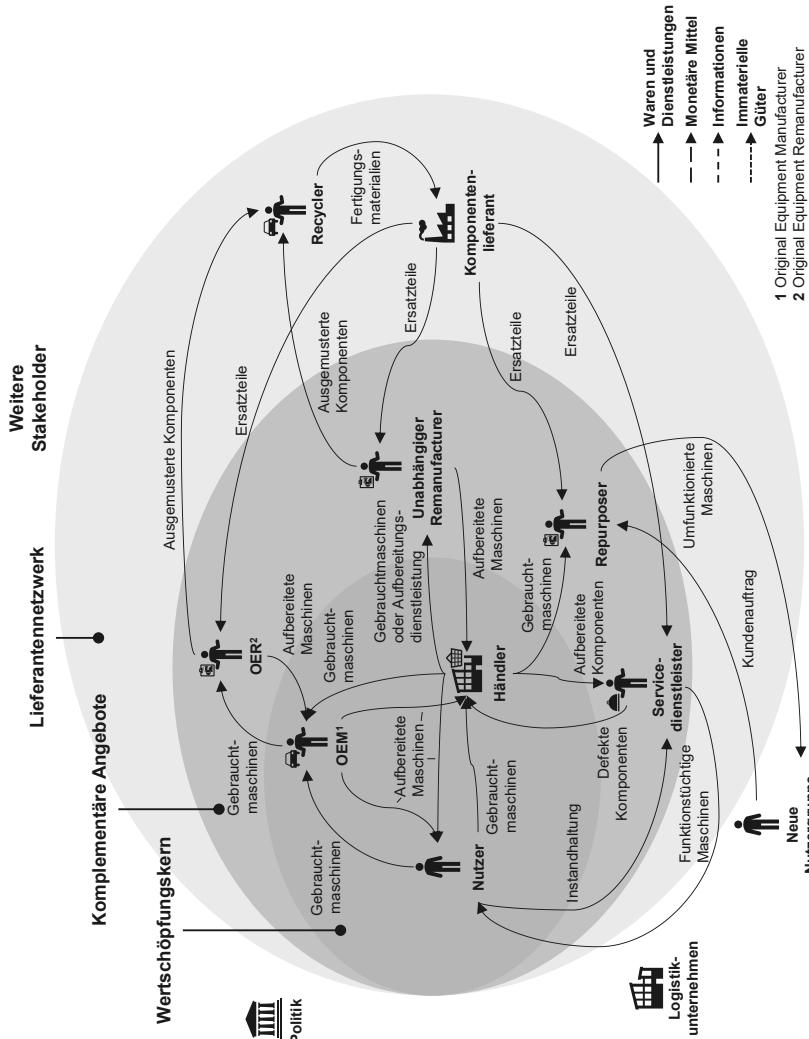


Abbildung 5-12: Waren- und Dienstleistungsfluss des zirkulären Ökosystems (eigene Darstellung, basierend auf Methode v. DEN OUDEN 2011, S. 143ff.)

Abbildung 5-12 umfasst die erste Ebene des Beschreibungsmodells in Form der Waren und Dienstleistungen, die für einen unternehmensübergreifenden Werterhalt ausgetauscht werden. Darunter sind die vier Kreislaufstrategien des *Reuse*, *Refurbish*, *Remanufacture* und *Repurpose* zusammengefasst. Allerdings unterscheidet sich die Relevanz spezifischer Rollen je nach Kreislaufstrategie. Daher wird das zirkuläre Ökosystem im Folgenden anhand dedizierter Visualisierungen der spezifischen Kreislaufstrategien beschrieben und erklärt.

Zunächst wird auf das zirkuläre Ökosystem der Kreislaufstrategie des *Reuse* eingegangen. Wie in Abbildung 5-13 zu erkennen ist, sind für diese Kreislaufstrategie die Rollen des Händlers, Nutzers, Servicedienstleisters und die erweiterten Rollen der Politik und der Logistikunternehmen involviert. Für die Wiederverwendung von kompletten Gebrauchtmassen verläuft der Warenfluss nur zwischen Händler und verschiedenen Nutzern, die eine Gebrauchtmasse erwerben. Für Komponenten ist überdies ein Servicedienstleister involviert, der gebrauchte Komponenten von einem Händler erwirbt und diese für die Aufbereitung von Maschinen des Nutzers verbaut. Diese Vorgehensweise wird auch im Rahmen der Instandhaltung von Investitionsgütern umgesetzt, um Ersatzteilkosten zu sparen.

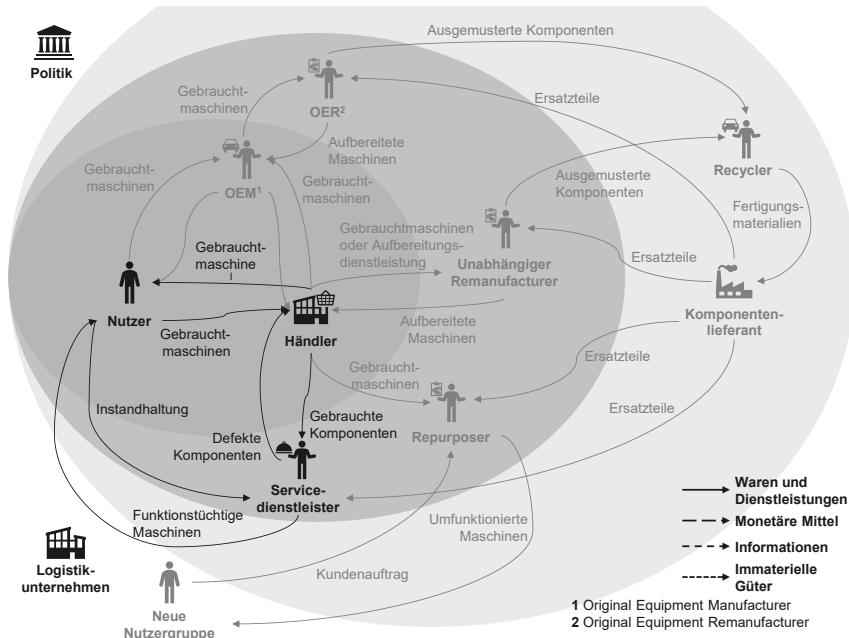


Abbildung 5-13: Waren- und Dienstleistungsfluss im zirkulären Ökosystem für die Kreislaufstrategie *Reuse* (eigene Darstellung, basierend auf Methode v. DEN OUDEN 2011, S. 143ff.)

Die Kreislaufstrategie des *Reuse* erfordert damit nur einen kleinen Kreis aus zentralen Akteuren, um ein funktionierendes Ökosystem zu entwickeln. Erfolgreiche Reuse-Ökosysteme stellen etwa der Gebrauchtwagenmarkt von Personen- und Lastkraftwagen dar, die sich insbesondere durch ein umfangreiches Händlernetzwerk und eine hohe Mobilität der Investitionsgüter auszeichnen.

Die Kreislaufstrategien des *Refurbish* und des *Remanufacture* werden in der folgenden Darstellung aggregiert, da die Unterscheidung zwischen Aufbereitung und Wiederherstellung des Originalzustands für das zirkuläre Ökosystem keine entscheidende Rolle spielt. In Abbildung 5-14 wird aufgezeigt, dass die Aufbereitung des Investitionsguts durch drei konkurrierende Rollen innerhalb des zirkulären Ökosystems durchgeführt werden kann. Es kann ein Refurbishment und Remanufacturing über den OER, über unabhängige Remanufacturer oder über freie Servicedienstleister verfolgt werden.

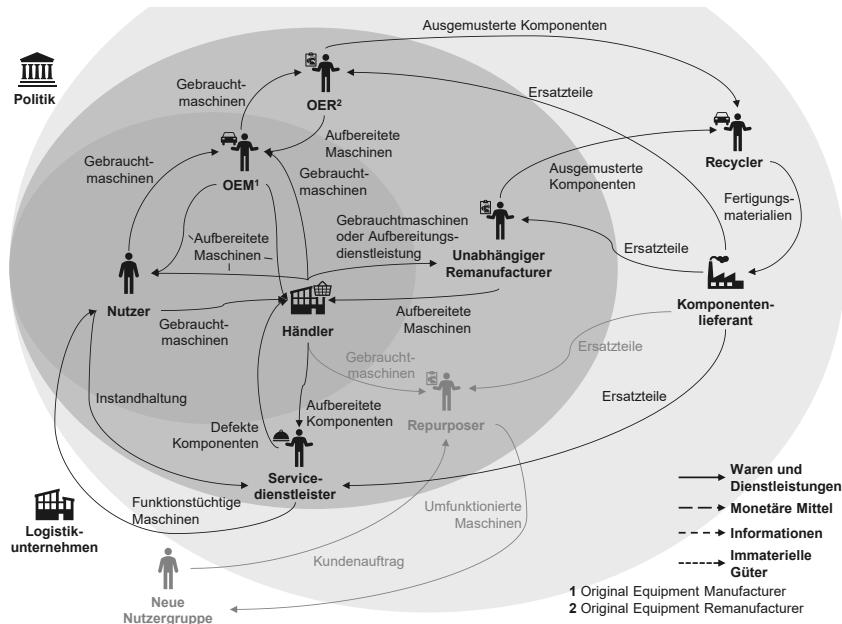


Abbildung 5-14: Waren- und Dienstleistungsfluss des zirkulären Ökosystems für die Kreislaufstrategien *Refurbish* und *Remanufacture* (eigene Darstellung, basierend auf Methode v. DEN OUDEN 2011, S. 143ff.)

Ausgehend vom Hersteller des Originalprodukts ist eine häufig vorkommende Umsetzungsform die Aufbereitung einer Maschine oder Anlage durch den OER (s. BOURGEOIS u. LELEUX 2005, S. 7; s. CHANDRASEKHAR u. FRASER JOHNSON 2018, S. 2). Unter Nutzung der Kundenschnittstelle über den OEM oder einen Händler bietet der OER in der Regel umfangreiche Aufbereitungsdienstleistungen der dazugehörigen Originalprodukte an. Zumeist ist der OER eine Tochtergesellschaft oder Organisationseinheit des OEM, die sich auf die Remanufacturing-Aktivitäten spezialisiert hat und dafür

eigene Fertigungszentren verwaltet (s. BOOTSMA 2016; s. NIELSEN 2016; s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 8ff.). Wahlweise über ein bestehendes Händlernetzwerk steht der OEM in direktem oder indirektem Kundenkontakt und orchestriert die Umsetzung der Produktwerterhaltung (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3; s. BOOTSMA 2016, S. 1). Für den Warenfluss nehmen OEM und Händler daher zentrale Rollen ein, indem sie Gebrauchtmassen an den OER weiterleiten oder aufbereitete Maschinen zurück zum Nutzer transferieren.

Im Wettbewerb zum OER stehen unabhängige Remanufacturer, die zwar vom OEM beauftragt werden können, allerdings als autonome Akteure im Ökosystem agieren und in der Regel eine direkte Konkurrenz zum OER bilden (s. BRAMMER 2016; s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 9). Im operativen Geschäft muss sich der unabhängige Remanufacturer über die Händler mit Gebrauchtmassen versorgen oder für eine Aufbereitungsdienstleistung beauftragen lassen (s. BRAMMER 2016, S. 1; s. MORRIS 2016, S. 1). Kundenkontakt findet dazu in der Regel durch den Händler statt und wird nur in seltenen Fällen direkt vom Remanufacturer durchgeführt. Der Warenfluss unterscheidet sich darüber hinaus kaum gegenüber dem Vorgehen eines OER.

Der Aufbereitungsprozess über freie Servicedienstleister betrachtet in der Regel die vollständige Maschinenaufbereitung im Kundenauftrag und den Einsatz von aufbereiteten Komponenten (s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 9; s. AHSGREN 2016, S. 1). Insbesondere in Maschinensegmenten, in denen der Aftermarket ausreichend gebrauchte oder aufbereitete Komponenten bereithält, kann diese Kreislaufstrategie durch freie Servicedienstleister verfolgt werden (s. BRAMMER 2016, S. 1). Ebenso werden die aufbereiteten Komponenten auch für Instandhaltungstätigkeiten eingesetzt. In der Regel stehen die Servicedienstleister in direktem Kontakt zum Nutzer, sodass der Händler nur für Komponenten eingeschaltet wird. Für den Fall vollständiger Maschinenaufbereitungen bleibt der Nutzer konstant im Besitz seiner Maschine und es findet kein Austausch statt (s. AHSGREN 2016, S. 1). Dies ist konträr zur definierten Kategorie des unternehmensübergreifenden Werterhalts und stellt eine Ausnahme im zirkulären Ökosystem dar.

Die letzte Kreislaufstrategie des unternehmensübergreifenden Werterhalts konzentriert sich auf den *Repurpose* bzw. die Umfunktionierung von Investitionsgütern. Im Kontrast zur Produktaufbereitung nimmt dabei der Repurposer aufgrund seines Fähigkeitsprofils die zentrale Rolle der Orchestration ein (s. SCHULZ-MÖNNINGHOFF U. EVANS 2023, S. 562f.). Dazu muss diese Rolle das technische und wirtschaftliche Potenzial der Gebrauchtmassen zur Umfunktionierung beurteilen können und zusammen mit potenziellen Nutzergruppen Anforderungsprofile erarbeiten, auf deren Basis eine sinnvolle Umfunktionierung realisierbar ist (s. SCHULZ-MÖNNINGHOFF U. EVANS 2023, S. 562ff.; s. KORTZ U. BUTZER 2016). In der Regel werden die gebrauchten Investitionsgüter über Händler akquiriert, nachdem das Anforderungsprofil aus der neuen Nutzergruppe bekannt ist. Eine technische Bearbeitung findet anschließend beim Repurposer statt, bevor das umfunktionierte Produkt an die neue Nutzergruppe ausgeliefert wird.

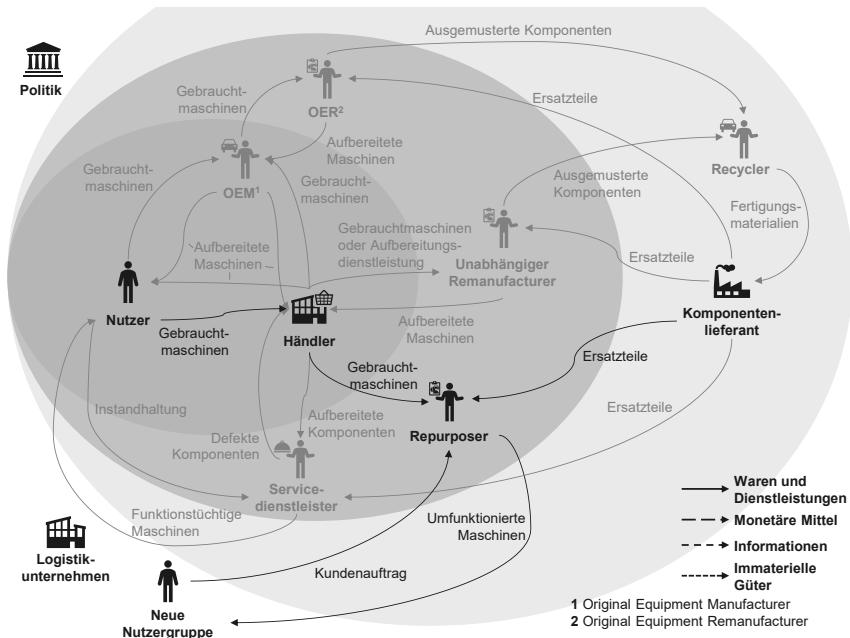


Abbildung 5-15: Waren- und Dienstleistungsfluss des zirkulären Ökosystems für die Kreislaufstrategie Repurpose (eigene Darstellung, basierend auf Methode v. DEN OUDEN 2011, S. 143ff.)

Die Modellierung der Waren- und Dienstleistungsflüsse zeigt die hohe Relevanz einer kontrollierten Rückführung von Gebrauchtware auf. Von Remanufacturern getriebene Kreisläufe agieren in einem Tauschsystem, in dem gebrauchte gegen aufbereitete Maschinen und Komponenten substituiert werden (s. BOOTSMA 2016; s. MORRIS 2016). Wird die Kreislaufstrategie dagegen von einem Servicedienstleister initiiert, wird zuerst auf aufbereitete Komponenten zurückgegriffen, die an derselben Maschine vor Ort getauscht werden. In beiden Prozessen ist die zentrale Herausforderung die Rückführung von gebrauchten Maschinen und Komponenten (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 4). Findet keine ausreichende Rückführung statt, kann das zirkuläre Ökosystem nicht langfristig und nachhaltig wirtschaften (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 4). CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON zitieren dazu einen Mitarbeiter von John Deere, der beschreibt, dass mindestens eine Quote von 75 % zurückgeführter Gebrauchtmassen für einen ökonomischen Betrieb eines Remanufacturers erforderlich ist (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 4).

Neben der ausführlichen Darstellung der Waren- und Dienstleistungsflüsse werden im Folgenden die ausstehenden Ebenen der Ökosystemmodellierung nach DEN OUDEN beschrieben. Zunächst wird auf den Fluss monetärer Mittel eingegangen, bevor Informationsfluss und Fluss immaterieller Güter näher beschrieben werden. Dazu sind die einzelnen Kreislaufstrategien im zentralen Ökosystem zusammengefasst und werden

in ihrer Gesamtheit betrachtet. Die Detaillierung dieses Absatzes kann ebenso auf die folgenden Ebenen der Ökosystemmodellierung übertragen werden.

Fluss von monetären Mitteln

Eine weitere Ebene umfasst den Fluss von monetären Mitteln zwischen den Akteuren, analog zum Warenfluss im zirkulären Ökosystem (s. Abbildung 5-16).

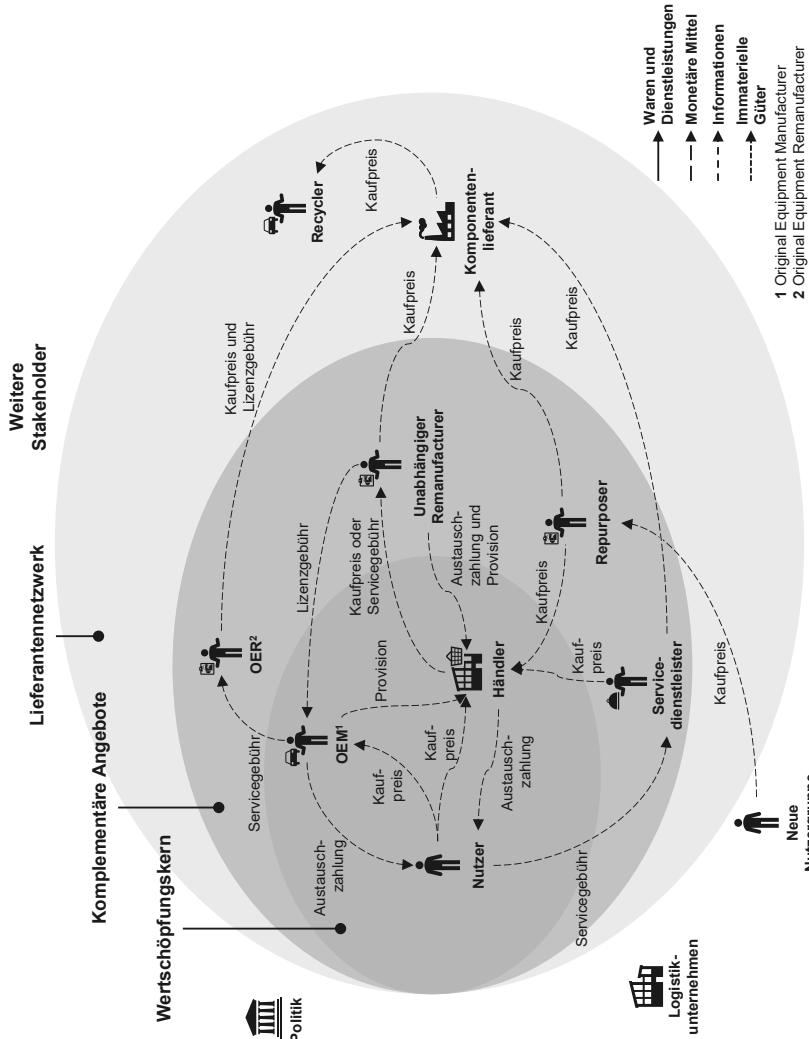


Abbildung 5-16: Fluss von monetären Mitteln des zirkulären Ökosystems (eigene Darstellung, basierend auf Methode v. DEN OUDEN 2011, S. 143ff.).

Demnach teilt sich für die Aufbereitung von Investitionsgütern die Art der Bezahlung in zwei Modalitätsformen auf: Die erste Form beschreibt die Entrichtung einer Servicegebühr für die Aufbereitung desselben Produkts (s. MORRIS 2016, S. 1). Insbesondere unabhängige Remanufacturer und Servicedienstleister nutzen diese Form der Zahlungsmodalität (s. BRAMMER 2016, S. 1). Die zweite Modalitätsform beschreibt ein Tauschsystem, in dem aufbereitete Maschinen mit einer Pfandgebühr verkauft werden, deren Rückzahlung an die Rückführung der ausgetauschten Gebrauchtmachine geknüpft ist (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 4; s. BRAMMER 2016, S. 1; s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 9). Das Tauschsystem ist in den Fallstudien die meistgenutzte Form, um einen konstanten Fluss eingehender Gebrauchtmaschinen zu gewährleisten und eine Basis aufzubereitender Maschinen zu besitzen. Weiterhin ist hervorzuheben, dass je nach Anwendungsfall sowohl OER als auch unabhängiger Remanufacturer für die Bereitstellung von geistigem Eigentum eine Gebühr entrichten müssen (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 2). Die OER sind dabei auf die Zusammenarbeit mit ihren Lieferanten angewiesen, die selbstständig eine Aufbereitung vornehmen oder die entsprechenden Lizzenzen und Informationen zur Verfügung stellen (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 2f.). Die unabhängigen Remanufacturer profitieren dagegen vom Wissen des OEM oder ihren Fähigkeiten des Reverse Engineering angewiesen, um einen effizienten Aufbereitungsprozess gewährleisten zu können (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 2f.).

Fluss von Informationen und immateriellen Gütern

Die verbleibenden zwei Modellierungsebenen handeln vom Austausch von Informationen und von immateriellen Gütern im Ökosystem. Unter den identifizierten Rollen lässt sich feststellen, dass der aktivste Informationsaustausch in einer Organisation zwischen OER und OEM zu erkennen ist (s. Abbildung 5-17).

Für vom OEM selbstständig entwickelte Komponenten findet ein aktiver Austausch von Produktinformationen mit dem OER statt, da Daten zum Design, zu Stück- oder Ersatzteillisten oder zu Lieferanten einfach verfügbar sind (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 2f.). Als untergeordnete Einheit erhält der OER im Gegenzug Zugriff auf erforderliche Patente und Lizzenzen zur Aufbereitung. Allerdings zeigt die Fallstudie von John Deere, dass eine Hürde geistiger Eigentumsrechte für extern entwickelte Komponenten vorherrscht (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 2f.). Für die Entwicklung ihres Antriebsstrangs sind sie auf die Daten ihrer Lieferanten angewiesen, die sie über eine Lizenzierung erwerben müssen (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 2). Neben dem zusätzlichen Kostenpunkt ist dabei die strategische Ausrichtung des Lieferanten ausschlaggebend. Entweder die Umsetzung der Kreislaufstrategie wird eigenständig verfolgt oder dem OEM wird Zugriff auf das geistige Wissen gewährt. Neben der Weitergabe technischer Daten zur effizienten Durchführung von Aufbereitungsprozessen stellt die unsichere Verfügbarkeit von Gebrauchtmaschinen eine Herausforderung für das zirkuläre Ökosystem dar (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 4). Als informationstechnische Unterstützung hat Hitachi daher ein Online-System entwickelt, das eine Nachverfolgbarkeit verkaufter Maschinen und

Komponenten ermöglicht sowie aktuelle Verkaufsstatistiken generiert (s. BOOTSMA 2016, S. 1). Das System wird genutzt, um den An- und Verkauf von Komponenten nachzuverfolgen sowie deren Rückführung zu buchen, sodass eine verbesserte Übersicht über Ein- und Ausgänge zur Verfügung steht (s. BOOTSMA 2016, S. 1).

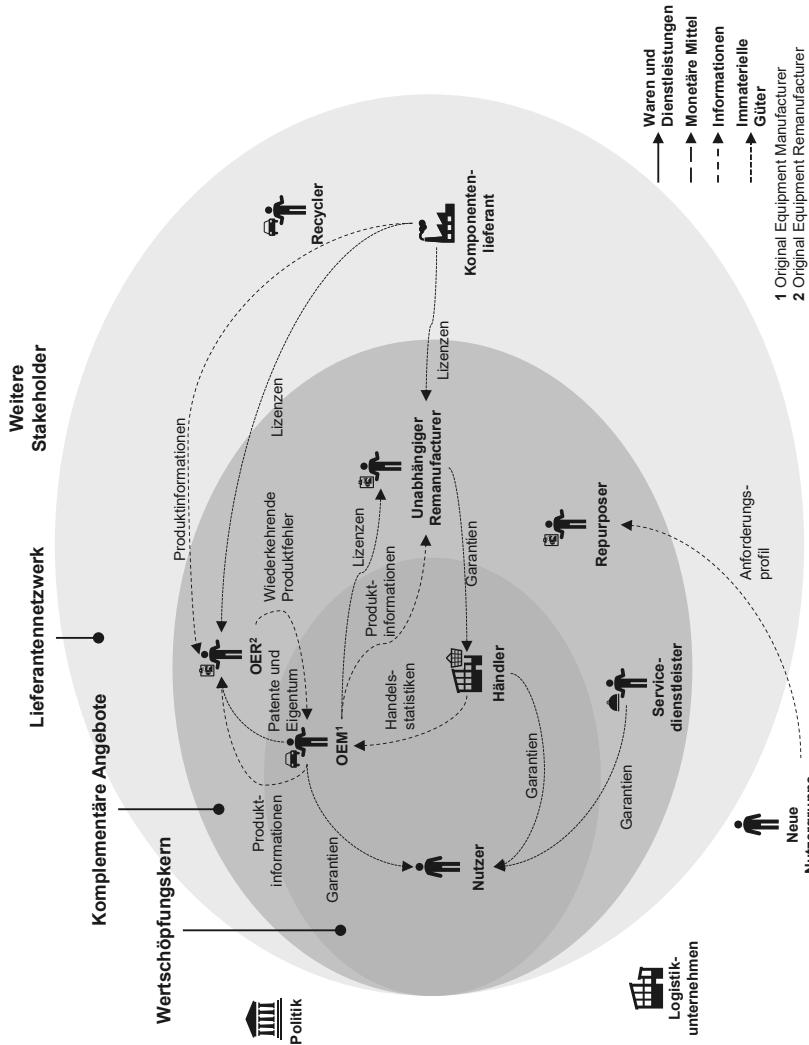


Abbildung 5-17: Fluss von Informationen und immateriellen Gütern des zirkulären Ökosystems (eigene Darstellung, basierend auf Methode v. DEN OUDEN 2011, S. 143ff.)

Für die Kreislaufstrategie des Repurpose ist zudem eine eigenständige Beschaffung von Informationen über das Anforderungsprofil des zukünftigen Anwendungsfalls erforderlich (s. SCHULZ-MÖNNINGHOFF u. EVANS 2023, S. 562ff.; s. KORTZ u. BUTZER 2016). Im Rahmen der Fallstudie von SCHULZ-MÖNNINGHOFF u. EVANS wurden Gespräche zur Anforderungsaufnahme geführt, um ein modulares Konzept von stationären Batteriespeichern zu entwickeln (s. SCHULZ-MÖNNINGHOFF u. EVANS 2023, S. 565ff.). Für den Repurpose von Tunnelbohrmaschinen steht das neue Bauprojekt im Vordergrund, um die Anzahl der aufbereiteten Teile zu kalkulieren, die für das neue Projekt umfunktioniert werden können (s. KORTZ u. BUTZER 2016).

Der Austausch immaterieller Güter beschränkt sich im Rahmen der Fallstudienanalyse auf Lizzenzen und Garantien. Die Lizenzierung des geistigen Eigentums wurde bereits im Rahmen der monetären Flüsse und des Informationsflusses beschrieben, wohingegen die Vergabe von Garantien für aufbereitete Maschinen ein zusätzliches Be trachtungselement darstellt. In der Fallstudie von Toyota Material Handling Schweden verändert sich die Garantiedauer je nach Grad der Aufbereitung (s. NIELSEN 2016, S. 1). In drei Stufen wird zwischen einer Garantiedauer von zwölf Monaten, neun Monaten und drei Monaten differenziert. Zwölf Monate Garantie werden an Neugeräte vergeben, neun Monate an Flurförderfahrzeuge mit 80 % des Neuwerts und drei Monate an solche mit 60 % des Neuwerts (s. NIELSEN 2016, S. 1). Insbesondere im Zweitmarkt stellt die Garantievergabe eine vertrauensbildende Maßnahme dar, um den Nutzern die Qualität aufbereiteter Güter zu belegen. Laut Hitachi stellt diese Skepsis immer noch ein Hindernis in der Umsetzung von Kreislaufstrategien dar, der mithilfe von Garantien entgegengewirkt wird (s. BOOTSMA 2016, S. 2).

Die Beschreibung des Ökosystems anhand des Ansatzes von DEN OUDEN hat ermöglicht, ein umfassendes Bild über die Interaktionen und Rollen in der Kreislaufwirtschaft des unternehmensübergreifenden Werterhalts zu erhalten. Dabei haben sich vier Ablaufmuster etabliert, die unterschiedliche Rollen beinhalten und zum Teil verschiedene Kreislaufstrategien verfolgen. Zur vollständigen Beschreibung des Ökosystems wird im folgenden Unterabschnitt 5.2.4 eine detaillierte Rollenbeschreibung in Anlehnung an Porters Wertkette und Lewricks Ökosystemdesign ergänzt.

5.2.4 Rollenbeschreibungen im zirkulären Ökosystem

In Unterabschnitt 5.2.3 wurde das Beschreibungsmodell des Ökosystems für unternehmensübergreifende Werterhaltung anhand der identifizierten Rollen und deren Austauschbeziehungen hergeleitet und in seiner Gesamtheit vorgestellt. Unterabschnitt 5.2.4 befasst sich darüber hinaus mit den detaillierten Rollenbeschreibungen und entwickelt ein tiefergehendes Verständnis, um eine notwendige Wissensbasis für das Erklärungsmodell in Unterkapitel 5.4 abzubilden. Die identifizierten Rollen lassen sich in zwei Kategorien einteilen. Im Wertschöpfungskern und dem komplementären Angebot findet die zentrale Umsetzung der Kreislaufstrategien durch die folgenden Rollen statt: Nutzer, OEM, Händler, OER, Unabhängiger Remanufacturer, Repurposer, Servicedienstleister. Die zweite Kategorie umfasst Rollen innerhalb des

Lieferantennetzwerks und weiterer Stakeholder im Ökosystem: Komponentenlieferant, Recycler, Logistikunternehmen, Politik, Neue Nutzergruppe. Im Folgenden wird eine detaillierte Rollenbeschreibung der Rollen aus der ersten Kategorie vorgestellt, um ein Verständnis für das Aufgabenfeld zur Erarbeitung des Erklärungsmodells zu erhalten. Das Lieferantennetzwerk, bestehend aus Komponentenlieferant und Recycler, sowie die weiteren Stakeholder, bestehend aus Politik, Logistikunternehmen und neuer Nutzergruppe, werden nicht näher betrachtet, da in ihren Rollen keine zentralen Wertversprechen angeboten werden. Eine zusammenfassende Einschätzung folgt allerdings im Anschluss an diese Ausführungen.

Nutzer

Die Rolle des Nutzers ist das Ziel des Wertversprechens und daher eine zentrale Rolle im zirkulären Ökosystem. Die vollständige Rollenbeschreibung ist in Abbildung 5-18 zusammengefasst.

Ökosystemspezifische Beschreibung

Motivation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schnellere Verfügbarkeit und geringere Kosten im Vergleich zu 	<ul style="list-style-type: none"> Neuware ▪ Ökologische Vorteile
Wertbeitrag	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutzung des Wertversprechens ▪ Bedarf funktionsfähiger Maschinen 	<ul style="list-style-type: none"> zur eigenen Leistungserstellung ▪ Vorgabe Nutzungsanforderungen
Geschäftsmodell	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eigenes Angebot maschinell hergestellter Produkte und 	Dienstleistungen

Wertkette der Unternehmenswertschöpfung

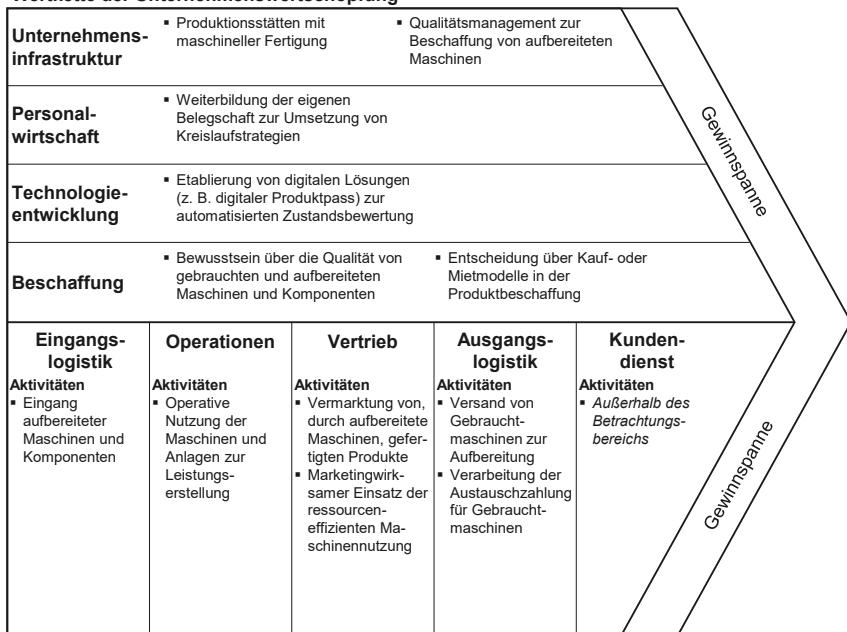


Abbildung 5-18: Rollenbeschreibung des Nutzers (eigene Darstellung, basierend auf Methode v. PORTER 2014, S. 64 u. LEWRICK 2021, S. 237)

Unter Anwendung vorgestellten Rollenbeschreibung aus der Wertkette nach PORTER und den Rollenbeschreibungen nach LEWICK in Unterabschnitt 5.2.1 besteht die Beschreibung aus einem ökosystemspezifischen und einem wertschöpfenden Abschnitt. Die Motivation zur Teilnahme am zirkulären Ökosystem setzt sich beim Nutzer aufgrund der schnellen Verfügbarkeit und geringen Preise zusammen (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3f.; s. BOOTSMA 2016, S. 1f.). Die Herausforderung liegt zumeist darin, in der Beschaffung das Bewusstsein zu schaffen, sodass ein Erwerb oder Leasing von aufbereiteten Maschinen zugelassen wird (s. BOOTSMA 2016, S. 2; s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 9). Dies zeigt sich auch in der Assoziation zwischen Preis und Qualität, die dazu führt, dass aufbereitete Maschinen geringwertiger eingestuft werden und sich dagegen entschieden wird (s. BOOTSMA 2016, S. 2). Dieser Assoziation wird bisher mit gleichen oder ähnlichen Garantieversprechen wie für Neuprodukte entgegengewirkt (s. NIELSEN 2016, S. 1; s. BOOTSMA 2016, S. 2). Zudem wird berücksichtigt, dass ein höherer Beratungsaufwand erforderlich ist, um aufbereitete Maschinen zu vertreiben (s. NIELSEN 2016, S. 1). Nach dem Einkauf fällt dem Nutzer zudem die Aufgabe zu, die vorher genutzten Gebrauchtmassen und Komponenten zurückzuführen, um eine Basis für weitere aufzubereitende Produkte zu liefern (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 4; s. MORRIS 2016, S. 1). In den Fallstudien werden verschiedene Anreizsysteme verwendet, um eine kontinuierliche Versorgung mit Gebrauchtmassen zu gewährleisten. Neben einer kostenlosen Rücksendung setzt die Mehrheit der Unternehmen auf eine Pfandgebühr, die bei Eingang der Gebrauchtmasse erstattet wird (s. BOOTSMA 2016, S. 1; s. BRAMMER 2016, S. 1; s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3f.). Hervorzuheben ist aus der Rollenbeschreibung, dass der Nutzer ein Geschäftsmodell abseits des hier betrachteten Ökosystems befolgt und daher nur das Wertversprechen konsumiert, um seiner eigenen Wertschöpfung nachzugehen. Daher fokussieren die hier nicht genannten Unternehmensaktivitäten interne Prozesse, die im Rahmen des zirkulären Ökosystems eine untergeordnete Relevanz besitzen.

Original Equipment Manufacturer (OEM)

Der OEM nimmt im B2B-Geschäft als erster Geschäftspartner des Nutzers und als Inverkehrbringer des Originalprodukts die darauffolgende Rolle im Wertschöpfungskern ein (s. Abbildung 5-19). Neben dem Händler, dessen Rollenbeschreibung im nächsten Absatz folgt, besitzt der OEM einen direkten Kontakt zum Nutzer und vertreibt neue sowie aufbereitete Maschinen und Anlagen (s. NIELSEN 2016, S. 1). In der Praxis ist das parallele Angebot von Neu- und Gebrauchtware eine Herausforderung für die Vertriebsbereiche in Unternehmen (s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 8). Aufgrund divergierender Anreizsysteme wird in der Regel der Vertrieb von Neuware bevorzugt. Bei Renault Trucks besitzen Händler klare finanzielle Anreize, auf Neuware zurückzugreifen (s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 8). Allerdings bieten alternative Geschäftsmodelle wie das Leasing für den OEM eine Steuerungsmöglichkeit, die durch einen reinen Produktverkauf nicht vorhanden wäre. Toyota Material Handling offeriert variierende Aufbereitungszustände ihrer Flurförderfahrzeuge je nach Leasingdauer (s. NIELSEN 2016, S. 1). Für kurze Leasingverträge werden gebrauchte oder aufbereitete

Fahrzeuge verwendet und für lange Leasingverträge wird auf Neufahrzeuge zurückgegriffen (s. NIELSEN 2016, S. 1).

Ökosystemspezifische Beschreibung

Motivation	<ul style="list-style-type: none"> Angebot für zeit- und preissensitive Nutzergruppen Ressourceneffizientes Angebot Reduktion von Garantiekosten
Wertbeitrag	<ul style="list-style-type: none"> Produktion und Inverkehrbringer des Originalprodukts Nutzerschnittstelle Geistiges Eigentum des Produkts
Geschäftsmodell	<ul style="list-style-type: none"> Verkauf aufbereiteter Maschinen oder Gebrauchtmassen Vermietung und Leasing von Neu-

Wertkette der Unternehmenswert schöpfung

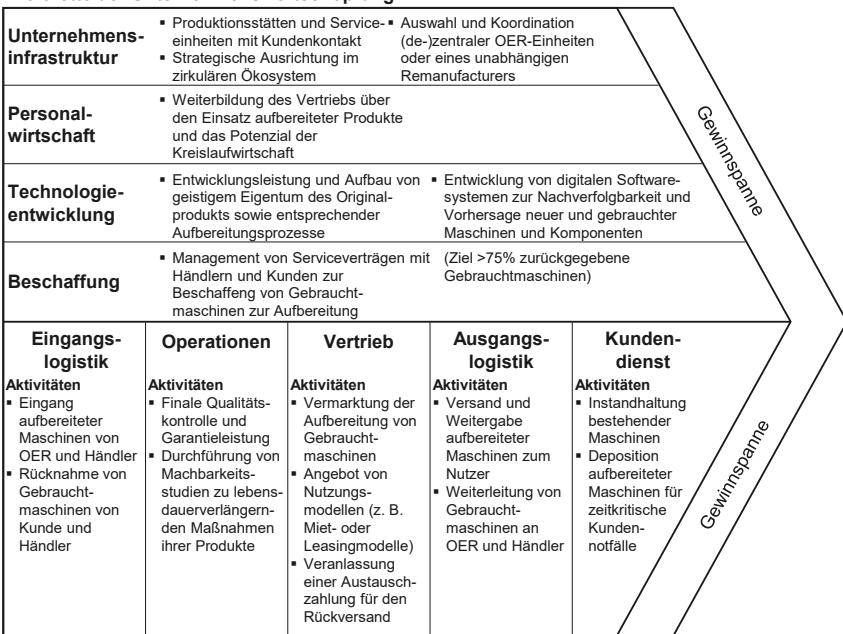


Abbildung 5-19: Rollenbeschreibung des OEM (eigene Darstellung, basierend auf Methode v. PORTER 2014, S. 64 u. LEWICK 2021, S. 237)

Im Allgemeinen stellt der Werterhalt der Produktionsmittel des Nutzers auch für den OEM einen relevanten Geschäftsbereich dar. Maschinenausfälle sind ungeplante Kosten, die in der Regel eine zeitkritische Reaktion erfordern, sodass eine schnelle und kostengünstige Auswahl auf dem Qualitätsniveau von Neuware als valide Alternative gilt (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 4f.). Weiterführend kann ein OEM die Aufbereitung nutzen, um seine Garantiekosten zu reduzieren (s. MORRIS 2016, S. 1). Folglich werden Komponenten aufbereitet, die einen bekannten Fehler besitzen und im Rahmen der Garantie ausgetauscht werden müssen (s. MORRIS 2016, S. 1). Der Austausch kann anschließend mit aufbereiteten Komponenten erfolgen, sodass eine Aufbereitung eine kostengünstige Alternative zu Neuware bietet. Weiterhin besteht für den OEM die Herausforderung der Bestandsoptimierung von

Gebrauchtmassen, die einer unsicheren Beschaffung und hohen Lagerkosten unterliegen (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 5). Angesichts dessen wurden verschiedene Softwaresysteme in den Fallstudien identifiziert, die zurückversendete Gebrauchtmassen verwalten und den Verkauf von Neuprodukten nachverfolgen (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 4; s. BOOTSMA 2016, S. 1). Dadurch lässt sich der Eingang von Gebrauchtmassen steuern und die werksinterne Kapazitätsplanung verbessern. Zusammenfassend eröffnet das zirkuläre Ökosystem neue Möglichkeiten für einen OEM, preis- und zeitsensitive Nutzergruppen zu adressieren, die im Gegenzug allerdings zu internen Herausforderungen führen.

Händler

Der Händler nimmt als Intermediär zwischen Nutzer und Anbieter von neuen, gebrauchten und aufbereiteten Produkten die dritte Rolle im Wertschöpfungskern ein. Dazu besitzt der Händler ein umfangreiches Aufgabenprofil (s. Abbildung 5-20).

Ökosystemspezifische Beschreibung

Motivation	<ul style="list-style-type: none"> Angebot für zeit- und preissensitive Nutzergruppen Ressourceneffizientes Angebot
Wertbeitrag	<ul style="list-style-type: none"> Produktzugang für Nutzer und Marktplatz für Hersteller Organisation von Handel und Rückführung von Gebrauchtmassen
Geschäftsmodell	<ul style="list-style-type: none"> Provisionsbasierter Verkauf neuer, gebrauchter und aufbereiteter Maschinen und Anlagen

Wertkette der Unternehmenswertschöpfung

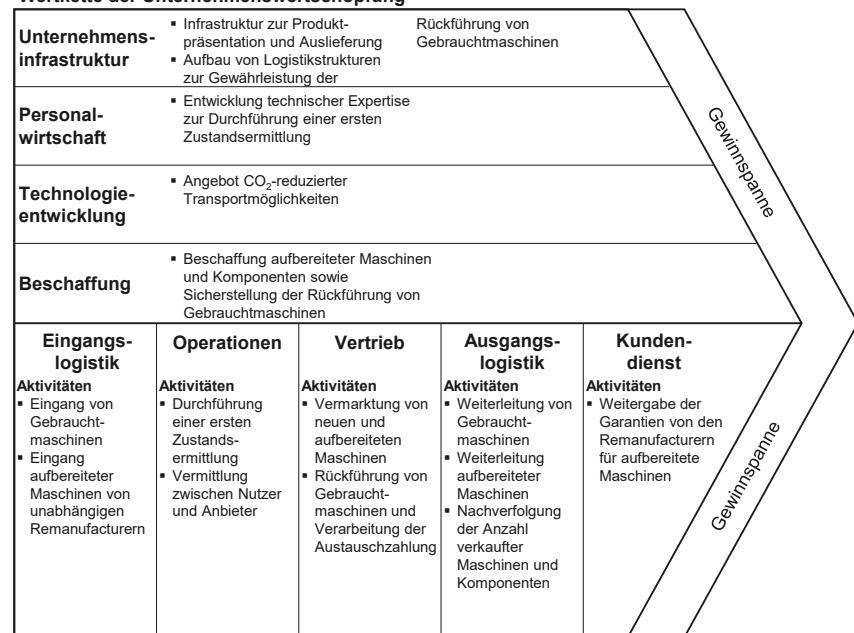


Abbildung 5-20: Rollenbeschreibung des Händlers (eigene Darstellung, basierend auf Methode v. PORTER 2014, S. 64 u. LEWRICK 2021, S. 237)

Die Motivation der Händler, am Ökosystem der unternehmensübergreifenden Werterhaltung von Maschinen und Anlagen teilzunehmen, ergibt sich aus der Kundenbindung, die durch ein Angebot aus schneller Verfügbarkeit zu günstigen Preisen erzielt werden kann (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3f.; s. BOOTSMA 2016, S. 1f.; s. BRAMMER 2016, S. 2). Auch wenn ein Zielkonflikt beim Händler entsteht, da finanzielle Anreize insbesondere den Verkauf von Neuware incentivieren, spricht dieses Geschäftsfeld kosten- und zeitsensitive Nutzergruppen an, die keine Neupreise zahlen würden (s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 6ff.).

Daraus ergibt sich der Wertbeitrag des Händlers, der einen Produktzugang für Nutzer und Marktplatz für Hersteller darstellt. Im Kontext der Kreislaufstrategien leistet der Händler darüber hinaus den Wertbeitrag der Weiterleitung und Rückführung von Gebrauchtmassen (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 4; s. BOOTSMA 2016, S. 1). Vor dem Hintergrund einer ökonomisch erforderlichen Quote von ca. 75 % zurückgeführter Gebrauchtmassen gilt der Händler als zentrale Schnittstelle im Rückführungsprozess (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 4f.). Dabei ist der Händler ebenso in Managementsysteme von Gebrauchtmassen integriert, die Rückführungen planen, abwickeln und konkrete Kapazitätsplanungen ermöglichen (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 4; s. BOOTSMA 2016, S. 1).

Der Händler ist zudem die erste Entität, die eine Zustandsabschätzung von Gebrauchtmassen durchführen kann. Für Remanufacturer stellt die Unsicherheit über den Arbeitsaufwand der Aufbereitung eine Herausforderung dar, die ohne digitale oder vorherige Zustandsbewertung nur in Ausnahmefällen gelöst werden kann (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 4). Zur Risikoreduktion wäre daher eine Zustandsermittlung am Sammelpunkt ein Lösungsansatz, der durch den Händler orchestriert werden kann (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 8). Toyota Material Handling hat in diesem Zusammenhang ein Konzept entwickelt, anhand dessen der Produktzustand bei Wareneingang von eins bis fünf bewertet werden kann (s. NIELSEN 2016, S. 1).

Original Equipment Remanufacturer (OER)

In der Kategorie der komplementären Angebote beschreibt die Rolle des OER eine subsidiäre Gesellschaft eines OEMs, der den Aufbereitungsprozess der vom OEM hergestellten Originalprodukte fokussiert. Das vollständige Rollenprofil wird dazu in Abbildung 5-21 präsentiert.

Die Hauptmotivation zur Gründung einer eigenen Remanufacturing-Einheit liegt in der Notwendigkeit, erforderliches Wissen zu bündeln und dedizierte Fähigkeiten in der Aufbereitung aufzubauen (s. BOOTSMA 2016, S. 1; s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 10). Der Aufbereitungsprozess erfordert eine entsprechend qualifizierte Belegschaft sowie die entsprechenden Werkzeuge und Produktionsstätten, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten, die in eigene Einheiten gebündelt werden (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 10; s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 2). Hervorzuheben ist dabei, dass sich keine eindeutige Strategie zwischen zentraler und dezentraler Verteilung von Aufbereitungszentren erkennen lässt. Während Toyota Material Handling 35 Aufbereitungszentren in Europa betreibt, besitzt der Hersteller von Schwerfahrzeugen nur ein

zentrales Aufbereitungszentrum in Finnland (s. NIELSEN 2016, S. 2; s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 8). Innerhalb des dezentralen Aufbaus ist das Wissensmanagement ein besonderer Baustein, den bspw. Hitachi bewusst adressiert, indem Remanufacturing-Potenziale analysiert und dieses Wissen innerhalb seiner Aufbereitungszentren geteilt werden (s. BOOTSMA 2016, S. 1).

Zudem nutzen OEM und OER die Umsetzung der Kreislaufstrategien zur Verbesserung ihres Energie- und Rohstoffbedarfs im Gegensatz zur Herstellung von Neuware (s. BOOTSMA 2016, S. 2). Es wird geschätzt, dass eine aufbereitete Komponente nur 10 % der Rohmaterialien eines Neuteils nutzt und somit 85 % der Energie einspart (s. BRAMMER 2016, S. 2).

Ökosystemspezifische Beschreibung

Motivation	<ul style="list-style-type: none"> Dediziertes Angebot für zeit- und preissensitive Nutzergruppen Profit durch OEM-Netzwerk und Originalprodukt zur Kundenbindung
Wertbeitrag	<ul style="list-style-type: none"> Aufbereitung von Gebrauchtmaschinen mithilfe von OEM-Daten Weitergabe von Produktverbesserungsvorschlägen an den OEM
Geschäftsmodell	<ul style="list-style-type: none"> Servicegebühr oder Provision für die Produktaufbereitung Unterstützung in der Kundenbindung für den OEM

Wertkette der Unternehmenswertschöpfung

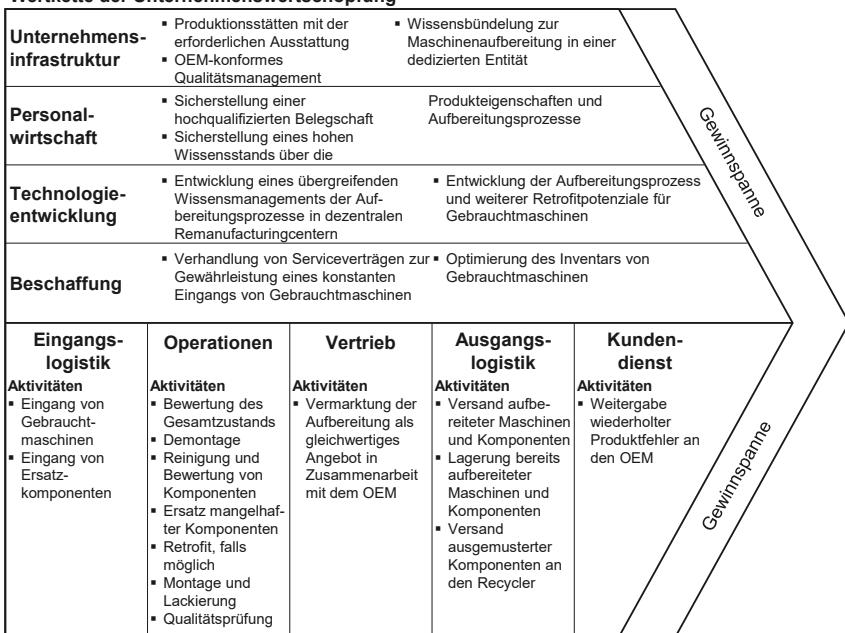


Abbildung 5-21: Rollenbeschreibung des OER (eigene Darstellung, basierend auf Methode v. PORTER 2014, S. 64 u. LEWICK 2021, S. 237)

Ein Vorteil der unternehmenseigenen Aufbereitung zeigt sich in der freien Verwendung des eigenen geistigen Eigentums (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 2f.). Dadurch kann auf Zeichnungsdaten, Stücklisten und weitere

Produktinformationen zurückgegriffen werden, die einem externen Dienstleister im Normalfall nicht zur Verfügung stehen (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 2f.). Für den OER ist es daher möglich, Retrofitansätze und Aktualisierungen in den Aufbereitungsprozess zu integrieren. So erhalten beispielsweise bei Renault Trucks Motoren in der Aufbereitung immer die aktuellste Konfiguration, sodass in der Regel eine Leistungssteigerung und Emissionsreduktion ermöglicht werden (s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 6).

Wie zuvor dargestellt, werden aufbereitete Maschinen und Komponenten im Normalfall in einem Tauschsystem angeboten. Um dabei eine schnelle Verfügbarkeit zu gewährleisten, müssen die Komponenten allerdings beim OEM oder OER inventarisiert sein (s. BOOTSMA 2016, S. 1). Dies hat zur Folge, dass die Bestandsoptimierung eine inhärente Herausforderung darstellt. Der OER muss unter den Faktoren Nachfrage, Verfügbarkeit von Gebrauchtmotoren und Aufbereitungskosten ein Optimum finden, dass eine schnelle Verfügbarkeit garantiert, ohne zu hohe Lagerkosten zu verursachen (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 5).

Unabhängiger Remanufacturer

Im Vergleich zur Rolle des OER ist der unabhängige Remanufacturer eine eigenständige Entität, die nicht an einen OEM gebunden ist. Dadurch ergibt sich eine leicht veränderte Rollenbeschreibung mit eigenem Aufgabenprofil (s. Abbildung 5-22).

Die Motivation des unabhängigen Remanufacturers unterscheidet sich zunächst vom OER. Während der OER aus der Notwendigkeit des OEM gegründet wird, definiert sich der unabhängige Remanufacturer über sein eigenständiges Geschäftsmodell. In der Regel wurden in der kurzfristigen und kostengünstigen Aufbereitung von gebrauchten Maschinen und Komponenten eine Ertragschance identifiziert und diese eigenständig umgesetzt (s. BRAMMER 2016, S. 1). Dadurch ergibt sich, dass unabhängige Remanufacturer bereits vor den OER gegründet wurden. Ein Beispiel zeigt sich in der Gründung von Springfield Remanufacturing³ aus dem Jahr 1983 und dem daraus entstandenen Joint-Venture mit John Deere im Jahre 1996, bevor eine vollständige Übernahme im Jahr 2002 folgte (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 2). Zudem wird ersichtlich, dass der unabhängige Remanufacturer in vielen Bereichen in direkter Konkurrenz zum OER steht und damit um Gebrauchtmotoren sowie Marktanteile konkurriert (s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 8f.). Außerdem der konkurrierenden Bereiche werden daher in der Regel Serviceverträge geschlossen und der unabhängige Remanufacturer übernimmt die Aufbereitung für den OEM oder OER (s. MORRIS 2016, S. 1).

³ Informationen von der Unternehmenswebseite entnommen: <https://www.srholdings.com/about> (Link zuletzt geprüft: 03.05.2024)

Ökosystemspezifische Beschreibung

Motivation	<ul style="list-style-type: none"> Eigenes, dediziertes Angebot für zeit- und preissensitive Nutzer 	<ul style="list-style-type: none"> Nischenposition und Skalierungseffekte durch übergr. OEM-Produkte
Wertbeitrag	<ul style="list-style-type: none"> Operative Aufbereitung von Maschinen und Anlagen 	<ul style="list-style-type: none"> Ausfallzeitenreduktion von Maschinen beim Nutzer
Geschäftsmodell	<ul style="list-style-type: none"> Servicegebühr für die Aufbereitung Ankauf von Gebrauchtmassen 	<ul style="list-style-type: none"> und Verkauf aufbereiteter Maschinen im Tauschsystem

Wertkette der Unternehmenswertschöpfung

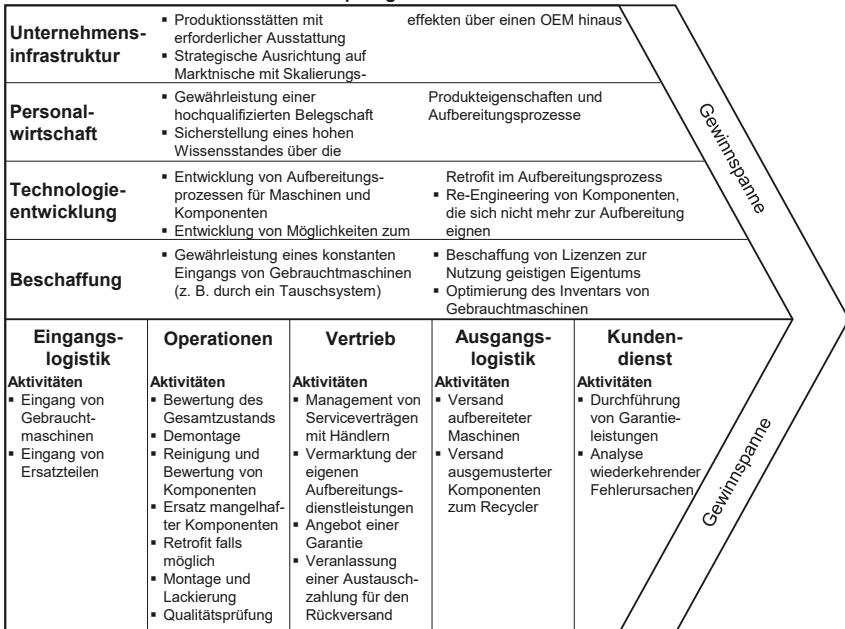


Abbildung 5-22: Rollenbeschreibung des unabhängigen Remanufacturers (eigene Darstellung, basierend auf Methode v. PORTER 2014, S. 64 u. LEWICK 2021, S. 237)

Darüber hinaus ergeben sich keine inhaltlichen Unterschiede zum Tätigkeitsbereich des OERs.

Repurposer

Die Rolle des Repurposers begrenzt sich im Gegensatz zu den vorherigen Rollenbeschreibungen auf die Kreislaufstrategie des Repurpose. Dies hat zur Folge, dass sich ein stark unterscheidendes Aufgabenprofil ergibt, dessen vollständige Darstellung in Abbildung 5-23 zu sehen ist.

Die Motivation eines Repurposers ergibt sich aus der Ressourceneffizienz und Kostenersparnis, die sich durch eine Umfunktionierung beim Nutzer erreichen lässt (s. SCHULZ-MÖNNINGHOFF u. EVANS 2023, S. 561; s. KORTZ u. BUTZER 2016). Jedoch befinden sich große Unterschiede zwischen den Reifegraden der Märkte und

Anwendungsfälle. Demnach existiert für Fahrzeugbatterien noch kein Markt des Remanufacturings, um genutzte Ladungsträger aufzubereiten, sodass die Verfolgung der Repurpose-Strategie alternativlos erscheint (s. SCHULZ-MÖNNINGHOFF u. EVANS 2023, S. 561). Dem entgegenzusetzen ist ein Beispiel aus dem Tunnelbau. Demnach hat der Hersteller Herrenknecht ein funktionierendes Repurpose-Geschäftsmodell etabliert, das Komponenten aus gebrauchten Tunnelbohrmaschinen einlagert, um diese in neuen Maschinen zukünftig weiterzuverwenden (s. KORTZ u. BUTZER 2016). Dies ist auch der Tatsache geschuldet, dass das Tunnelbohrgeschäft projektgetrieben ist, sodass die technische Haltbarkeit der Komponenten ein Vielfaches einzelner Tunnelbohrprojekte beträgt (s. KORTZ u. BUTZER 2016).

Ökosystemspezifische Beschreibung

Motivation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kostengünstiges und ressourcen- effizientes Angebot auf einer vorhandenen Produktbasis
Wertbeitrag	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entwicklung und Umfunktionierung von Gebrauchtmaschinen
Geschäfts- modell	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ankauf von Gebrauchtmaschinen und Verkauf umfunktionierter Maschinen ▪ Servicegebühr für das Repurpose

Wertkette der Unternehmenswertschöpfung

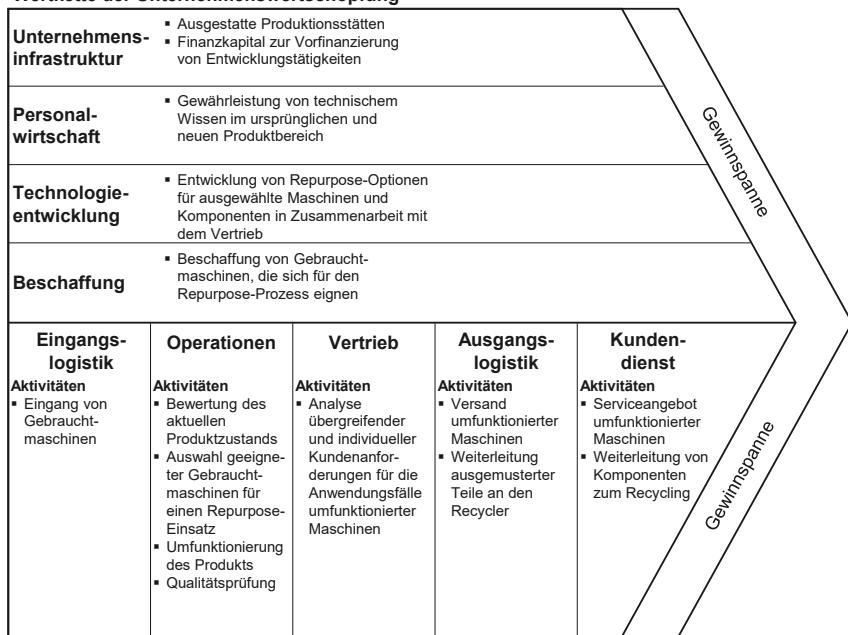


Abbildung 5-23: Rollenbeschreibung des Reposizers (eigene Darstellung, basierend auf Methode v. PORTER 2014, S. 64 u. LEWRICK 2021, S. 237)

Eine Voraussetzung zur Umsetzung ist allerdings eine vorgeschaltete Anforderungsanalyse des neuen Anwendungsfalls (s. SCHULZ-MÖNNINGHOFF u. EVANS 2023, S. 563). Je nach Veränderungsgrad müssen in der Rolle komplementäre technische

Kompetenzen verfügbar sein, um sowohl die Ausgangsbasis der Gebrauchtmaschine als auch den Zielzustand der Maschine entwickeln zu können (s. KORTZ U. BUTZER 2016). Dadurch ergibt sich ein erheblicher Mehraufwand und eine hohe Entwicklungsexpertise im Unternehmen, die im Beispiel von Herrenknecht direkt vom OEM geleistet wird.

Ein weiteres Risiko birgt die erforderliche Vorfinanzierung des Entwicklungsaufwandes in der Umsetzung des Repurpose-Ansatzes (s. SCHULZ-MÖNNINGHOFF U. EVANS 2023, S. 566). Folglich muss die mögliche Kundschaft bereits vor Finalisierung der Entwicklung in die Finanzierung involviert oder durch Investoren finanziell entlastet werden (s. SCHULZ-MÖNNINGHOFF U. EVANS 2023, S. 570). In der Fallstudie zur Umfunktionierung von Fahrzeugbatterien als Stromspeicher zeigt sich jedoch das finanzielle Potenzial des Ansatzes sehr deutlich (s. SCHULZ-MÖNNINGHOFF U. EVANS 2023, S. 568f.).

Servicedienstleister

Die letzte Rolle in der Ökosystemebene des komplementären Angebots stellt der Servicedienstleister dar. Der Servicedienstleister wird direkt vom Nutzer beauftragt und übernimmt Instandhaltung, Reparatur und Aufbereitung von Maschinen und Anlagen (s. Abbildung 5-24). Als Gegenleistung erhält er dafür eine Servicegebühr vom Auftraggebenden. Basierend auf den Fallstudien zeigt sich, dass ein Remanufacturing in der Regel von spezialisierten Unternehmen durchgeführt wird und Servicedienstleister in die Instandhaltung involviert sind. Daher sind Servicedienstleister motiviert, am zirkulären Ökosystem teilzunehmen, da sie mithilfe aufbereiteter Komponenten die Reparaturkosten reduzieren können (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3; s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 6). Damit profitieren sie ebenfalls von den Kostenvorteilen der Aufbereitung. Vorteilhaft für Servicedienstleister ist zudem das Ausbleiben eines Eigentümerwechsels. Die Maschinen des Kunden werden in der Regel vor Ort aufbereitet, sodass keine Tauschsysteme erforderlich werden.

Herausfordernd stellen sich aufgrund der fehlenden Spezialisierung auf Aufbereitungsprozesse die technische Grundausstattung und das kontinuierliche Wissen im Produktbereich dar. Demnach muss die ATP Industries Group regelmäßig ihr Produktportfolio anpassen, da die Aufbereitung gebrauchter Getriebe aus regulatorischen Gründen nicht mehr weiter verfolgt werden kann (s. MORRIS 2016, S. 1). Diese Entwicklungen sind für nicht spezialisierte Unternehmen entsprechend schwieriger zu antizipieren.

Ökosystemspezifische Beschreibung

Motivation	<ul style="list-style-type: none"> Kostengünstige Alternative zum Austausch von Neu-Komponenten Nutzerindividuelles Angebot ohne Tauschsystem
Wertbeitrag	<ul style="list-style-type: none"> Unabhängiger Reparaturservice mit Nutzung aufbereiteter Komponenten
Geschäftsmodell	<ul style="list-style-type: none"> Servicegebühr für die Instandhaltung und Aufbereitung von Maschinen

Wertkette der Unternehmenswertschöpfung

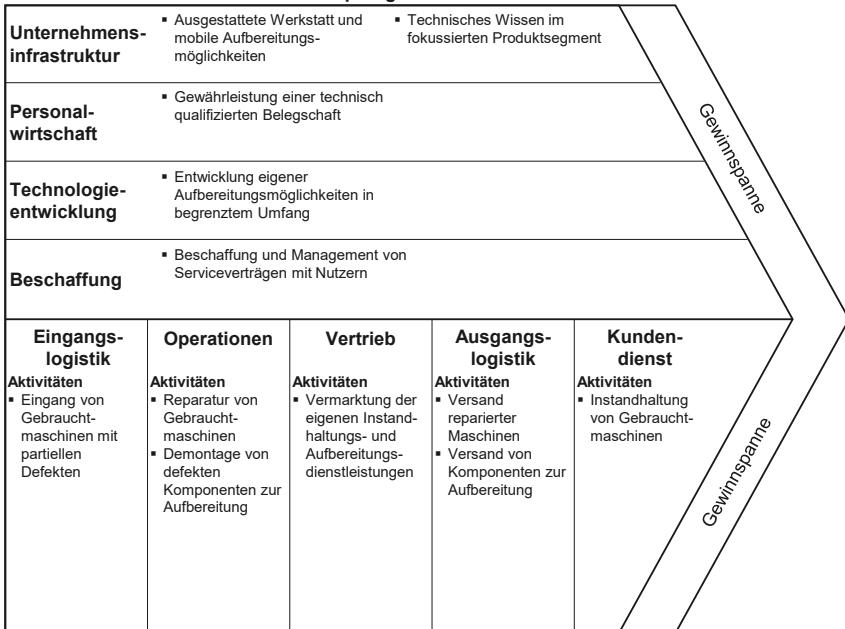


Abbildung 5-24: Rollenbeschreibung des Servicedienstleister (eigene Darstellung, basierend auf Methode v. PORTER 2014, S. 64 u. LEWRICK 2021, S. 237)

Weitere Rollen

Unter den weiteren Rollen werden im Kontext des Ökosystems der Kreislaufstrategien des unternehmensübergreifenden Werterhalts die Komponentenlieferanten, Recycler, Logistikunternehmen, Politik und neuen Nutzergruppen eingeordnet. Im Folgenden werden die relevanten Tätigkeiten in verkürzter Form beschrieben und in den Kontext des zirkulären Ökosystems gebracht.

In den Fallstudien hat sich gezeigt, dass der Komponentenlieferant im Regelfall Neuteile und -komponenten liefern muss, um im Aufbereitungsprozess die erforderlichen Verschleißteile ersetzen zu können (s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 13; s. BOOTSMA 2016, S. 1; s. BRAMMER 2016, S. 1). Dadurch befähigt der Komponentenlieferant das Remanufacturing, da das Erreichen der Originalqualität ohne den Austausch von Verschleißteilen kaum erreichbar ist (s. BOOTSMA 2016, S. 1). Der Komponentenlieferant investiert zudem eigene Entwicklungsressourcen in Standard- und

Spezialkomponenten, auf die er geistiges Eigentum und Patente hält (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3). Dies beeinflusst das potenzielle Tätigkeitsfeld des OER oder unabhängigen Remanufacturers, die entweder Lizenzen zur Nutzung des geistigen Eigentums erwerben, Re-Engineering-Ansätze entwickeln oder den Prozess an den Komponentenlieferanten abgeben müssen (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3). Somit kann der Komponentenlieferant je nach Anwendungsfalls eine unterschiedlich starke Rolle im Ökosystem einnehmen.

Die Rolle des Recyclers ist aufgrund der Auswahl der Kreislaufstrategien des unternehmensübergreifenden Werterhalts außerhalb des Betrachtungsbereichs, allerdings Teil des zirkulären Ökosystems. Laut Hitachi bestehen 15 % ihrer Pumpen aus kritischen Komponenten, die im Aufbereitungsprozess immer ausgetauscht werden (s. BOOTSMA 2016, S. 1). Die Komponenten, die nicht mehr weiterverwendet werden können, werden an einen Recycler gegeben, der den Materialwert entnehmen und in den Kreislauf zurückführen kann.

Neben dem Komponentenlieferanten übernimmt die Rolle des Logistikunternehmens eine befähigende Funktion innerhalb des zirkulären Ökosystems. Im Allgemeinen stellt der Transport von Maschinen und Komponenten eine Herausforderung dar (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 8). Dies liegt insbesondere an Transportkosten, zusätzlichen Gebühren und Verzögerungen, die einen Einfluss auf die Kapazitätsplanung in Remanufacturing-Zentren und die Durchlaufzeit haben (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 8). Dies führt im Fall des finnischen Herstellers von Schwerlastfahrzeugen dazu, dass nur für bestimmte Regionen eine Aufbereitung angeboten werden kann, da die Kosten für Logistik, Zoll und Steuern einen erheblichen Teil der Gebrauchtmaschine ausmachen und damit kein wirtschaftlich attraktives Angebot geschaffen werden kann (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 9).

Die Rolle der Politik hat mit ihren Verwaltungsorganen als gesetzgebende und regulierende Institution einen Einfluss auf das zirkuläre Ökosystem. Bereits zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Dissertationsschrift gibt es Vorgaben für die Recyclingfähigkeit von Produkten, wie am Beispiel der Fahrzeugindustrie zu sehen ist (s. VOLKSWAGEN AG 2022, S. 61). Die Fallstudienanalyse hat aufgezeigt, dass eine Umsetzung der Kreislaufstrategien des unternehmensübergreifenden Werterhalts ausschließlich aus betriebswirtschaftlichen Gründen verfolgt wurde. Durch politisches Eingreifen kann eine Verknüpfung der Ökologie an betriebswirtschaftliche Kennzahlen (z. B. CO₂-Emissionszertifikate) einen Einfluss auf die Umsetzung weiterer Kreislaufstrategien entfalten (s. JUNG ET AL. 2021, S. 7). Ebenso erhält die Politik eine regulierende Rolle, die sie dazu befähigt, Unternehmen und Produkte auf ihre gesetzliche Konformität zu kontrollieren (s. BERG ET AL. 2021, S. 59).

Die neue Nutzergruppe als eigenständige Rolle ist dadurch definiert, dass sie durch die Repurpose-Strategie aufbereitete Maschinen mit neuen Funktionalitäten für ihre Wertschöpfung verwendet (s. BUCHBERGER ET AL. 2019, S. 14). Die Motivation zur Nutzung von umfunktionierten Maschinen ergibt sich insbesondere aus Preisvorteilen gegenüber Neuware sowie dem ökologischen Vorteil der Nutzung eines bestehenden

Produktkerns (s. KORTZ U. BUTZER 2016; s. SCHULZ-MÖNNINGHOFF U. EVANS 2023, S. 568f.). Dadurch unterscheidet sich die Rolle nur marginal von der Rolle des Nutzers. Übergreifend ermöglicht die Rolle einer neuen Nutzergruppe die Reduktion der Lebenszykluskosten, wie SCHULZ-MÖNNINGHOFF am Beispiel einer Batterie aufgezeigt hat (s. SCHULZ-MÖNNINGHOFF U. EVANS 2023, S. 569).

5.2.5 Zusammenfassung und Reflexion

Durch eine Modellierung des zirkulären Ökosystems für die Kreislaufstrategien des unternehmensübergreifenden Werterhalts lässt sich ein Verständnis über die Interaktion der Akteure entwickeln und relevante Rollen beschreiben. Dazu wurde sich an der Ökosystembeschreibung nach DEN OUDEN orientiert und anhand der Fallstudienforschung nach EISENHARDT befüllt. Insgesamt wurden neun relevante Fallstudien identifiziert und ausgewählt. Auf Basis dieser Fallstudien konnten in Summe sieben zentrale und fünf ergänzende Rollen abgeleitet werden, deren Aktivitäten mithilfe der Wertkette nach PORTER eingeordnet wurden. Unter den zentralen Rollen lassen sich die *Nutzer*, der *OEM*, die *Händler*, der *OER*, die *unabhängigen Remanufacturer*, der *Repurposer* und die *Servicedienstleister* zusammenfassen, die ergänzt werden durch die *Komponentenlieferanten*, die *Recycler*, die *Logistikunternehmen*, die *Politik* und die *neuen Nutzergruppen*. Anhand der Rollen wurde das zirkuläre Ökosystem abgeleitet und die Interaktion in den Kategorien *Waren und Dienstleistungen*, *monetäre Mittel*, *Informationen* sowie *immaterielle Güter* beschrieben. In Abbildung 5-25 werden die Ergebnisse der Ökosystemanalyse in einer Zuordnung der Rollen zu den Ökosystemcharakteristika abhängig von der betrachteten Kreislaufstrategie zusammengefasst. Es wird resümiert, dass abhängig von der betrachteten Kreislaufstrategie und Transaktionsart nur bestimmte Rollen im zirkulären Ökosystem erforderlich sind. Somit kann bereits in der Ökosystemgestaltung auf die, aus den Fallstudien abgeleitete, Referenz zurückgegriffen werden.

Auch wenn diese Rollen innerhalb des Ökosystems ein gemeinsames Wertversprechen der Lebensverlängerung von Produkten realisieren, hat sich in den Fallstudien die Konkurrenzsituation einzelner Rollen offenbart, die sich in der Praxis in der Informationsverfügbarkeit kontraproduktiv darstellen wird. Beispielsweise befinden sich OER und unabhängiger Remanufacturer in einer konstanten Konkurrenzsituation um den Absatz ihrer Produkte, allerdings auch in der Beschaffung von Gebrauchteilen. Bisher profitieren OER von ihrem Wissensvorsprung aufgrund einer unternehmerischen Nähe zum OEM. Eine Informationsparität infolge des digitalen Produktpasses kann hierauf allerdings einen erheblichen Einfluss entfalten. Diese Entwicklungen können innerhalb einer theoretisch konzeptionellen Betrachtung nicht tiefergehend bewertet werden. Ebenso befinden sich die Rollen des OEMs oder Nutzers in einer derzeitigen Situation der Informationshoheit, die sie ohne dedizierte Anreizsysteme nicht aufgeben werden. Hier gilt es weitere Forschungsarbeit zu investieren, um potenzielle Anreizmechanismen zu identifizieren und bewerten.

Rolle	Definition	Kreislaufstrategien des unternehmensübergreifenden Werterhalts											
		Reuse				Refurbish/ Remanufacture				Repurpose			
		WD	MM	I	IG	WD	MM	I	IG	WD	MM	I	IG
Nutzer	Anwender und Inbetriebnehmer des originalen und aufbereiteten Produkts	X	X	X		X	X	X		X	X		
OEM	Inverkehrbringer und Hersteller des Originalprodukts			X		X	X	X					
Händler	Intermediär zwischen Nutzer und Anbieter von neuen und aufbereiteten Produkten	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	
OER	Subsidiäre Unternehmensgesellschaft des OEM zur Aufbereitung von Originalprodukten					X	X	X	X				
Unabhängiger Remanufacturer	Eigenständige Entität zur Aufbereitung von gebrauchten Produkten					X	X	X	X				
Repurposer	Entität zur Aufbereitung und Umfunktionierung des gebrauchten Produkts für einen neuen Anwendungsfall									X	X	X	
Service-dienstleister	Vom Nutzer beauftragter Dienstleister zur Instandhaltung, Reparatur und Aufbereitung von gebrauchten Produkten	X	X			X	X	X	X				
Komponenten-lieferant	Hersteller von Komponenten des Originalprodukts und Inverkehrbringer von Ersatzteilen					X	X	X	X	X	X	X	
Recycler	Entität zur Verwertung des Materials gebrauchter Produkte					X	X	X					
Logistik-unternehmen	Lagerung und Transport von Produkten zwischen den wertschöpfenden Rollen	X	X	X		X	X	X		X	X		
Politik	Institutionen mit rechtsgebenden und marktüberwachenden Aufgaben im Sinne der Gesellschaft	X				X				X		X	
Neue Nutzergruppe	Anwender und Inbetriebnehmer von aufbereiteten Produkten in neuem Anwendungsfeld									X	X	X	

Legende: WD = Waren und Dienstleistungen; MM = Monetäre Mittel; I = Informationen; IG = Immaterielle Güter

Abbildung 5-25: Zuordnung der Rollen im zirkulären Ökosystem abhängig von der betrachteten Kreislaufstrategie und Transaktionsart (eigene Darstellung)

Im weiteren Verlauf dieses Dissertationsvorhabens bilden die identifizierten Rollen die Grundlage der Informationsmodellierung und werden im Wirkmodell hinsichtlich ihrer Assoziation mit kreislaufrelevanten Produktinformationen untersucht. Die beschriebenen Rollenbeschreibungen unterstützen darüber hinaus im Verständnis der Tätigkeits- und Verantwortungsbereichs der einzelnen Rollen, um daraus die relevanten Wirkungsbeziehungen identifizieren zu können. Anhand der Ökosystembetrachtung konnte somit die zweite Forschungsfrage geklärt werden:

Welche Rollen sind für die Umsetzung der Kreislaufstrategien notwendig und in welchen Beziehungen müssen diese zueinander stehen?

Im folgenden Abschnitt 5.3 werden die kreislaufrelevanten Produktinformationen klassifiziert, die die inhaltlichen Komponenten des Informationsmodells bilden werden.

Dazu werden sowohl bestehende Informationssysteme sowie zukünftige Anforderungen an zirkuläre Informationsmodelle betrachtet.

5.3 Beschreibungsmodell kreislaufrelevanter Produktinformationen

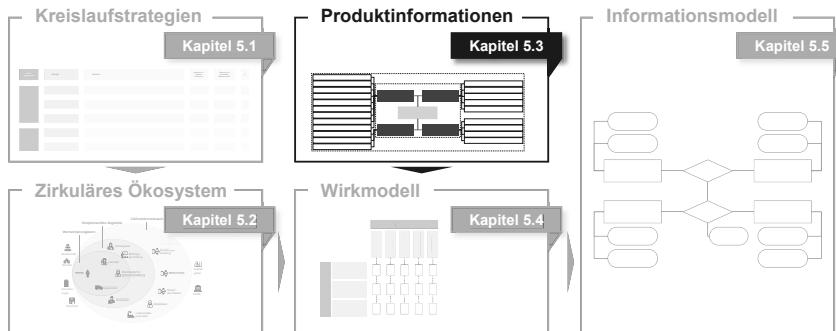


Abbildung 5-26: Klassifizierung von Produktinformationen des unternehmensübergreifenden Werterhalts von Maschinen und Anlagen (eigene Darstellung)

Das Ziel dieses Unterkapitels ist die Beantwortung der Forschungsfrage:

Welche Produktinformationen werden für die Umsetzung der Kreislaufstrategien benötigt und wie können diese klassifiziert werden?

Bezugnehmend auf die Erkenntnisse aus Unterabschnitt 3.2.3 wird im Rahmen der dritten Forschungsfrage der Inhalt des Informationsmodells untersucht, um die erforderlichen Informationsentitäten für lebensdauerverlängernde Kreislaufstrategien zu identifizieren. Die Notwendigkeit eines solchen Modells lässt sich daraus ableiten, dass die vorhandenen Forschungsaktivitäten sich auf die Architektur zur Realisierung möglicher Informationsmodelle konzentrieren und die inhaltliche Ausgestaltung den Unternehmen überlassen (s. Unterabschnitt 3.2.3). Eine wissenschaftlich begleitete Diskussion über den Inhalt solcher Informationsmodelle findet bislang nicht statt (s. BERGER ET AL. 2022, S. 1f.). Das Ziel dieses Unterkapitels ist demnach die Entwicklung einer Klassifizierung, die eine Beschreibung erforderlicher Produktinformationen für die Kreislaufstrategien des unternehmensübergreifenden Werthaltens liefert und als Eingangsgröße für das sich anschließende Informationsmodell verwendet werden kann.

Dazu wird in Unterabschnitt 5.3.1 zunächst das methodische Vorgehen vorgestellt, das eine Anforderungsanalyse umfasst, die sich auf Erkenntnisse aus Wissenschaft und Politik stützt (s. Unterabschnitt 5.3.2). Überdies findet eine Bestandsaufnahme statt, die die Datenverfügbarkeit existierender Informationssysteme überprüft und mit den identifizierten Anforderungen abgleicht (s. Unterabschnitt 5.3.3). Das abgeleitete Beschreibungsmodell relevanter Produktinformationen für die Kreislaufwirtschaft wird in Form einer Klassifizierung in Unterabschnitt 5.3.4 vorgestellt.

5.3.1 Methodisches Vorgehen zur Entwicklung des Beschreibungsmodells

Die Identifikation und Klassifizierung von Produktinformationen im Rahmen des unternehmensübergreifenden Werterhalts stellen eine erhebliche Herausforderung dar, da eine Informationsgrundlage geschaffen werden muss, die zum einen im Umfang ausreichend ist und zum anderen in ihrer Komplexität handhabbar bleibt. Dazu gilt es zu beachten, dass bereits eine hohe Informationsverfügbarkeit in der Industrie besteht, die für die Anwendbarkeit eine Informationsmodells (bspw. in Form einer Datenbank) berücksichtigt werden muss (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 3).

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, besteht der gewählte Forschungsansatz aus einer Anforderungsbetrachtung des Inhalts für eine Informationsmodellierung und eine Bestandsaufnahme von Produktinformationen in der produzierenden Industrie (s. Abbildung 5-27).

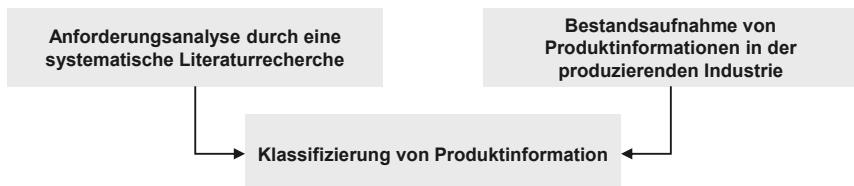


Abbildung 5-27: Methodisches Vorgehen zur Entwicklung der Klassifizierung von Produktinformationen (eigene Darstellung)

Zur Identifizierung der inhaltlichen Anforderungen wird auf den Forschungsansatz der IEEE Computer Society zurückgegriffen (s. IEEE COMPUTER SOCIETY 2014, S. 1-4ff.). Die Autoren schlagen eine vierstufige Methode vor, die aus den Prozesselementen *Anforderungserhebung*, *Anforderungsanalyse*, *Anforderungsspezifikation* und *-validierung* besteht (s. IEEE COMPUTER SOCIETY 2014, S. 1-4). Die Anforderungserhebung beschreibt den Erfassungsprozess der Anforderungen durch den Bearbeiter (s. IEEE COMPUTER SOCIETY 2014, S. 1-5ff.). Dazu wird auf eine systematische Literaturrecherche nach der PRISMA-Methode zurückgegriffen (s. Unterkapitel 3.1). Die Anforderungsanalyse umfasst die Strukturierung von Anforderungen in eine Ordnung, die in der Praxis implementiert werden kann (s. IEEE COMPUTER SOCIETY 2014, S. 1-7). Anschließend beinhaltet die Anforderungsspezifikation eine Aufbereitung der Daten, so dass diese überprüft und bewertet werden können (s. IEEE COMPUTER SOCIETY 2014, S. 1-10). Zum Abschluss des Vorgehens wird eine Verifizierung durchgeführt, ob die Anforderungen vom Bearbeiter korrekt verstanden wurden (s. IEEE COMPUTER SOCIETY 2014, S. 1-11). Die Anforderungserhebung und -analyse werden in Unterabschnitt 5.3.2 vorgestellt und anschließend für eine Weiterverwendung aufbereitet. In Unterabschnitt 5.3.3 wird anschließend die Informationsverfügbarkeit von Produktinformationen in der produzierenden Industrie erfasst. Dazu werden mithilfe der identifizierten Anforderungen bestehende Informationssysteme überprüft und bewertet. Abschließend wird aus den Anforderungen und existierenden Produktinformationen eine Klassifizierung für die Informationsmodellierung abgeleitet und vorgestellt (s.

Unterabschnitt 5.3.4). Die Methode der Klassifizierung stützt sich auf das beschriebene Vorgehen aus Unterabschnitt 4.2.3. Eine Validierung des entwickelten Informationsmodells findet abschließend in Kapitel 6 statt.

5.3.2 Anforderungen an kreislaufrelevante Produktinformationen

Die Durchführung des Forschungsansatzes zur Anforderungsermittlung wird im Folgenden für Produktinformationen des unternehmensübergreifenden Werterhalts vorgestellt. Dazu wird der Prozess zur Anforderungsermittlung und -bewertung DER IEEE COMPUTER SOCIETY durchlaufen.

Anforderungserhebung

Die Anforderungserhebung befasst sich mit der Entstehung von Softwareanforderungen und der Erhebung ebendieser (s. IEEE COMPUTER SOCIETY 2014, S. 1-5). Zur Datenerhebung wird im Rahmen einer systematischen Literaturrecherche die PRISMA-Methode verwendet (s. MOHER ET AL. 2009; s. PAGE ET AL. 2021; s. VOM BROCKE ET AL. 2009, S. 2211ff.). Eine detaillierte Beschreibung des Vorgehens kann in Unterkapitel 3.1 nachgelesen werden. Als ausgewählter Suchterm wurde der Begriff des *Digital Product Passport* (dt. digitaler Produktpass) gewählt, der auf politischer und wissenschaftlicher Ebene den Diskurs zur lebenszyklusübergreifenden Verwaltung von Produktinformationen prägt (s. Unterabschnitt 3.2.3). Mit Eingabe der Suchterme konnten in Scopus, Google Scholar und IEEE Xplore übergreifend 140 Quellen identifiziert werden (s. Abbildung 5-28). Nach Eliminierung von Duplikaten und Publikationen, die vor dem Jahr 2018 veröffentlicht wurden, konnten 10 Artikel detailliert analysiert werden. Anhand einer Vorwärts-Rückwärts-Analyse konnten vier weitere wissenschaftliche Artikel sowie sechs Positionspapiere aus der Politik identifiziert und hinzugefügt werden. Die Anforderungsanalyse umfasst somit 20 Quellen, deren vollständige Übersicht in Anhang A1 zu finden ist.

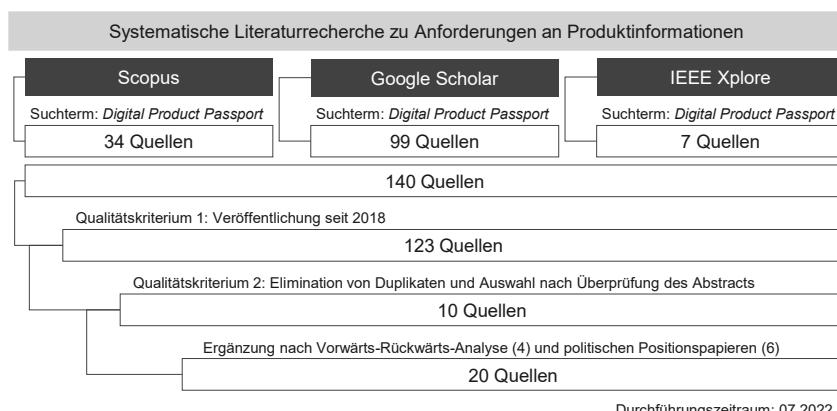


Abbildung 5-28: Systematische Literaturrecherche der inhaltlichen Anforderungen des Informationsmodells (eigene Darstellung)

Die Gesamtheit der 20 identifizierten wissenschaftlichen Beiträge bildet die Basis der weiteren Anforderungsanalyse und -spezifikation.

Anforderungsanalyse und -spezifikation

Die Anforderungsanalyse umfasst die Einordnung der aufgenommenen Anforderungen in ein Grundkonzept, das für die Umsetzung eingesetzt werden kann (s. IEEE COMPUTER SOCIETY 2014, S. 1-7). Dieser Prozessschritt findet im Einklang mit der Anforderungsspezifikation an, sodass die Anforderungen bereits aufbereitet sind (s. IEEE COMPUTER SOCIETY 2014, S. 1-10). Die identifizierten wissenschaftlichen Arbeiten werden zunächst auf politische und praktische Implikationen für die Verwaltung von Produktinformationen untersucht und mit Branchenfokus des Maschinen- und Anlagenbaus kritisch hinterfragt. Zu beachten ist, dass das Anwendungsgebiet eines digitalen Produktpasses sehr weitläufig ist und neben der Investitionsgüterindustrie auch für Verpackungen in der Kunststoffindustrie diskutiert wird (s. BERG ET AL. 2022, S. 5ff.). Unter Berücksichtigung des Ziels dieses Dissertationsvorhabens und der langjährigen Erfahrung am FIR an der RWTH Aachen durch Forschungs- und Industrieprojekte im Themengebiet kann bewertet werden, welche Anforderungen einen relevanten Beitrag zum unternehmensübergreifenden Werterhalt leisten können. Aus den aufgenommenen Anforderungen werden anschließend übergreifende Klassen gebildet. Eine vollständige Übersicht der identifizierten Anforderungen ist in der folgenden Abbildung 5-29 abgebildet.

Kategorie	Anforderung	Anforderungsbeschreibung	Literatur
Produktdaten	Produktdesign	Ermöglichung von Reparatur und (De-)Montage durch Veröffentlichung von Designinformationen	ADISORN ET AL. 2021, BERGER ET AL. 2022, EUROPEAN COMMISSION 2019, GÖTZ ET AL. 2021, LUSCUERE 2017, NIPPRASCHK U. GOLDMANN 2020
	Materialzusammensetzung	Bereitstellung detaillierter Informationen über die Materialzusammensetzung eines Produkts	BMU 2020, GÖTZ ET AL. 2021, LUSCUERE 2017, MÜLLER ET AL. 2020, NIPPRASCHK U. GOLDMANN 2020, WALDEN ET AL. 2021
	Produkt-identifizierung	Sicherstellung der eindeutigen Identifizierung von Produkten	ADISORN ET AL. 2021, DONETSKAYA U. GATCHIN 2020, NIPPRASCHK U. GOLDMANN 2020
	Standardisierung	Offenlegung von Informationen über angewandte Standards und Normen	GÖTZ ET AL. 2021, PLOCIENNIK ET AL. 2020
	Allgemeine Informationen	Anwendungsbezogene Produktinformationen	LUSCUERE 2017, PLOCIENNIK ET AL. 2020, WALDEN ET AL. 2021
	Lagerung und Transport	Freigabe von Lager- und Transportinformationen	NIPPRASCHK U. GOLDMANN 2020
Nutzungsdaten	Nutzungseigenschaften	Ermöglichen der Analyse von Nutzungsdaten	NIPPRASCHK U. GOLDMANN 2020, PLOCIENNIK ET AL. 2020, PORTILLO-BARCO U. CHARNLEY 2015
	Zustandsbewertung	Ermöglicht Transparenz über den Zustand und die "Gesundheit" eines Produkts, indem relevante Statusinformationen gesammelt werden	BERG ET AL. 2022, BERGER ET AL. 2022, DONETSKAYA U. GATCHIN 2020, GÖTZ ET AL. 2021, MÜLLER ET AL. 2020, NIPPRASCHK U. GOLDMANN 2020, PORTILLO-BARCO U. CHARNLEY 2015, WALDEN ET AL. 2021
	Leistungshistorie	Informationen zur Ableitung der Leistungshistorie eines Produkts	BERGER ET AL. 2022
	Wertanalyse	Informationsbasis, um den Wert eines Produktes zu analysieren	NIPPRASCHK U. GOLDMANN 2020, WALDEN ET AL. 2021
Netzwerkdaten	Vertrauenswürdigkeit	Gewährleistung der Zuverlässigkeit von Informationen	BERG ET AL. 2022, WALDEN ET AL. 2021
	Compliance	Möglichkeit zur Sicherstellung der Einhaltung von europaweiten und nationalen Vorschriften	WALDEN ET AL. 2021
	Standortverfügbarkeit	Abbildung des aktuellen und historischen Produktstandorts	PORTILLO-BARCO U. CHARNLEY 2015, WALDEN ET AL. 2021
	Rückverfolgbarkeit	Sicherstellung der Verfolgung und Rückverfolgung von Produkten und Komponenten über die Lebenszyklen	ADISORN ET AL. 2021, DONETSKAYA U. GATCHIN 2020, EUROPEAN COMMISSION 2019, PLOCIENNIK ET AL. 2020, PORTILLO-BARCO U. CHARNLEY 2015, WALDEN ET AL. 2021
Nachhaltigkeitsdaten	Informationsverfügbarkeit am Lebenszyklusende	Informationsverfügbarkeit zu End-of-Life-Optionen am Lebenszyklusende	ADISORN ET AL. 2021, BMU 2020, EUROPEAN COMMISSION 2019, MÜLLER ET AL. 2020, NIPPRASCHK U. GOLDMANN 2020
	Ökologische Auswirkungen	Transparenz ökologischer Auswirkungen eines Produkts durch Datenverfügbarkeit	BERGER ET AL. 2022, GÖTZ ET AL. 2021, LUSCUERE 2017, WALDEN ET AL. 2021
	Soziale Auswirkungen	Transparenz der sozialen Auswirkungen eines Produkts durch Datenverfügbarkeit	WALDEN ET AL. 2021, GÖTZ ET AL. 2021

Abbildung 5-29: Übersicht der identifizierten Anforderungen für das Informationsmodell aus der systematischen Literaturrecherche (eigene Darstellung)

In Summe ergeben sich 17 Anforderungen an die Informationsmodellierung für Investitionsgüter. Diese wurden in vier Anforderungskategorien auf Basis der Klassifizierung von BERGER ET AL. eingruppiert (s. BERGER ET AL. 2022, S. 5). Die abgeleiteten Kategorien umfassen *Produktdaten*, *Nutzungsdaten*, *Netzwerkdaten* und *Nachhaltigkeitsdaten*. In die Kategorie der Produktdaten sind Anforderungen an Produkteigenschaften und Stammdaten eingeordnet, deren Inhalt über den Produktlebenszyklus überwiegend konstant bleibt. Die Kategorie der Nutzungsdaten umfasst Anforderungen an Daten aus dem Betrieb und an den Zustand des Investitionsguts, sodass eine nutzungsspezifische Datenbasis vorhanden ist. Dagegen erfasst die Kategorie der

Netzwerkdaten Anforderungen an Informationen aus dem Wertschöpfungsnetzwerk wie die Vertrauenswürdigkeit von Daten und eine Produktrückverfolgbarkeit. Die Anforderungskategorie der Nachhaltigkeitsdaten beinhaltet abschließend Anforderungen an die Informationsverfügbarkeit am Lebenszyklusende sowie ökologischen und sozialen Auswirkungen einer Maschine.

Abbildung 5-29 lässt erkennen, dass die Kategorie der Produktdaten die höchste Anzahl an Anforderungen aufweist. Damit enthalten insbesondere Stammdaten, die über die Produktlebensdauer nur wenig verändert und derzeit von Herstellern verwaltet werden, einen wesentlichen Informationsgehalt für die Kreislaufwirtschaft. In der Politik und Wissenschaft wird von den Herstellern dazu mehr Verantwortung zur Bereitstellung der Informationen gefordert (s. MÜLLER ET AL. 2020, S. 33; s. ADISORN ET AL. 2021, S. 11; s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 40). Anforderungen an das Produktdesign und die Materialzusammensetzung bilden in dieser Kategorie unter der betrachteten Autorschaft die höchste Wichtigkeit (s. Abbildung 5-29). Damit zielen die Autoren darauf ab, das Recycling, die Demontage und Reparatur zu vereinfachen und die Informationshoheit aus dem Feld der Hersteller zu nehmen (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 2). ADISORN ET AL. erhoffen sich dadurch, dass Akteure entlang des Lebenszyklus dazu befähigt werden, mit ihrem Verhalten nachhaltige Veränderungen anzustoßen (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 2). Die darauffolgende Kategorie der Nutzungsdaten beschreibt Anforderungen aus der Nutzungsphase und erachtet eine Zustandsbewertung mit der höchsten Relevanz (s. Abbildung 5-29). So beschreiben BERGER ET AL. am Anwendungsfall des Batterieproduktpasses, dass der Gesundheitszustand (engl. *State of Health*) einer Batterie die Grundlage dafür bildet, ob sie wiederverwendet oder recycelt wird (s. BERGER ET AL. 2022, S. 8; s. NIPPRASCHK U. GOLDMANN 2020, S. 617). In der Kategorie der Netzwerkdaten bildet die Rückverfolgbarkeit die meistgenannte Anforderung. So heben PLOCIENNIK ET AL. hervor, dass neben der Produkt- auch die Informationsverfolgbarkeit den Nutzen eines digitalen Produktpasses erheblich steigert (s. PLOCIENNIK ET AL. 2022, S. 124). Aus politischer Sicht unterstreicht die Europäische Kommission die Wichtigkeit vor dem Hintergrund einer ökologischen und sozialverträglichen Einkaufspolitik (s. EUROPEAN COMMISSION 2019, S. 8). Zudem stellt die Informationsverfügbarkeit am Lebensende eine Anforderung dar, die sowohl in Wissenschaft und Politik diskutiert wird. Darunter wird vor allem verstanden, dass Informationen oder eine Entscheidungsunterstützung zur Handhabung des Produkts am Lebenszyklusende zur Verfügung stehen (s. EUROPEAN COMMISSION 2019, S. 8; s. BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) 2020, S. 18).

Die abgeleiteten 17 Anforderungen sind zu berücksichtigen, um potenzielle regulatorische Anforderungen erfüllen zu können und die theoretisch hergeleiteten Grundvoraussetzungen der Kreislaufwirtschaft zu erfüllen. Aus den Artikeln kann auch erschlossen werden, dass den Autoren bewusst ist, dass eine vollständige Umsetzung dieser Anforderungen kurzfristig kaum möglich ist. Daher wird betont, dass eine digital unterstützte Einbindung von Unternehmensdaten zwingend erforderlich ist, um den Aufwand realisierbar zu halten und die hohe Informationsverfügbarkeit von Unternehmen auszunutzen (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 3). Im folgenden Unterabschnitt 5.3.3

wird darauf aufbauend analysiert, welche Informationen bereits in Unternehmen verfügbar sind und wie diese in das Informationsmodell zu integrieren sind.

5.3.3 Informationsverfügbarkeit in Unternehmen

Mithilfe von Informationssystemen lässt sich bereits ein Kern von Produktinformationen bereitstellen, der je nach Kreislaufstrategie individuell erweitert werden kann (s. EIGNER 2021, S. 55). Als Grundlage wird auf vorhandene Informationssysteme eines Unternehmens zurückgegriffen, die in Unterabschnitt 2.3.2 beschrieben werden. Darüber hinaus werden Betriebsdaten aus der Nutzungsphase einer Maschine für das Informationsmodell berücksichtigt. Die Auswahl dieser Informationssysteme orientiert sich an den Lebenszyklusphasen aus Unterkapitel 2.1; damit wird beabsichtigt, ein möglichst breites Anwendungsfeld abzudecken.

Demnach werden sowohl unternehmensinterne Ressourcenplanungssysteme als auch kundenorientierte Managementsysteme betrachtet, um daraus relevante Informationsentitäten abzuleiten. In Abbildung 5-30 ist der vollständige Auswahlprozess veranschaulicht. Die Auswahl wird mithilfe von zwei Kriterien eingegrenzt: (1) Das Abstraktionsniveau der Information muss erfüllt sein (s. Unterabschnitt 2.3.1) und (2) die Informationsentität muss eine Produktbezogenheit aufweisen. Die zugrundeliegende Definition von Produkten ist in Unterkapitel 2.1 zu finden. Eine vorläufige Auswertung wurde vom Autor auf der Conference für Production Systems und Logistics vorgestellt (s. STRATMANN ET AL. 2023, S. 448ff.).

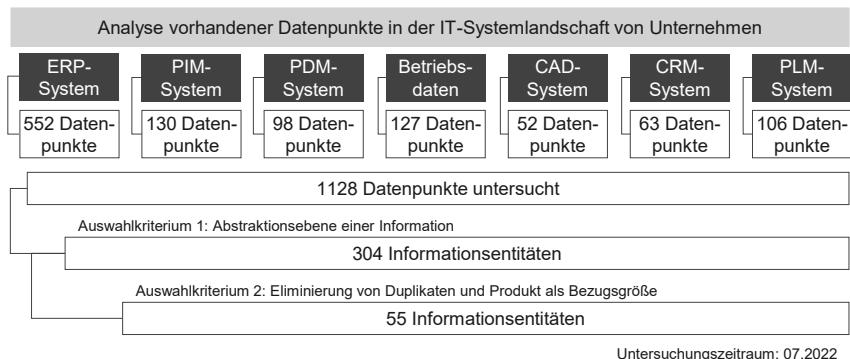


Abbildung 5-30: Übersicht der untersuchten Informationssysteme und identifizierten Datenpunkte (eigene Darstellung i. A. a. STRATMANN ET AL. 2023, S. 452)

Aus den 1128 Datenpunkten, die innerhalb der Informationssysteme als relevant eingestuft werden konnten, erreichen 304 Datenpunkte das Abstraktionslevel der Information. Nach der Eliminierung von Duplikaten und mit Einschränkung des Untersuchungsbereichs auf Informationen zu Produkten wurden 55 Informationsentitäten als zielführend für eine Informationsmodellierung des unternehmensübergreifenden Wertehalts erachtet und werden dazu für die folgende Klassifizierung berücksichtigt.

5.3.4 Klassifizierung von Produktinformationen

Im folgenden Unterabschnitt wird die Klassifizierung von Produktinformationen zusammengeführt und vorgestellt. Die vorgestellten Inhalte ergeben sich aus den vorangegangenen Unterabschnitten 5.3.2 und 5.3.3, die zum einen die wissenschaftlichen und politischen Anforderungen sowie zum anderen die existierende Informationsverfügbarkeit in Unternehmen beschreiben. Abgeleitet aus der Übersicht der Informationsanforderungen in Abbildung 5-29 und angelehnt an die Klassifizierung von BERGER ET AL. enthält die Klassifizierung vier Hauptkategorien und darunterliegende Unterkategorien (s. BERGER ET AL. 2022, S. 5).

Hauptkategorien

Die Hauptkategorien der Klassifizierung bilden vier Bereiche, die einen inhaltlichen Fokus und eigene Anforderung hinsichtlich Datenerfassung und -aktualisierung besitzen. Die Hauptkategorien sind definiert als *statische Produktinformationen*, *dynamische Zustandsinformationen*, *Wertschöpfungsnetzwerkinformationen* und *Nachhaltigkeitsinformationen* (s. Abbildung 5-31).

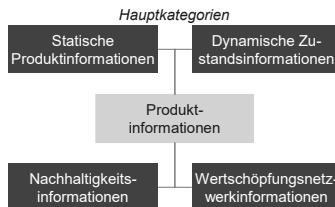


Abbildung 5-31: Hauptkategorien der Klassifizierung von Produktinformationen (eigene Darstellung i. A. a. STRATMANN ET AL. 2023, S. 453)

Die Kategorie *Statische Produktinformationen* beschreibt Informationen, die zur grundlegenden Beschreibung und eindeutigen Identifikation notwendig sind (s. BERGER ET AL. 2022, S. 5; s. STRATMANN ET AL. 2023, S. 452). Damit ist diese Kategorie vergleichbar mit Produktstammdaten, die zumeist vom Hersteller erstellt werden und unverändert den Produktlebenszyklus begleiten (s. STRATMANN ET AL. 2023, S. 452). Zudem wird hervorgehoben, dass stammdatenähnliche, wenig veränderbare Informationen zu Vereinfachungen in der Datenverwaltung führen können. Allerdings ergibt sich aus der Anforderungsanalyse, dass die Beschreibung des Produkts zukünftig ausführlicher zu gestalten ist, um einen Mehrwert für die Kreislaufwirtschaft liefern zu können (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 39ff.). Daher umfasst diese Kategorie eine Vielzahl an Unterkategorien, die im Anschluss an die Definitionen der Hauptkategorien vorgestellt werden (s. Abbildung 5-32).

Im Gegensatz dazu umfasst die Hauptkategorie der *dynamischen Zustandsinformationen* variable und konfigurierbare Informationsentitäten, die primär im Nutzungszyklus einer Maschine angepasst werden können (s. BERGER ET AL. 2022, S. 8; s. STRATMANN ET AL. 2023, S. 453). Darunter fallen bspw. Informationen zum Zustand des Produkts oder der Servicehistorie (s. Abbildung 5-32). Diese Kategorie stützt sich auf

PLOCIENNIK ET AL., die betonen, dass ein lebenszyklusübergreifendes Informationsmodell als dynamisches Modell konzipiert werden sollte (s. PLOCIENNIK ET AL. 2022, S. 124). Das Argument wird durch das Fallbeispiel von PORTILLO-BARCO U. CHARNLEY bestärkt, da die sensorbasierte Zustandsberechnung eines Flugzeugtriebwerks zeitbasierte Werte liefert, die kontinuierlich gespeichert und analysiert werden müssen (s. PORTILLO-BARCO U. CHARNLEY 2015, S. 259ff.).

Die Kategorie *Wertschöpfungsnetzwerkinformationen* zielt darauf ab, Transparenz über involvierte Akteure entlang des Produktlebenszyklus zu schaffen (s. BERGER ET AL. 2022, S. 8). Damit werden Anforderungen an die Lokalität und die Nachverfolgbarkeit eines Produkts erfüllt. Zudem müssen Verifizierungsmechanismen zur Datenechtheit integriert werden, um Vertrauen in das System zu etablieren (s. BERG ET AL. 2022, S. 11ff.).

Als vierte Kategorie werden in den *Nachhaltigkeitsinformationen* die sozialen und ökologischen Auswirkungen eines Produkts beschrieben (s. BERGER ET AL. 2022, S. 7). Diese Kategorie erfüllt damit vorwiegend politische Anforderungen, die aufgrund der sozialen Verantwortung der Supply-Chain und ökologischen Auswirkungen der Produktnutzung gestellt werden (s. WALDEN ET AL. 2021, S. 1722ff.; s. EUROPEAN COMMISSION 2019, S. 8).

Ergänzt werden die beschriebenen Hauptkategorien durch Unterkategorien, die aus der Anforderungsanalyse abgeleitet wurden. In Summe besteht die Klassifizierung damit aus 20 Unterkategorien in vier Hauptkategorien, die in Abbildung 5-32 verdeutlicht wird.

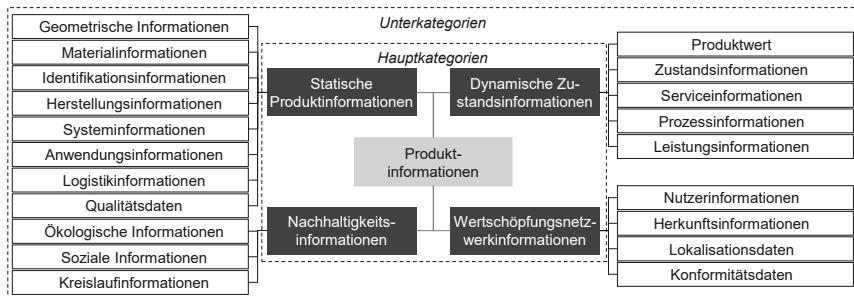


Abbildung 5-32: Unterkategorien der Klassifizierung von Produktinformationen (eigene Darstellung i. A. a. STRATMANN ET AL. 2023, S. 453)

Im Folgenden werden die Unterkategorien detailliert vorgestellt und in den Kontext der Kreislaufwirtschaft eingeordnet.

Unterkategorie der statischen Produktinformationen

Die Hauptkategorie der statischen Produktinformationen umfasst acht Unterkategorien (s. Abbildung 5-33). Darunter lassen sich in Summe 26 Informationsentitäten einordnen (s. Abbildung 5-33).

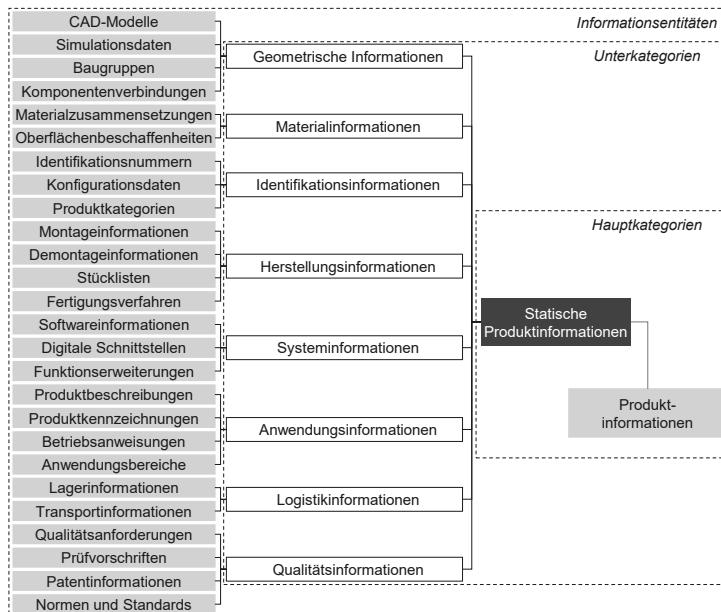


Abbildung 5-33: Informationssentitäten der Unterkategorie *statische Produktinformationen* (eigene Darstellung i. A. a. STRATMANN ET AL. 2023, S. 453)

Die erste Unterkategorie *Geometrische Informationen* umfasst die dreidimensionale Produktmodellierung als Grundlage des Produktdesigns (s. EIGNER U. STELZER 2009, S. 93; s. MECHLINSKI 2021, S. 5). Entitäten dieser Unterkategorie sind neben *CAD-Modellen* auch *Simulationsdaten*, sodass eine mehrdimensionale Rekonstruktion ermöglicht wird (s. KAMPKER ET AL. 2011, S. 191; s. STARK 2020, S. 256). Zudem verringert der Einsatz von bestehenden Simulationsmodellen den Aufwand, der in der Neuprogrammierung von Simulationen zur Überprüfung oder Instandsetzung spezieller Komponenten oder vollständiger Produkte erforderlich wäre (s. STARK 2020, S. 256). Weiterhin detailliert die Informationssentität der *Baugruppen* das Zusammenwirken mehrerer Einzelteile, die in ihrer Gesamtheit eine Einheit bilden können (s. PROALPHA BUSINESS SOLUTIONS GMBH 2024c). Die Informationssentität der *Komponentenverbindungen* beschreibt Schnittstellen und Verbindungselemente, die zum Zusammenfügen der Einzelteile zu Baugruppen sowie der Baugruppen zum Produkt erforderlich sind (s. HINZEN 2020, S. 151ff.).

Die nächste Unterkategorie *Materialinformationen* fasst Informationen zu *Materialzusammensetzungen* und *Oberflächenbeschaffenheiten* zusammen. Die *Materialzusammensetzung* stellt dabei eine zentrale politische Anforderung dar, die vorwiegend vor dem Hintergrund des Recyclings gestellt wird (s. BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) 2020, S. 18). Vor dem Hintergrund der Instandsetzung technischer Oberflächen gilt die *Oberflächenbeschaffenheit* als

wichtige Eigenschaft, um Bauteile und Komponenten beschreiben zu können (s. EIGNER U. STELZER 2009, S. 93; s. KAMPKER ET AL. 2011, S. 191).

Die Unterkategorie der *Identifikationsinformationen* umfasst Informationen zur eindeutigen Zuordnungsfähigkeit und Beschreibung eines Ausgangsprodukts (s. GEP o. J.). Im Speziellen für einen maschinenindividuellen Produktpass, der für jede einzelne Maschine erstellt wird, ist eine eindeutige *Identifikationsnummer* elementar (s. EIGNER ET AL. 2019, S. 346). Zudem sind in *Konfigurationsdaten* eine Versionierung und auftragsabhängige Konfiguration enthalten, um maschinenindividuelle Ausstattungen bestimmen zu können (s. PROALPHA BUSINESS SOLUTIONS GMBH 2024b; s. STARK 2020, S. 164). Aufgrund der Anwendbarkeit dieser Klassifizierung für Endprodukte und einzelne Komponenten beschreibt die Informationseentität der *Produktkategorie*, ob es sich um eine Komponente, Einzelteil oder Endprodukt handelt und welcher Typ beschrieben wird.

Die nächste Unterkategorie der *Herstellungsinformationen* umfasst jegliche Informationen, die zur *Montage*, *Demontage* und Herstellung erforderlich sind. Diese Unterkategorie ist abgeleitet aus den Anforderungen, dass Informationen zum Produktdesign zur Verfügung stehen sollten, um eine Reparatur sowie eine einfache Demontage zu ermöglichen (s. Abbildung 5-29). Zudem kann dadurch die Sicherheit im Umgang mit Maschinen erhöht werden (s. BERGER ET AL. 2022, S. 8). *Stücklisten* liefern demgegenüber die mengenmäßige und strukturelle Zusammensetzung einer Maschine und enthalten erforderliche Baugruppen, Einzelteile und Rohstoffe (s. PROALPHA BUSINESS SOLUTIONS GMBH 2024d). Letztlich dienen Informationen zu *Fertigungsverfahren* dazu, eine Reproduzierbarkeit von Bauteilen sicherzustellen. Definiert werden sie als „*Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern, einschließlich der Verfahren zur Gewinnung erster Formen aus dem formlosen Zustand, zur Veränderung dieser Form sowie zur Veränderung der Stoffeigenschaften*“ (DIN 8580, S. 4).

Die fünfte Unterkategorie der *Systeminformationen* beschreibt digitale und softwarebasierte Informationseentitäten (s. EIGNER U. STELZER 2009, S. 93). Unter *Softwareinformationen* sind die angewandten Computersprachen und Programme zu verstehen, die zur Steuerung und Analyse einer Maschine in Anwendung sind (s. WAGNER 2000, S. 1). Überdies sollten *digitale Schnittstellen* enthalten sein, die eine Datenverbindung zwischen Recheneinheit und externen Geräten bereitstellen können (s. SCHUMANN 2000, S. 29). Informationen zu *Funktionserweiterungen* umfassen zudem eigenständige oder frei verfügbare Softwarepakete, die an bestehende Schnittstellen angebunden werden können (s. BAEUMLE-COURTH ET AL. 2004, S. 121).

Die darauffolgende Unterkategorie der *Anwendungsinformationen* gewährleistet einen ordnungsgemäßen und effizienten Betrieb von Maschinen und Anlagen. Abgeleitet aus der Anforderung, anwendungsbezogene Produktinformationen zu integrieren, werden dem Nutzer Informationen zur Sicherstellung einer effizienten Maschinennutzung geliefert (s. LUSCUERE 2017, S. 27; s. EIGNER U. STELZER 2009, S. 94). Entsprechend fallen in diese Unterkategorie die Informationseentitäten der *Produktbeschreibungen*, z. B. in Form von Datenblättern, und *Betriebsanweisungen* zum Konfigurieren des

optimalen Betriebspunkts (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 9; s. HAZARD U. ANDERSSON 2016). Die Informationsentität der *Produktkennzeichnung* enthält darüber hinaus Informationen über Eigenschaften und Beschaffenheit eines Produkts, die für den Nutzer bestimmt sind und in der Regel von öffentlichen Instanzen standardisiert werden (s. WOLLMANN 2014, S. 771). Anhand des *Anwendungsbereichs* kann bestimmt werden, für welche Anwendungsfälle sich eine zu beschreibende Maschine oder Anlage eignet (s. BERGER ET AL. 2022, S. 6).

Die Unterkategorie *Logistikinformationen* umfasst Informationen zur Lagerung und zum Transport einer Maschine. NIPPRASCHK U. GOLDMANN haben diese Anforderung im Rahmen ihres Entwurfs eines digitalen Produktpasses genannt, um eine ortsunabhängige Möglichkeit zur Reparatur und Demontage zu schaffen (s. NIPPRASCHK U. GOLDMANN 2020, S. 617). Entsprechend finden sich in dieser Unterkategorie die Informationsentitäten der *Transport- und Lagerungsinformationen*. *Transportinformationen* können Transportmittelarten oder notwendige Packmittel enthalten, die für eine WarenSendung erforderlich sind (s. PROALPHA BUSINESS SOLUTIONS GMBH 2024a). Eine maschinengerechte Verwahrung ist in den *Lagerinformationen* enthalten und ermöglicht auch das langfristige Aufbewahren von Investitionsgütern (s. KORTZ U. BUTZER 2016).

Die abschließende Unterkategorie der *Qualitätsinformationen* umspannt einzuhaltende und verwendete *Normen und Standards*. Zum einen kann durch eine Offenlegung von Standards eine Produktprüfung durch Behörden digital durchgeführt werden und zum anderen können Akteure der Kreislaufwirtschaft dadurch besser interagieren (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 32; s. PLOCIENNIK ET AL. 2022, S. 124; vgl. DIN 77005-1). Daneben werden in dieser Unterkategorie *Qualitätsanforderungen* und *Prüfvorschriften* eingruppiert, sodass ein Betrieb über mehrere Nutzungszyklen originalgetreu eingehalten werden kann (s. STARK 2020, S. 185). Die Informationsentität der *Patentinformationen* beschreibt zudem das geistige Eigentum an einem Produkt und hilft somit Dritten, ihre Bearbeitungs- und Nutzungsrechte abzuleiten (vgl. STARK 2020, S. 185).

Unterkategorie der dynamischen Zustandsinformationen

Die Hauptkategorie der dynamischen Zustandsinformationen umfasst fünf Unterkategorien zur Bewertung des Produktzustands (s. Abbildung 5-34). Darunter lassen sich in Summe 14 Informationsentitäten einordnen, die in den Unterkategorien den Informationsraum spezifizieren.

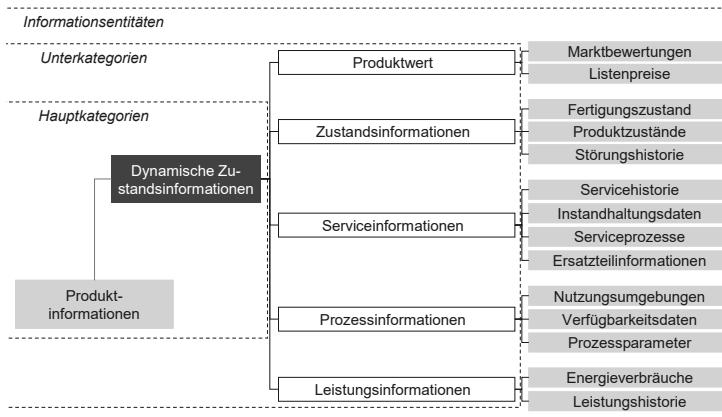


Abbildung 5-34: Informationsentitäten der Unterkategorie *dynamische Zustandsinformationen* (eigene Darstellung i. A. a. STRATMANN ET AL. 2023, S. 454)

Die erste Unterkategorie *Produktwert* beschreibt den betriebswirtschaftlichen und monetären Gegenwert einer Maschine zum Zugriffszeitpunkts des digitalen Produktpasses. WALDEN ET AL. schlagen dazu eine Wertkalkulation der enthaltenen Materialien vor (s. WALDEN ET AL. 2021, S. 1721). Die hier vorgeschlagene Informationsentität der *Marktbewertungen* geht über diese Wertkalkulation hinaus und ist mit vorhandenen Marktdaten für eine aktuelle Bewertung verknüpft. Weiterhin enthält diese Unterkategorie den ursprünglichen *Listenpreis*, um Transparenz über den monetären Werterhalt oder -verfall herzustellen.

Die zweite Unterkategorie der *Zustandsinformationen* enthält Entitäten, die eine Bewertung des Zustands einer Maschine im Lebenszyklus zulassen. In der Anforderungsanalyse aus Unterabschnitt 5.3.2 wird die Zustandsbewertung als ein zentrales Element des digitalen Produktpasses genannt (s. Abbildung 5-29). So nennen BERGER ET AL. und NIPPRASCHK U. GOLDMANN den *State of Health* (dt. Gesundheitszustand) als Kernstück ihrer Konzepte zum digitalen Batteriepass (s. BERGER ET AL. 2022, S. 8; s. NIPPRASCHK U. GOLDMANN 2020, S. 617). Dieser Entwurf lässt sich ebenso auf den Maschinen- und Anlagenbau übertragen und wird in der Informationsentität *Produktzustände* zusammengeführt. In einer Umsetzung gilt es zu prüfen, ob die *Produktzustände* eine zusammenfassende Informationsentität darstellen und aus den weiteren Entitäten abgeleitet werden. Die Entität des *Fertigungszustands* einer Maschine beschreibt, ob sich die Maschine in Produktion, in Auslieferung, im operativen Geschäft oder bereits in Aufbereitung befindet (s. DONETSKAYA U. GATCHIN 2020a, S. 103f.). Weiterhin lässt sich in den Zustandsinformationen die Informationsentität der *Störungshistorie* einordnen, die Rückschlüsse auf Auslastung und Abnutzung einer Maschine zulässt (vgl. STARK 2020, S. 185).

Ergänzend zur Zustandsbewertung ermöglicht die dritte Unterkategorie der *Serviceinformationen* eine ordnungsgemäße Instandhaltung mithilfe von Informationen zur

Wartung und zum Service von Maschinen und Anlagen (s. STARK 2020, S. 185f.). Die *Servicehistorie* liefert Informationen zu durchgeführten Instandhaltungs-, Wartungs- und Servicearbeiten sowie zur durchführenden Entität, sodass zukünftige Nutzer und der Hersteller Daten über aufkommende Instandhaltungskosten und potenzielle Schwachstellen erhalten (s. BERGER ET AL. 2022, S. 8). Ergänzt wird dies durch die Informationsentität *Instandhaltungsdaten*, die Dokumente wie Servicehandbücher und Wartungspläne beinhaltet, um Service- und Instandhaltungsarbeiten vorschriftsmäßig durchführen zu können (s. STARK 2020, S. 185f.). Zur Vollständigkeit der Serviceinformationen werden *Serviceprozesse* und *Ersatzteilinformationen* inkludiert, sodass jegliche Rollen einen Service initiieren und erforderliche Ersatzteile beschaffen können (s. STARK 2020, S. 186).

Die darauffolgende Unterkategorie der *Prozessinformationen* umfasst Informationen zu möglichen Produktionsprozessen der Maschinen und Anlagen. Dies resultiert aus der Anforderung, das Nutzungsverhalten einer Maschine über entsprechende Sensorik nachvollziehen zu können, um daraus Rückschlüsse auf den weiteren Produktlebenszyklus schließen zu können. Ermöglicht wird dies durch die Informationsentitäten *Nutzungsumgebungen*, *Verfügbarkeitsdaten* und *Prozessparameter*. PORTILLO-BARCO U. CHARNLEY ergänzen, dass Informationen über die *Nutzungsumgebung* eine Anforderung an den digitalen Produktpass darstellen und Potenzial für den Einsatz von Sensorik bieten (s. PORTILLO-BARCO U. CHARNLEY 2015, S. 259). Darauf aufbauend beschreibt die Informationsentität der *Verfügbarkeitsdaten* die Betriebsbereitschaft und Auslastung einer Maschine im operativen Geschäft. Mit Fokus auf Produktionsprozesse sind die *Prozessparameter* definiert als dynamischer Datensatz, der operative Variablen wie Betriebsmodi und eingesetzten Kraftstoff aufzeichnet und zur Analyse im digitalen Produktpass speichert (s. HAZARD U. ANDERSSON 2016).

In die finale Unterkategorie der *Leistungsinformationen* werden die eingesetzte Energie und gelieferte Leistung einer Maschine eingruppiert. Die beinhaltet sowohl die *Energieverbräuche* aus dem operativen Betrieb als auch abgerufene Leistungsniveaus (z. B. Anzahl von Betriebsstunden) (s. PLOCIENNIK ET AL. 2022, S. 124; s. BERGER ET AL. 2022, S. 8). Gespeicherte *Energieverbräuche* können darüber hinaus auf produzierte Güter überschrieben und somit in deren Lebenszyklusakte integriert werden. Die *Leistungshistorie* ermöglicht eine Einschätzung des Maschinenzustands und liefert relevante Informationen zur Haltbarkeit einer Maschine (s. BERGER ET AL. 2022, S. 8). Zudem können historische Leistungsdaten von zukünftigen Nutzern in die eigene präventive Instandhaltung integriert werden (s. STARK 2020, S. 186).

Unterkategorie der Wertschöpfungsnetzwerkinformationen

Die Hauptkategorie der Wertschöpfungsnetzwerkinformationen umfasst vier Unterkategorien und acht Informationsentitäten (s. Abbildung 5-35). Diese Entitäten ermöglichen eine umfassende Nachverfolgbarkeit und Transparenz über das Wertschöpfungsnetzwerk einer Maschine.

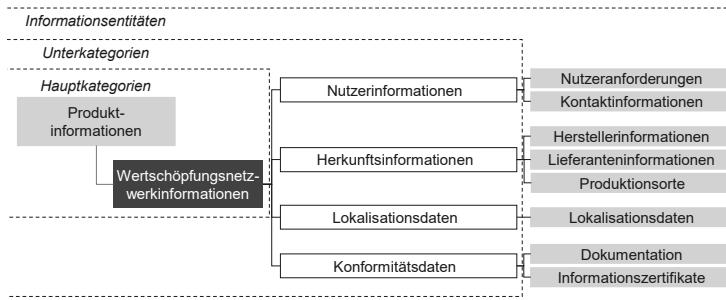


Abbildung 5-35: Informationsentitäten der Unterkategorie *Wertschöpfungsnetzwerkinformationen* (eigene Darstellung i. A. a. STRATMANN ET AL. 2023, S. 454)

Die erste Unterkategorie *Nutzerinformationen* enthält Informationen über vorherige Nutzer einer Maschine und entsprechende Spezifikationen, die für das betrachtete Einsatzgebiete geordnet wurden. Diese Unterkategorie wurde aus der Rückverfolgbarkeit von Produkten abgeleitet und liefert einen möglichen Kontaktpunkt für einen unternehmensübergreifenden Werterhalt (s. Unterabschnitt 5.3.2). *Kontaktinformationen* des vorherigen Nutzers erhöhen die Transparenz im Produktlebenszyklus (s. BERGER ET AL. 2022, S. 9). Aufgrund des hohen B2B-Geschäftanteils im Maschinen- und Anlagenbau ist diese Informationsentität unternehmensbezogen und verlangt nicht nach personenbezogenen Daten (s. BERGER ET AL. 2022, S. 9). Überdies werden *Nutzeranforderungen* in einen digitalen Produktpass integriert, um aus technischer und ökonomischer Perspektive Kontextinformationen zur Maschinenkonfiguration zu erhalten.

In der zweiten Unterkategorie *Herkunftsinformationen* wird die Herstellung, Lieferung sowie vollständige Lieferkette einer hergestellten Maschine betrachtet. Analog zur vorherigen Unterkategorie resultiert dies aus der Anforderung einer Rückverfolgbarkeit von Maschinen und stellt Informationen über Hersteller, Komponentenlieferanten und Wertschöpfungsorte zur Verfügung (s. Unterabschnitt 5.3.2). Dazu stellen die *Hersteller- und Lieferanteninformationen* zwei wichtige Bestandteile im Bestreben einer vollständigen Nachverfolgbarkeit dar, um die Akteure des Lebenszyklus eindeutig zu identifizieren und deren Verantwortungsbereiche im Wertschöpfungsprozess nachzuvollziehen (s. BERGER ET AL. 2022, S. 9). Neben den Herstellern werden dazu ebenso Serviceanbieter inkludiert, die im Laufe des Produktlebenszyklus umfassende Aufbereitungen oder Instandhaltungen durchgeführt haben. Der *Produktionsort* als abschließende Informationsentität liefert darüber hinaus die Lokation der Wertschöpfungsschritte und lässt somit Rückschlüsse auf ökologische und soziale Produktionsauswirkungen zu (s. BERGER ET AL. 2022, S. 9).

Die darauffolgende Unterkategorie der *Lokalisationsdaten* speichert Informationen zum aktuellen Ort einer Maschine oder Anlage. Diese Informationsentität ist aus der Herausforderung abgeleitet, dass derzeit keine maschinenindividuelle Ortsnachverfolgung stattfindet, und so Maschinenherstellern grundlegende Informationen zum

Einstieg in die Kreislaufwirtschaft fehlen (s. WALDEN ET AL. 2021, S. 1720ff.). PORTILLO-BARCO U. CHARNLEY beschreiben in ihrem Forschungsbeitrag, dass Lokalisationsdaten einen Teil moderner Sensortechnik in Investitionsgütern darstellen können (s. PORTILLO-BARCO U. CHARNLEY 2015, S. 259). GLIGORIC ET AL. haben dazu Smarttags erprobt, die in Form von QR-Codes mit Mobiltelefonen gescannt werden und anschließend den Standort im digitalen Produktpass hinterlegen (s. GLIGORIC ET AL. 2019, S. 23f.).

Abgeschlossen wird die Hauptkategorie mit der Unterkategorie *Konformitätsdaten*, die die Korrektheit des Inhalts gewährleistet und öffentliche Schnittstellen zur behördlichen Produktüberprüfung beschreibt (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 31ff.). Darunter wird zusammengefasst, dass eine *Dokumentation* für verpflichtende Berichterstattung und Konformitätsregularien zur Verfügung steht und Inhalt eines digitalen Produktpasses darstellt (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 31; s. BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) 2020, S. 44). Zudem ist eine Grundanforderung an einen digitalen Produktpass die Informationssicherheit und der Schutz, dass keine geschützten Daten veröffentlicht werden (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 39f.). Für die Informationsmodellierung bedeutet dies, dass *Informationszertifikate* und digitale Sicherheitsmaßnahmen dokumentiert werden (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 39f.).

Unterkategorie der Nachhaltigkeitsinformationen

Die vierte und letzte Hauptkategorie beschreibt die Nachhaltigkeitsinformationen, die drei Unterkategorien der ökologischen und sozialen Informationen sowie Kreislaufinformationen umfasst (s. Abbildung 5-36). Darunter lassen sich sieben Informationsentitäten einordnen, die im Rahmen dieser Dissertation für Maschinen und Anlagen für eine Informationsmodellierung vorteilhaft sind (s. Abbildung 5-36).

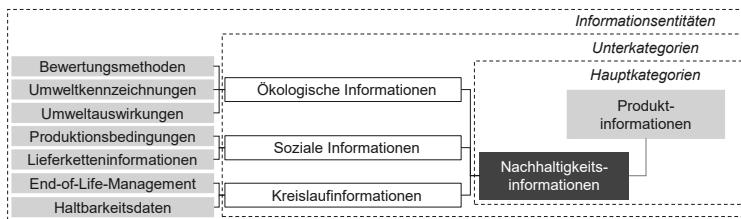


Abbildung 5-36: Informationsentitäten der Unterkategorie *Nachhaltigkeitsinformationen* (eigene Darstellung i. A. a. STRATMANN ET AL. 2023, S. 454)

Die erste Unterkategorie der *ökologischen Informationen* beinhaltet relevante Daten, die die Umweltauswirkungen einer Maschine beschreiben. Diese Unterkategorie resultiert aus einer zentralen Anforderung politisch-orientierter Beiträge zum digitalen Produktpass (s. Unterabschnitt 5.3.2). Darin wird hervorgehoben, dass die Bewertung sozialer und ökologischer Auswirkungen aus der Produktherstellung und -nutzung eine politische Motivation für den digitalen Produktpass darstellt (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 28). Daher stellen *Bewertungsmethoden* die erste Informationsentität dar, um auf dieser Basis eine Berechnung der Umweltauswirkungen zu ermöglichen (s. BERGER

ET AL. 2022, S. 7). Demnach werden die angewandten Kalkulationsmethoden veröffentlicht und mit den relevanten Datenbanken verlinkt. Darauf folgt die Informationsentität der *Umweltkennzeichnungen*, die erworbene Umweltstandards und -zertifikate eines Produkts speichert (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 40). Die Entität der *Umweltauswirkungen* beinhaltet einen Datensatz, der den ökologischen Einfluss anhand der Bewertungsmethoden berechnet (s. BERGER ET AL. 2022, S. 7).

Die darauffolgende Unterkategorie der *sozialen Informationen* hat zum Ziel, soziale Auswirkungen entlang eines Produktlebenszyklus zu dokumentieren. Dies umfasst insbesondere Informationen entlang des Herstellungsprozesses und der Lieferkette von Maschinen und Anlagen (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 28; s. BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) 2020, S. 44). Daher besteht diese Unterkategorie aus den Informationsentitäten der *Produktionsbedingungen* und *Lieferketteninformationen*, die jeweils Informationen zu sozialen Bedingungen am Herstellungsstandort des Endprodukts sowie den Wertschöpfungsorten entlang der Lieferkette speichern.

Die abschließende Unterkategorie der *Kreislaufinformationen* beschreibt die zirkulären Eigenschaften eines Produkts. Diese Unterkategorie wurde aus der Anforderung abgeleitet, dass zum Ende des Produktlebenszyklus Informationen über mögliche Optionen zur Handhabung eines Produkts zur Verfügung stehen sollten (s. Unterabschnitt 5.3.2). Daher bildet die Entität des *End-of-Life-Managements* das zentrale Element der Unterkategorie und beinhaltet Vorschläge zur Weiterverwendung einer Maschine oder Anlage (s. BERGER ET AL. 2022, S. 8; s. ADISORN ET AL. 2021, S. 2). Die zweite Informationsentität zur *Haltbarkeit* liefert eine Einschätzung, für welche Lebensdauer der Hersteller das Produkt konstruiert und gefertigt hat, sodass eine Entscheidungsfindung anhand der geschätzten Restlebensdauer unterstützt werden kann (s. BERGER ET AL. 2022, S. 8).

5.3.5 Zusammenfassung und vollständige Klassifizierung

Das Ziel des dritten Beschreibungsmodells ist eine Detaillierung relevanter Produktinformationen in Form einer Klassifizierung. In Unterabschnitt 5.3.2 wurde zunächst eine Anforderungsanalyse durchgeführt, die 20 Veröffentlichungen aus wissenschaftlichen und politischen Quellen im Rahmen einer systematischen Literaturrecherche untersucht hat. Daraus konnten 17 Anforderungen an den Inhalt eines digitalen Produktpasses abgeleitet werden. Die Anforderungen umfassen Inhalte in den Kategorien Produkt-, Nutzungs-, Netzwerk- und Nachhaltigkeitsdaten. Darauf aufbauend wurden in einer Bestandsanalyse unternehmerische Informationssysteme analysiert und deren Datenpunkte betrachtet. In der detaillierten Betrachtung von sieben Informationssystemen konnten 1128 Datenpunkte identifiziert werden, die eine Grundlage für die Klassifizierung darstellen. Aus der Anforderungs- und Bestandsanalyse wurde das Beschreibungsmodell der Klassifizierung abgeleitet, das vier Hauptkategorien umfasst. Die vier Hauptkategorien bestehen aus den *statischen Produktinformationen*, den *dynamischen Zustandsinformationen*, den *Wertschöpfungsnetzwerkinformationen* und

den *Nachhaltigkeitsinformationen*. Diese werden um 20 Unterkategorien und 55 Informationsentitäten ergänzt und bilden eine umfassende Klassifizierung zirkulärer Produktinformationen ab. Obwohl dieses Vorgehen zu einer Klassifizierung nach wissenschaftlichen Maßstäben führt, zeigen sich Einschränkungen in der Umsetzung des Ansatzes: Demnach besitzen Unternehmen zwar eine umfangreiche Datengrundlage, allerdings stellen die Identifikation der Herkunft und deren anschließende Zusammenführung eine Herausforderung dar. Auch wenn die Informationsentitäten auf Basis bestehender Systeme entwickelt wurden, ist eine eigenständige Betrachtung des Zusammenspiels der unternehmerischen IT-Systemlandschaft erforderlich, um einen nahtlosen Informationsfluss zu ermöglichen. Dieses Beschreibungsmodell liefert allerdings einen fundierten Vorschlag für den Inhalt eines digitalen Produktpasses, der sich in der Praxis bisher nicht etabliert hat. Zusammenfassend konnte in diesem Unterkapitel die folgende und dritte Forschungsfrage beantwortet werden:

Welche Produktinformationen werden für die Umsetzung der Kreislaufstrategien benötigt und wie können diese klassifiziert werden?

Eine vollständige Übersicht der Klassifizierung ist in der folgenden Abbildung 5-37 veranschaulicht. Als inhaltliche Grundlage kann dieses Modell im digitalen Produktpass für Maschinen und Anlagen genutzt werden. Im nächsten Kapitel wird darauf aufbauend ein Wirkmodell der Produktinformationen im Ökosystem entwickelt.

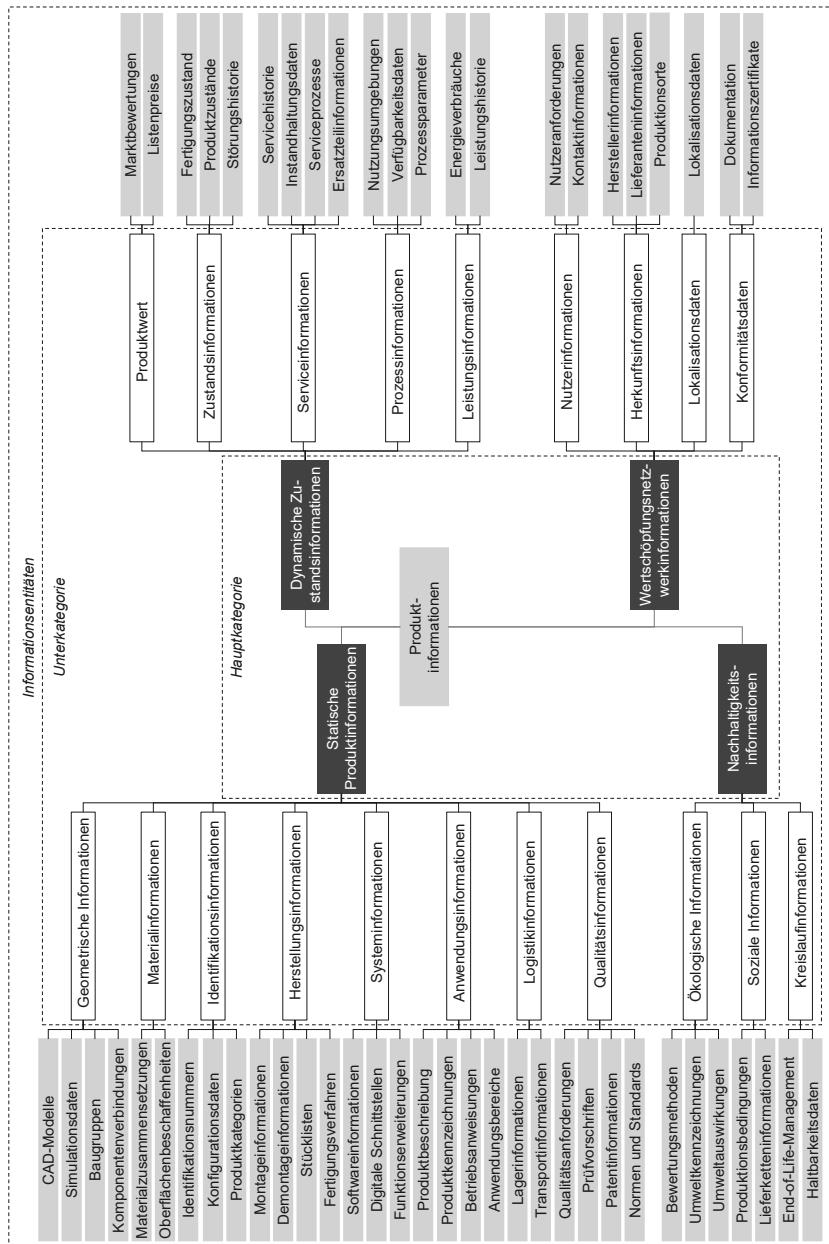


Abbildung 5-37: Klassifizierung von Produktinformationen zur Lebensdauerverlängerung von Investitionsgütern (eigene Darstellung i. A. a. STRATMANN ET AL. 2023, S. 453ff.)

5.4 Wirkmodell zur Erklärung rollenspezifischer Produktinformationen

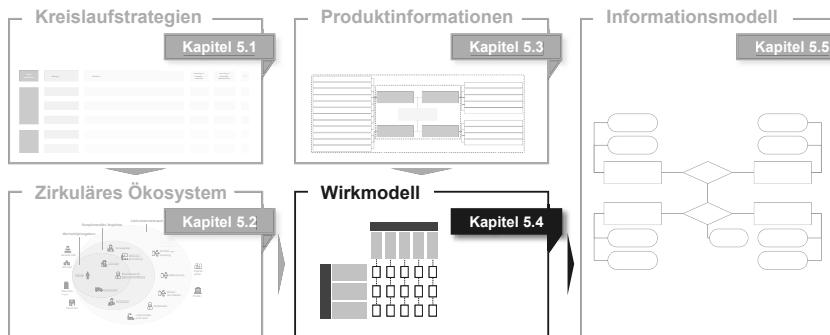


Abbildung 5-38: Wirkmodell der klassifizierten Produktinformation und Rollen im zirkulären Ökosystem (eigene Darstellung)

Das Unterkapitel 5.4 liefert die Grundlage der vierten Forschungsfrage dieser Dissertationsschrift:

Wie lassen sich die Produktinformationen mit den Rollen verknüpfen und in einem Informationsmodell vereinen?

Aufbauend auf den Beschreibungsmodellen aus Unterkapitel 5.2 und 5.3 ergibt sich die Notwendigkeit zur Beantwortung der Forschungsfrage aus der Komplexität des Informationsaustauschs in zirkulären Ökosystemen. Dies wird unter anderem ersichtlich anhand des beschränkten Informationsaustauschs im zirkulären Ökosystem, das in Unterabschnitt 5.2.3 untersucht wurde. Weiterhin besteht das Praxisproblem, dass eine Kommunikation der Stakeholder, insbesondere zwischen Hersteller und Akteuren am Produktlebenszyklusende, nicht in der Breite funktioniert (s. O'CONNOR ET AL. 2016, S. 5884). Überdies sind einige Produktinformationen als geistiges Eigentum geschützt und erfordern eine wissenschaftliche Untersuchung der Interaktionen auf Informationsebene zwischen den Akteuren im zirkulären Ökosystem (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3; s. BERG ET AL. 2022, S. 5). Das Ziel dieses Unterkapitels besteht daher in der Herleitung und Beschreibung der Wirkungsbeziehungen zwischen den klassifizierten Produktinformationen aus Abschnitt 5.3 und den Rollen des zirkulären Ökosystems aus Abschnitt 5.2, um daraus ein rollenspezifisches Informationsmodell in Abschnitt 5.5 ableiten zu können. Anhand dieses Modells lassen sich für die Praxis Verantwortungen in der Informationsbereitstellung ableiten, um eine erfolgreiche Adoption des digitalen Produktpasses unter Partizipation aller Ökosystemakteure zu erreichen.

Dazu wird in Unterabschnitt 5.4.1 zunächst das methodische Vorgehen der Assoziationsmatrix vorgestellt, die in dieser Dissertationsschrift zur Beschreibung der Wirkungsbeziehungen angewendet wird. In Unterabschnitt 5.4.2 werden anhand der vier

Produktinformationskategorien die Wirkungsbeziehungen untersucht und detailliert, bevor das Unterkapitel mit einer Zusammenfassung in Unterabschnitt 5.4.3 schließt. In Unterkapitel 5.5 folgen anschließend die Ableitung des rollenspezifischen Informationsmodells auf Basis des vorgestellten Erklärungsmodells und eine Beschreibung zu dessen Anwendung.

5.4.1 Methodisches Vorgehen der Informationsmodellierung

Um dem Ziel gerecht zu werden, das Informationsmodell in Form von ER-Modellen darstellen zu können, bedarf es eindeutiger und nutzbarer Wirkungszusammenhänge zwischen den Beschreibungselementen der Informationsklassifizierung und der Ökosystemmodellierung. Dieses Unterfangen ist eine komplexe Aufgabe, die eine systematische und nachvollziehbare Methode erfordert. Daher wird für das Erklärungsmodell auf eine qualitative Untersuchung in Form von Assoziationsmatrizen zurückgegriffen. ER-Modelle eignen sich als Form der semantischen Modellierung für eine zielorientierte und effiziente Kommunikation zwischen Experten mit Domänenwissen und Softwareentwicklern (s. GADATSCH 2019, S. 5). Allerdings ist der betrachtete Modellierungsraum aufgrund der Anzahl an Informationseinheiten und Ökosystemrollen zu komplex für eine ausschließliche Modellierung in ER-Modellen, sodass Assoziationsmatrizen als ergänzendes Werkzeug genutzt werden.

Assoziationsmatrizen eignen sich speziell zur Erfassung und Darstellung von Aktivitäten und Berechtigungen innerhalb eines Systems unter Berücksichtigung der beteiligten Rollen (s. ENSTROM 2018; s. LAMPSON 1974, S. 20ff.). Die Methode der Assoziationsmatrix hat ihre Herkunft in der Softwaretechnik und ermöglicht eine systematische Beschreibung der Zusammenhänge zwischen einer Daten- und Funktionsperspektive (s. BALZERT 2009, S. 207ff.; s. FÄHNRICH 2008, S. 17; s. ENSTROM 2018). Die Datenperspektive beschreibt eine Datenstruktur, auf die die Funktionsperspektive zugreift, um die in den Funktionen beschriebenen Aufgaben erfüllen zu können (s. BALZERT 2009, S. 207). Im Rahmen dieser Dissertationsschrift stellt die Klassifizierung von Produktinformationen die Datenperspektive dar, und die Rollen, die im zirkulären Ökosystem dedizierte Funktionen und Tätigkeiten übernehmen, definieren die Funktionsperspektive. Die Matrixzeilen umfassen dabei Unterkategorien und Informationseinheiten aus Unterkapitel 5.3 und variieren in ihrer Anzahl je nach untersuchter Hauptkategorie. Die Matrixspalten beinhalten die Rollen des zirkulären Ökosystems aus Unterkapitel 5.2. In Abbildung 5-39 ist die Struktur der Assoziationsmatrix visualisiert. Vor dem Hintergrund der Informationsmodellierung wird nicht nur der Frage nachgegangen, ob eine Wirkungsbeziehung zwischen den Elementen besteht, sondern auch welche Art der Beziehung vorhanden ist. Im englischen Sprachgebrauch ist die Assoziationsmatrix auch unter dem Begriff der CRUD-Matrix bekannt (s. VAN RANDEN ET AL. 2016, S. 45ff.).

Unter-kategorie	Infor-mations-entitäten	Rollen									
		Rolle 1	Rolle 2	Rolle 3	Rolle 4	Rolle 5	Rolle 6	Rolle 7	Rolle 8	Rolle 9	Rolle 10
Unterkategorie 1	Informations-entität 1										
	Informations-entität 2										
Unterkategorie 2	Informations-entität 3										
	Informations-entität 4										

Legende: c = create; u = update; r = read; d = delete

Abbildung 5-39: Struktur der Assoziationsmatrix (eigene Darstellung i. A. a. BALZERT 2009, S. 210)

CRUD steht für die vier Beschreibungselemente *create*, *update*, *read* und *delete* (s. BALZERT 2009, S. 210; s. VAN RANDEN ET AL. 2016, S. 45). In Abbildung 5-40 werden die Beschreibungselemente für dieses Dissertationsvorhaben adaptiert und in leicht veränderter Form neu definiert. Leere Felder weisen in diesem Zusammenhang auf eine fehlende Wirkungsbeziehung hin.

Abk.	Element	Beschreibung
c	create	Die Rolle hat die Verantwortung, den Inhalt der betreffenden Informationsentität zu liefern und kann diese Entität erstellen.
r	read	Die Rolle hat ein Leserecht der betreffenden Informationsentität.
u	update	Die Rolle besitzt ein Leserecht und hat die Verantwortung zur Aktualisierung der Entität, sobald entsprechende Informationen verfügbar sind.
d	delete	Die Rolle kann die betreffende Informationsentität löschen.

Abbildung 5-40: Legende der CRUD-/Assoziationsmatrix (eigene Darstellung i. A. a. BALZERT 2009, S. 210; VAN RANDEN ET AL. 2016, S. 45)

Das Ermitteln der Wirkungsbeziehungen erfolgt sachlogisch und beruht auf den durchgeführten Literaturrecherchen, Fallstudien und Experteninterviews sowie den Praxiserfahrungen des Autors aus seiner Zeit am FIR an der RWTH Aachen. Die Erkenntnisse werden dazu in Textform formuliert und in den vorgestellten Assoziationsmatrizen illustriert.

5.4.2 Erklärung kreislaufrelevanter Produktinformationen in zirkulären Ökosystemen

Die folgende Beschreibung der Wirkungsbeziehungen zwischen den Produktinformationen und Ökosystemrollen orientiert sich am kategorischen Aufbau der Klassifizierung aus Unterkapitel 5.3. Zunächst wird die Wirkung der Ökosystemrollen auf die statischen Produktinformationen untersucht.

Statische Produktinformationen

Die Rollen des OEMs und der Komponentenlieferanten haben als Inverkehrbringer ihrer Produkte eine gesonderte Verantwortung aus rechtlicher Sicht (§ 1 Absatz 1 ProdSG)). Für eine Informationsmodellierung folgt daraus, dass die Hauptverantwortung der Erstellung von Produktdaten auch beim Produkthersteller liegt (s. STARK 2020, S. 1; s. MECHLINSKI 2021, S. 1; s. ADISORN ET AL. 2021, S. 11). Neben dem OEM steht zudem der Komponentenlieferant in der Verantwortung, Informationsentitäten aus der Hauptkategorie der statischen Produktinformationen zu erstellen (s. Abbildung 5-41 und 5-42). Daneben benötigen auch Hauptkomponenten einen eigenen Produkt-pass, der als Integration in den Pass des Endprodukts vorteilhaft für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems ist (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 24). Dies hat zur Folge, dass die Informationsbasis von der Unterkategorie Geometrische Informationen bis zur Unterkategorie der Qualitätsinformationen durch die Komponentenlieferanten und OEM verantwortet wird. Die vollständigen Wirkungsbeziehungen sind in den folgenden Assoziationsmatrizen in Abbildung 5-41 und 5-42 veranschaulicht.

Unter-kategorie	Infor-mations-entitäten	Rollen										Neue Nutzer-gruppe
		Nutzer	OEM	Händler	OER	Unabhängi-ger Remanufacturer	Repurposer	Service-dienstleister	Komponen-telieferant	Recyler	Logistik-unternehmen	
Geometrische Informationen	CAD-Modelle		c		r	r	u		c			
	Simulationsdaten		c		r	r	u		c			
	Baugruppen		c		r	r	u	r				
	Komponenten-verbindungen		c		r	r	u	r	c			
Material-informationen	Materialzusam-mensetzungen	r	c				u		c	r		r r
	Oberflächen-beschafftheiten		c		r	r	u	c	r			
Identifikations-informationen	Identifikations-nummern	r	c	r	r	r	r	r	r	r	r	r r
	Konfigurations-daten	r	c	r	u	u	u	r	r			r
	Produktkategorien	r	c	r	r	r	r	r	r	r		r
Herstellungs-informationen	Montage-informations	r	c		r	r	u	r	c			r
	Demontage-informations	r	c		r	r	u	r	c	r		r
	Stücklisten	r	c		r	r	u	r	c	r		r
	Fertigungs-verfahren		c		r	r	u	r	c	r		
System-informationen	Software-informations	r	c, u		u	u	u	u	c			r
	Digitale Schnittstellen	r	c		u	u	u	u	c			r
	Funktions-erweiterungen	u	c		u	u	u	u	c			r
Anwendungs-informationen	Produkt-beschreibungen	r	c	r	u	u	u	r	r	r	r	r
	Produkt-kennzeichnungen	r	c	r	u	u	u	r	r	r	r	r
	Betriebs-anweisungen	r	c	r	u	r	u	r	r			r
	Anwendungs-bereiche	r	c	r			u		r			r

Legende: c = create; u = update; r = read; d = delete

Abbildung 5-41: Assoziationsmatrix der statischen Produktinformationen und Ökosystemrollen (1/2) (eigene Darstellung)

Unter- kategorie	Infor- mations- entitäten	Rollen										Neue Nutzer- gruppe
		Nutzer	OEM	Händler	OER	Unabhängiger Remanufacturer	Repurposer	Service- dienstleister	Komponenten- lieferant	Recycler	Logistik- unternehmen	
Logistik- informationen	Lagerinformationen	r	c	r	r	r	u	r	c	r	r	r
	Transport- informationen	r	c	r	u	u	u	r	c	r	r	r
Qualitäts- informationen	Qualitäts- anforderungen		c		u	u	u	r	c			
	Prüfvorschriften		c		u	u	u	r	c			r
	Patent- informationen		c		u	r	u	r	c			r
	Normen und Standards		c		r	r	u	r	c	r		r

Legende: c = create; u = update; r = read; d = delete

Abbildung 5-42: Assoziationsmatrix der statischen Produktinformationen und Ökosystemrollen (2/2) (eigene Darstellung)

Die *geometrischen Informationen* bestimmen den dreidimensionalen Aufbau und die Struktur eines Produkts, das u. a. mit CAD-Modellen erreicht wird (s. MECHLINSKI 2021, S. 5). Die Grundlage dieser Informationselementen liefert der OEM in Form von CAD-Modellen, Simulationsdaten sowie Informationen zu Baugruppen und Komponentenverbindungen (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3f.). Übergreifend wird das Produktdesign von Rollen der Remanufacturer benötigt, um Originalqualität sicherstellen zu können (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3f.). Die Verfügbarkeit dieser Informationselementen ist ausschlaggebend dafür, die Prozesseffizienz zu steigern. Im gegensätzlichen Fall haben die umsetzenden Akteure des OERs, des unabhängigen Remanufacturers, des Repurposers oder des Servicedienstleisters nur die Möglichkeit, die Aufbereitung vom Hersteller durchführen zu lassen, die Technologie zu lizenziieren oder einen Reverse-Engineering-Ansatz zu nutzen (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3). Eine Umfunktionierung durch den Repurposer geht einher mit einer Aktualisierung von Geometrieinformationen, um die Veränderungen nachvollziehbar zu machen und nicht mehr gültige Datensätze zu eliminieren. Technologische Upgrades, die im Rahmen des Remanufacturings durchgeführt werden, haben nur einen geringfügigen Einfluss auf die geometrischen Informationselementen und werden unter den Konfigurationsdaten berücksichtigt (s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 6). Ferner besitzen Servicedienstleister eingeschränkte Leserechte, die nur die Elementen der Baugruppen und Komponentenverbindungen beinhalten, um die notwendigen Dienstleistungen ausführen zu können. Alle weiteren Rollen besitzen keine Notwendigkeit zur Nutzung der geometrischen Informationselementen.

In die Unterkategorie der *Materialzusammensetzung* sind Komponentenlieferanten und OEM in der Verantwortung, die erforderlichen Informationen zu liefern (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 7). Dieses Vorgehen hat sich in der Automobilindustrie bereits etabliert,

indem der OEM im IMDS (*International Material Data System*) seine verbauten Materialien hinterlegen muss (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 6). Eine einheitliche Datenbank wurde darüber hinaus für alle Branchen unter dem Namen SCIP (Substances of Concern In Products) von der Europäischen Kommission eingeführt, um *Substances of High Concern* in Produkten überprüfen zu können (s. PRICEWATERHOUSECOOPERS 2022, S. 3ff.). Dadurch hat sich die Politik bereits ein Leserecht auf die Materialzusammensetzung ausgewählter Chemikalien mit Gefährdungspotenzial gesichert (s. PRICEWATERHOUSECOOPERS 2022, S. 3). Im Allgemeinen richtet sich die Verfügbarkeit von Materialinformationen insbesondere an den Recycler und ist für die Weiterverarbeitung zweitrangig (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 6f.). Daher benötigen Recycler detaillierte Produktinformationen, um hochwertige Sekundärmaterialien herzustellen (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 2). Trotzdem haben die Nutzer von sehr materialintensiven Produkten (bspw. Schiffe) ein Interesse daran, die Materialzusammensetzung ihres Produkts zu kennen, um potenzielle Weiterwendungsmöglichkeiten bewerten zu können (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 7). Dagegen ist die Oberflächenbeschaffenheit für Nutzer weniger von Interesse, bietet jedoch Remanufacturern und Recyclern einen Mehrwert. Vorwiegend für Nachbearbeitungsprozesse von komplexen und teuren Komponenten sind die Oberflächenbeschaffenheiten relevante Eingangsgrößen, um einen möglichst originalen Zustand herstellen zu können (s. SONG ET AL. 2023, S. 40876).

Aufgrund des individuellen Verhältnisses von eins zu eins zwischen digitalem Produkt- und Produkt sind *Identifikationsinformationen* ein zentraler Baustein des Informationsmodells (s. GLIGORIC ET AL. 2019, S. 2; s. EIGNER ET AL. 2019, S. 346). Investitionsgüter erfordern individuelle Identifikationsnummern, um kontinuierliche Aktualisierungen über die Produktlebensdauer hinweg nachzu vollziehen. Hitachi pflegt bspw. eine Datenbank mit Produktidentifikationsnummern, um Informationen zum Produkt- design bereitzuhalten sowie die Reverse-Logistics der Gebrauchtkomponenten zu verwalten (BOOTSMA, Experteninterview, 2023): „*If the product has an ID, it can be traced and administered more easily*“. Für Komponenten, die nur über eine Seriennummer identifizierbar sind, wird dieser Prozess komplexer. Der OEM als Inverkehrbringer ist verantwortlich für die Erstellung entsprechender Identifikationsnummern. Als zentrale Informationsentität besitzen alle weiteren Rollen des Ökosystems ein Leserecht der Identifikationsnummer. Neben der Identifikationsnummer unterstützen Konfigurationsdaten in der Spezifizierung der Produktvariante und speziellen Anforderungen, die im Endprodukt realisiert wurden. Vom OEM erstellt, können Nutzer, Händler und Service- dienstleister diese Informationen zur Produktauswahl, zum Vertrieb und in der Instandhaltung nutzen (s. STARK 2020, S. 186). Remanufacturer und Repurposer müssen ebendiese aktualisieren, um die Aufbereitung zu dokumentieren und ggf. Änderungen festzuhalten (s. TOFT-JENSEN 2016, S. 1; s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 6). Ferner bestimmt der OEM die Produktkategorie, um den Ökosystemakteuren eine einfache Einordnung des Produkts zu ermöglichen und bspw. ein Logistikunternehmen ohne vollständige Transportinformationen eine Einschätzung durchführen kann.

Die *Herstellungsinformationen* beziehen sich auf die Fertigungs- und Produktionsprozesse des OEMs und seiner Lieferanten. Als Differenzierungsmerkmal stellen diese

Prozesse im Regelfall einen Wettbewerbsvorteil sowie geistiges Eigentum dar, sodass eine Veröffentlichung in einem digitalen Produktpass an eine Lizenzierung gekoppelt werden muss (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3f.). Für bestimmte Produktklassen (z. B. batteriebetriebene Fahrzeuge) könnte die Lizenzierung allerdings aufgrund von Sicherheitsvorgaben aufgehoben und damit zur Voraussetzung eines digitalen Produktpasses werden (s. BERGER ET AL. 2022, S. 8). In der hier entwickelten Informationsmodellierung bedeutet dies, dass Rollen, die an der Maschine operativ tätig werden, einen Zugriff auf die Informationsentitäten der Montage, Demontage, Stücklisten und Fertigungsverfahren erhalten, Lizenzierungsmöglichkeiten jedoch im Zweifel bilateral verhandelt werden müssen. Die Informationsentitäten der Demontage, der Montage und der Stücklisten liefern für Nutzer eigenständige Reparaturinstruktionen und können bereits im Kaufprozess eine Einschätzung der Modularität und Langlebigkeit des Produkts zulassen (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 10). Entsprechend erhalten Nutzer und neue Nutzergruppen Leserechte ebenjener. Zudem ermöglichen Demontageinformationen und Stücklisten für Recycler eine granulare Trennung, um die Qualität der Sekundärmaterialien zu erhöhen. Die Informationsentität der Stücklisten wird im Rahmen der Produktentwicklung vom OEM bzw. Komponentenlieferant entwickelt und beschreibt die Baugruppen, Komponenten und Rohstoffe, die für die Fertigung des Produkts erforderlich sind (s. PROALPHA BUSINESS SOLUTIONS GMBH 2024d, S. 3). Eine Aktualisierung der Stücklisten wird von Remanufacturern und Servicedienstleistern nicht vorgenommen, da die Stücklisten auf Neuprodukten basieren und vor allem in Kombination mit den Baugruppen zum Verständnis des Aufbaus genutzt werden. Die Informationsentität der Ersatzteilinformationen liefert die relevanten Daten des Servicegeschäfts. Ebenso können OEM und seine Lieferanten das Wissen über die Fertigungsverfahren teilen, um auch umfangreiche Aufbereitungsprozesse wirtschaftlich durchzuführen, wie SONG ET AL. in ihrer Veröffentlichung validiert haben (s. SONG ET AL. 2023, S. 40881ff.). Die Rolle des Repurposers muss ähnlich zur Neu-entwicklung des Produkts alle Herstellungsinformationen aktualisieren, um diese für neue Nutzergruppen anwendbar zu machen.

In modernen Maschinen und Anlagen beschreiben die *Systeminformationen* die zugrundeliegende Software, die verfügbaren digitalen Schnittstellen sowie softwarebasierte Funktionserweiterungen. Diese drei Informationsentitäten werden in der Regel vom OEM entwickelt, auch wenn sich der Entwicklungsprozess im Gegensatz zu mechanischen und elektronischen Bauteilen sehr unterscheidet (s. STARK 2020, S. 50). Die Softwareinformationen müssen darüber hinaus regelmäßig aktualisiert werden, sodass sowohl Nutzer als auch Servicedienstleister die Möglichkeit haben, die aktuelle Softwareversion zu installieren. Aufgrund der gemeinsamen Gesellschaftsstruktur von OEM und OER sind solche Prozesse intern bereits vorhanden und ermöglichen im Aufbereitungsprozess eine einfache Aktualisierung der Softwareversion (s. MOHSENI U. BUTZER 2016, S. 1). Entsprechend aktualisieren der OEM und die Remanufacturer die installierte Softwareversion im digitalen Produktpass. In Fällen von veralteter Software kann dies sogar dazu führen, das komplette Kontrollsysteme ausgetauscht werden (s. AHSGREN 2016, S. 1). Ebenso werden einige digitale Schnittstellen vom OEM

entwickelt und freigegeben, jedoch müssen diese in entsprechende externe Programme integriert und im Optimalfall standardisiert werden, um einen effizienten Datenaustausch zu ermöglichen (s. STARK 2020, S. 201). Am Beispiel einer CNC-Maschine, deren Bearbeitungsprozess vom optimalen Zusammenspiel einer oder mehrerer CAD-, CAM- und CNC-Software abhängt, zeigt sich der Vorteil digitaler Schnittstellen, sodass kein Medienwechsel zur Programmierung und Fertigung eines Bauteils notwendig ist (s. RIDDER 2022, S. 11ff.). In der betrachteten Informationsmodellierung können Funktionserweiterungen gelistet und hinzugefügt werden. Dadurch wird eine Funktionsweise ähnlich eines App-Stores realisiert, die bspw. von Siemens bereits für industrielle Edge-Anwendungen angeboten wird⁴. Erstellt werden die Funktionserweiterungen vorgeblich vom OEM, aber Servicedienstleister, Beratungen oder der Nutzer selbst haben die Möglichkeit, ihre Apps einzutragen.

In der Unterkategorie der *Anwendungsinformationen* ist die Informationsentität Produktbeschreibungen enthalten, die Kontextinformationen liefert und anhand derer Produkte ohne Domänenwissen eingeordnet werden können. Darauf aufbauend erstellt der OEM die Produktkennzeichnungen, die ebenfalls im digitalen Produktpass hinterlegt werden. Der Hersteller bestätigt beispielsweise mit dem CE-Kennzeichen, dass das Produkt den geltenden Anforderungen der EU-Harmonisierungsrechtsvorschriften entspricht (s. WOLLMANN 2014, S. 779). Vor dem Hintergrund der Ressourceneffizienz von Kreislaufstrategien und deren gesellschaftlichen Bedeutung haben Remanufacturer die Chance, nach einem Aufbereitungsprozess entsprechende Produktkennzeichnungen zu aktualisieren (s. WOLLMANN 2014, S. 770). Für Recycler sind Kennzeichnungen zur Materialzusammensetzung von Interesse und politische Kontrollorgane können dadurch überprüfen, ob die erforderlichen Kennzeichnungen vorhanden sind. Die Informationsentität der Betriebsanweisungen ist in PLM-Systemen verfügbar und werden vom OEM in den digitalen Produktpass eingepflegt (s. STARK 2020, S. 258). Zudem besitzt der OEM oftmals übergreifendes Wissen über optimale Betriebsparameter in verschiedenen Nutzungsumgebungen, die dem Nutzer Effizienzsteigerungen ermöglichen (s. HAZARD U. ANDERSSON 2016, S. 1). Der OER aktualisiert in diesem Zusammenhang Betriebsanweisungen mit hinzugewonnenen Erkenntnissen aus Betrieb und Remanufacturing-Prozess (s. HAZARD U. ANDERSSON 2016, S. 1). Einem unabhängigen Remanufacturer fehlt im Regelfall die enge Vernetzung zum OEM und das erforderliche Wissen, sodass Ergänzung zu Betriebsanweisungen eher eine Ausnahme bilden. Die Informationsentität der Anwendungsbereiche wird insbesondere vom Händler zum Vertrieb benötigt, um potenzielle Nutzer bereits vor einer Kaufentscheidung ausführlich informieren zu können. Dazu wird die Informationsentität vom OEM kreiert und für neue Funktionsumfänge vom Repurposer aktualisiert.

Reverse-Logistics gilt als eine zentrale Herausforderung in der Umsetzung von Kreislaufstrategien, sodass die Unterkategorie der *Logistikinformationen* eine

⁴ Informationen der Unternehmenswebseite von Siemens entnommen: https://docs.eu1.edge.siemens.cloud/intro/build_your_use_case/ie-marketplace.html (Link zuletzt geprüft: 03.05.2024)

Ausgangsbasis für effiziente Logistikprozesse darstellt (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 8; BOOTSMA, Experteninterview, 2023). Für die Informationsmodellierung werden die Logistikinformationen in die Informationssentitäten der Lager- und Transportinformationen aufgeteilt. Die Lagerinformationen werden gemäß der Produktanforderungen vom Hersteller erstellt und bilden für alle Rollen relevante Informationen für Zeiträume, in denen die Maschinen nicht genutzt werden. So versetzt beispielsweise die Herrenknecht AG ihre Tunnelbohrmaschinen nach Projektende in einen langfristigen Lagerzustand, um für neue Aufträge so viele Komponenten wie möglich nochmals nutzen zu können (s. KORTZ U. BUTZER 2016). Je nach Anforderung findet eine Lagerung in offener Fläche oder wettergeschützt in einer Lagerhalle statt (s. KORTZ U. BUTZER 2016). Dem gegenüber stehen die Transportinformationen, die insbesondere für Versandabteilungen und Logistikunternehmen von Bedeutung sind und anhand derer Transporte vorbereitet und durchführt werden. Zum Beispiel wird der Antriebsstrang von Hitachi Bergbau-Kipplastern aus ganz Europa in den Niederlanden aufbereitet (BOOTSMA, Experteninterview, 2023). Ohne digitalen Produktpass wurde bisher nur intern kommuniziert, dass für diesen Transport ein 40t-Lastkraftwagen benötigt wird (BOOTSMA, Experteninterview, 2023). Solche Informationen unterstützen bereits frühzeitig in der Aufwands- und Kostenkalkulation von Remanufacturing-Prozessen und sind daher für viele Rollen im Ökosystem relevant (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 10). Darüber hinaus hat die Rolle des Repurposers die Verantwortung, Daten zu aktualisieren, falls sich an relevanten Bauteilen starke Veränderungen ergeben haben.

Die *Qualitätsinformationen* beinhalten Informationssentitäten zur Wertigkeit, Standardisierung und zum geistigen Eigentum des Produkts und seiner Komponenten. Die Erstellung der Informationssentitäten dieser Kategorie liegen für das Endprodukt im Verantwortungsbereich des OEMs und für Komponenten beim Komponentenhersteller. Im Verlauf des Produktlebenszyklus können die Informationssentitäten der Qualitätsanforderungen und Prüfvorschriften für spezifische Anwendungsbereiche angepasst werden. Linde und Toyota Material Handling beispielsweise haben kaskadierende Aufbereitungsstufen für ihre Flurförderfahrzeuge geschaffen, die entsprechende Qualitätsvorgaben besitzen (s. MULOT 2016, S. 1; s. NIELSEN 2016, S. 1). In der Fallstudie von Linde können Nutzer zwischen den Aufbereitungsstufen frei wählen. In der niedrigsten Stufe wird eine standardmäßige Prüfung durchgeführt und die Sicherheit zertifiziert, wohingegen Fahrzeuge der höchsten Stufe einen aufbereiteten Motor, eine Batterie mit über 90 % Kapazität, neue Reifen und eine transparente Servicehistorie erhalten (s. MULOT 2016, S. 1). Die Rollen der Remanufacturer und Repurposer haben daher die Verantwortung inne, die Informationssentitäten der Qualitätsanforderungen und Prüfvorgaben zu aktualisieren. Im Aufbereitungsprozess werden ebenso Schwachstellen des Produkts identifiziert, deren Eliminierung zusätzliche Prüfvorschriften erfordert und im Produktpass ergänzt werden muss (s. TOFT-JENSEN 2016, S. 2; s. MORRIS 2016, S. 1). Informationen zum geistigen Eigentum des Produkts können von den unabhängigen Remanufacturern und Servicedienstleistern gelesen werden, allerdings kann deren Inhalt nur mit entsprechenden Lizenzen genutzt werden (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3f.). In der Informationsmodellierung erhalten sie

daher ein Leserecht, das im Rahmen dieser Dissertationsschrift als Sollzustand gilt, in der Praxis jedoch individuell verhandelt werden muss. Ebenso erhalten OEM und OER keinen direkten Zugriff auf geschützte Patente von Zulieferkomponenten (s. CHANDRA-SEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3f.). Allerdings ergeben sich durch die Zusammenarbeit zwischen OEM und OER Potenziale, Patente auf Aufbereitungsprozesse anzumelden und diese Informationen im Produktpass zu hinterlegen (BOOTSMA, Experteninterview, 2023). Die Politik, vertreten durch das Patentamt, enthält ebenfalls eine Leseberechtigung, um angemeldete Pateninformationen abzugleichen. Dagegen werden Standards und Normen vom OEM im Produktentstehungsprozess festgelegt; sie orientieren sich an politischen Vorgaben sowie dem aktuellen Stand der Normung. Für die aufbereitenden Rollen ist daher relevant, welche Standards genutzt werden, um u. a. das erforderliche Werkzeug zu beschaffen. In der Aufbereitung von Fahrzeugen aus dem angelsächsischen Raum ist bspw. Zollwerkzeug erforderlich, um daran arbeiten zu können. Für den Recycler ist relevant, welche Materialstandards verwendet wurden, um entsprechende Recyclingmöglichkeiten wählen zu können (s. BERG ET AL. 2022, S. 10).

Dynamische Zustandsinformationen

Die zweite Kategorie der dynamischen Zustandsinformationen beschreibt den Status und die Beschaffenheit der sich in Nutzung befindenden Investitionsgüter. Daher liegt in dieser Kategorie die Hauptverantwortung zur Schaffung einer Datengrundlage nicht mehr hauptsächlich beim OEM, sondern ebenso beim Nutzer. Die vollständige Assoziationsmatrix ist in der folgenden Abbildung 5-43 beschrieben.

Unter-kategorie	Infor-mations-entitäten	Rollen										Neue Nutzer-gruppe
		Nutzer	OEM	Händler	OER	Unabhängiger Remanufacturer	Repurposer	Service-dienstleister	Komponen-telieferant	Recycler	Logistik-unternehmen	
Produktwert	Marktbewertungen	r		c, u	r	r	r	r		r		r
	Listenpreise	r	c	u							r	
Zustands-informationen	Fertigungszustand	u	c	u	u	u	u	u				u
	Produktzustände	u	c	u	u	u	u	u				u
	Störungshistorie	c, u		r	r	r	r	r				u
Service-informationen	Servicehistorie	c	u	r	r	r	r	u				u
	Instandhaltungs-daten	r	c		u	u	u	u	c			r
	Serviceprozesse	r	c	r	u	u	u	c				r
	Ersatzteil-informationen	r	c, u	r	u	u	u	u	u			r
Prozess-informationen	Nutzungs-umgebungen	c, u	r		r	r	r	r		r		u
	Verfügbarkeits-daten	c, u	r		r	r	r	r				u
	Prozessparameter	c, u	r		r	r	r	r				u
Leistungs-informationen	Energieverbräuche	u	c		r	r	r	r	c			u
	Leistungshistorie	c, u			r	r	r	r				u

Legende: c = create; u = update; r = read; d = delete

Abbildung 5-43: Assoziationsmatrix der dynamischen Zustandsinformationen und Ökosystemrollen (eigene Darstellung)

Der *Produktwert* beschreibt die erste Unterkategorie, deren Ziel es ist, eine valide, monetäre Bewertung des Investitionsguts zu liefern. Die Informationsentität der Marktbewertungen wird eingeführt, um eine Übersicht über den Marktpreis zu erhalten. Die Erstellung und Aktualisierung liegen im Verantwortungsbereich des Händlers als Rolle mit höchstem Marktüberblick. Im Rahmen der Fallstudien werden Verkaufspreise für aufbereitete Produkte in Höhe von 50 bis 80 % des Neupreises erzielt (s. MORRIS 2016, S. 1; s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 6). Alle weiteren Rollen haben ein entsprechendes Interesse an den Marktbewertungen des Händlers und erhalten daher Leserechte. In der Regel erstellt der OEM zu Anfang des Lebenszyklus Listenpreise, die im digitalen Produktpass hinterlegt werden und primär für den Nutzer einen Mehrwert liefern. Im Verlauf des Lebenszyklus können sie vom OEM oder Händler aktualisiert werden.

Die Unterkategorie der *Zustandsinformationen* bildet ein Hauptziel des digitalen Produktpasses ab. Im Allgemeinen müssen Gebrauchtmassen einen Minimalzustand vorweisen, um aufbereitet oder im Sekundärmarkt gehandelt zu werden (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 8f.). Allerdings ist ohne digitalen Produktpass nur eine physische Zustandsbewertung durch Techniker vor Ort möglich, sodass Remanufacturer oder Nutzer bei Rücknahme das Risiko für den Maschinenzustand tragen (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 8). Zur Ermittlung des allgemeinen Produktzustands werden die Informationsentitäten des Fertigungszustands, der Produktzustände und der Störungshistorie vorgeschlagen. Der Fertigungszustand beschreibt, ob das spezifische Produkt sich noch in der Entwicklung, Produktion oder im Betrieb befindet und wird daher vom OEM erstellt, aber von jeder Rolle entlang des Lebenszyklus aktualisiert (s. STARK 2020, S. 87). Die Produktzustände bilden die Gesundheitszustände der Maschine oder Anlage ab, ähnlich dem *State of Health* für Batterien im Batteriepass (s. BERGER ET AL. 2022, S. 8). Der OEM ist verantwortlich dafür, Kriterien und Prüfverfahren für die Produktzustände zu definieren und die Informationssentität zu Beginn des Lebenszyklus zu erstellen. Nach bestimmten Zeitabständen oder Instandhaltungszyklen werden diese Daten vom Nutzer oder Servicedienstleister aktualisiert und um Kriterien erweitert. Ebenso können die Remanufacturer je nach Aufbereitungstiefe den Produktzustand nach ihrer ausführlichen Qualitätsprüfung auf die entsprechende Stufe aktualisieren (s. CHANDRASEKAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 3; s. BOOTSMA 2016, S. 1). Im Gegensatz zu den vorherigen Entitäten wird die Störungshistorie vom Nutzer erstellt und innerhalb seiner Betriebsdauer aktualisiert. Die Störungshistorie wird von den Rollen der Aufbereiter und Servicedienstleister gelesen, um Rückschlüsse aus der Störungshistorie zu ziehen und daraus systemische Schwachstellen zu identifizieren (s. TOFT-JENSEN 2016, S. 2)

Als Grundlage der Erhaltung eines guten Produktzustands enthält der Produktpass die Unterkategorie der *Serviceinformationen*[Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.](#) Darunter fallen die Informationssentitäten der Servicehistorie, der Instandhaltungsdaten, des Serviceprozesses und der Ersatzteilinformationen. Die Servicehistorie wird vom Nutzer erstellt, auch wenn in den ersten Betriebsjahren eine Instandhaltung durch den OEM oder einen ausgewählten Servicedienstleister durchgeführt wird (BOOTSMA, Experteninterview, 2023). Jedoch hat der Nutzer den Anreiz, durch eine vorschriftsmäßige Instandhaltung die Ausfallzeiten gering zu halten und den Maschinenwert zu erhalten. Bereits heute stellt die Verfügbarkeit einer Servicehistorie für den Händler ein Verkaufsargument dar, durch das sich höhere Preise durchsetzen lassen (s. MULOT 2016, S. 1). Überdies dient die Servicehistorie als Indikator, um den Maschinenzustand einzuschätzen und zukünftige Nutzer zu überzeugen (s. JOSEFSSON 2016, S. 1; s. BERGER ET AL. 2022, S. 8). Informationen zur ordnungsgemäßen Durchführung der Instandhaltung liegen im Verantwortungsbereich des OEM, der diese Informationssentität erstellen muss, wie im Fahrzeugsektor bereits vorgeschrieben (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 10f.). Für den Nutzer und beauftragte Servicedienstleister bildet das den Vorteil, dass sie eigenständig Instandhaltungstätigkeiten durchführen können (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 10f.). Ebenso ist eine Möglichkeit für Servicedienstleister und

Remanufacturer vorgesehen, Instandhaltungsdaten um Erfahrungswerte anzureichern (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 10). Demnach übergibt Storebro, ein unabhängiger Remanufacturer von Dreh- und Fräsmaschinen aus Schweden, seinen Kunden nach der Aufbereitung eine umfassende Dokumentation mit Messberichten, einer Risikobewertung und tiefergehenden Informationen zur Instandhaltung der aufbereiten Maschine (s. AHSGREN 2016, S. 1). Die Informationssentität der Serviceprozesse enthält neben dem Ablauf der Instandhaltung ebenso Informationen zur Rückgabe von Gebrauchtmaschinen für den Aufbereitungsprozess. Diese werden von OEM und Servicedienstleister erstellt und falls erforderlich, von Remanufacturern und Repurposern aktualisiert. In den ersten Produktionsjahren behält sich der OEM in der Regel ein Vorrecht für das Ersatzteilgeschäft seiner Produkte vor, sodass noch keine Ersatzteile von Drittanbietern verfügbar sind (s. TOFT-JENSEN 2016, S. 2). Daher erstellt zunächst der OEM die Informationssentität der Ersatzteilinformationen, auf die Nutzer und Händler zurückgreifen können. Die Ersatzteilinformationen werden anschließend von den Remanufacturern aktualisiert, sobald diese einen Aufbereitungsprozess entwickelt haben und aufbereitete Maschinen anbieten können (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 5). Diese Entscheidung zur Aufbereitung von Komponenten wird zwischen den Remanufacturing- und Entwicklungsabteilungen getroffen. Dazu werden die Verfügbarkeit von Rückläufern, die Aufbereitungskosten und die Nachfrage nach Ersatzteilen berücksichtigt, um zu ermitteln, ob ein ausreichendes wirtschaftliches Potenzial vorhanden ist (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 5).

Die *Prozessinformationen* beschreiben das Einsatzgebiet einer Maschine beim Nutzer, um Kontextinformationen für eine vollständige Zustandsbewertung zu erhalten. Der Nutzer steht dafür in der Verantwortung, die Informationssentitäten zu erstellen und kontinuierlich zu aktualisieren. Für den OEM ermöglichen die Informationssentitäten der Prozessinformationen, bestehend aus der Nutzungsumgebung, den Verfügbarkeitsdaten und den Prozessparametern, eine Analyse darüber, wie seine Maschinen in der Praxis betrieben werden. Das ermöglicht die Ableitung von optimalen Nutzungsparametern, von denen weitere Nutzer und Neuentwicklungen profitieren können (s. HAZARD U. ANDERSSON 2016, S. 1). Für Servicedienstleister stellen die Nutzungsweise und -umgebung einen Mehrwert dar, um die weitere Nutzbarkeit des Produkts einschätzen zu können (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 10). Zudem lassen sich mithilfe der Verfügbarkeitsdaten initiale Einschätzungen über den Maschinenzustand ableiten (s. JOSEFSSON 2016, S. 1). So sind z. B. die Prozessparameter für Remanufacturer von Pumpen und Kompressoren relevant, um mit ihrem Wissen die Haltbarkeit abschätzen zu können (HÖRBELT, Experteninterview, 2021).

Die Unterkategorie der *Leistungsinformationen* beschreibt die abgerufene Performance der Maschine, indem der eingehende Energieverbrauch und die ausgehende Leistungshistorie nachverfolgt werden. Dazu erstellt der OEM die erforderlichen Nennwerte für Energieverbräuche, wie es bspw. für das Energielabel im Verbraucherbereich bereits erforderlich ist (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 4f.). Über den Lebenszyklus werden diese Werte von den Nutzergruppen kumuliert und aktualisiert, sodass den Remanufacturern und Servicedienstleistern Erkenntnisse über möglichen Verschleiß und die

Klimabilanz des Produkts geboten werden kann (z. B. über die Anzahl der geleisteten Betriebsstunden) (s. BERGER ET AL. 2022, S. 7; s. JOSEFSSON 2016, S. 1). Ebenso bietet die Informationsentität der Leistungshistorie die Möglichkeit, weitere maschinen-spezifische Parameter wie die Anzahl der gefahrenen Kilometer oder Ladezyklen zu ergänzen und zukünftigen Nutzern oder Remanufacturern zur Verfügung zu stellen (s. BERGER ET AL. 2022, S. 8).

Wertschöpfungsnetzwerkinformationen

Die dritte Kategorie der Wertschöpfungsnetzwerkinformationen folgt aus der Anforderung zur Nachverfolgbarkeit von Produkten in ihrem Lebenszyklus und beschreibt daher relevante, nicht technische Informationsentitäten der Nutzungsphasen. Darunter lassen sich Informationen zum aktuellen Nutzer, der Herkunft sowie zum Ort der Maschine zusammenfassen, die um Konformitätsdaten zur Sicherstellung des Inhalts ergänzt werden. Eine vollständige Übersicht der Assoziationsmatrix ist in Abbildung 5-44 zu finden.

Unter-kategorie	Informations-entitäten	Rollen										Politik	Neue Nutzer-gruppe
		Nutzer	OEM	Händler	OER	Unabhängiger Remanufacturer	Repurposer	Service-dienstleister	Komponenten-lieferant	Recycler	Logistik-unternehmen		
Nutzer-informationen	Nutzer-anforderungen	c	r		r	r	u	r	r				u
	Kontakt-informationen	c, u	r	u	r	r	r	r				r	u
Herkunfts-informationen	Hersteller-informationen	r	c	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r
	Lieferanten-informationen	r	u	r	u	u	u	r	c				r
	Produktionsorte	r	c	r	u	u	u		c	r			r
Lokalisations-daten	Lokalisationsdaten	c, u	r	u	r	r	r	r	r	r	u		u
Konformitäts-daten	Dokumentation	r	c				u		c			r	r
	Informations-zertifikate	r	c	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r

Legende: c = create; u = update; r = read; d = delete

Abbildung 5-44: Assoziationsmatrix der Wertschöpfungsnetzwerkinformationen und Ökosystemrollen (eigene Darstellung)

Zunächst werden die *Nutzerinformationen* betrachtet, die Anforderungen und Kontaktinformationen der Nutzer beinhalten. Die Nutzeranforderungen beschreiben das vom ersten Nutzer beauftragte Anforderungsprofil, das in einer spezifischen Maschinenkonfiguration resultiert. In der Fallstudie von Herrenknecht ist für Tunnelbohrmaschinen der Tunneldurchmesser eine projektspezifische und konfigurierbare Variable, die neben Anforderungen an das zu bewegende Material die individuelle, technische Konfiguration bestimmt (s. KORTZ u. BUTZER 2016). Neben technischen Anforderungen

können ebenso wirtschaftliche Anforderungen hinterlegt werden, wie die Fallstudie der Flurfördermaschinen zeigt. Darin fordern preissensitive Nutzer Leasingangebote sowie unterschiedliche Stufen der Aufbereitung, um Kosteneinsparungen zu erreichen (s. NIELSEN 2016, S. 1; s. MULOT 2016). In der Informationsmodellierung übernimmt der Nutzer das Anforderungsprofil aus seinen Beschaffungsprozessen in den digitalen Produktpass, sodass Remanufacturer diese Informationen im Aufbereitungsprozess berücksichtigen können. Als Repurposer werden diese Informationen entsprechend den neuen Anforderungen aktualisiert. Die Kontaktinformationen liegen in der Verantwortung des Nutzers und können Daten wie eindeutiger Name, Unternehmenstyp und Herkunftsstadt beinhalten (s. BERGER ET AL. 2022, S. 9). Diese Informationssentität wird daher vom ersten Nutzer erstellt, kann mit der passenden Identifikationsnummer der Maschine von allen Rollen abgerufen werden und wird im Rahmen eines Eigentumsübergangs vom Händler oder neuen Nutzern aktualisiert. Die Informationen beschränken sich auf Unternehmensdaten, sodass eine DSGVO-konforme Lösung möglich ist.

Die Unterkategorie der *Herkunftsinformationen* umfasst die Informationssentitäten Herstellerinformationen, Lieferanteninformationen und Produktionsorte (s. BERGER ET AL. 2022, S. 9). Die Herstellerinformationen werden vom OEM erstellt und sind für alle Rollen des Ökosystems lesbar, um in erforderlichen Fällen eine Kontaktaufnahme zu ermöglichen. Von den Lieferanten für ihre Komponenten selbst erstellt, werden die Lieferanteninformationen vom OEM in den digitalen Produktpass des Endprodukts aggregiert. Aufgrund der teilweise umfangreichen Remanufacturing- und Repurposeprozesse aktualisieren die Remanufacturer und Repurposer die Lieferanteninformationen, falls alternative Komponenten verwendet werden und ergänzen ihre eigenen Daten als Lieferanten aufbereiteter Maschinen und Komponenten. Die Informationssentität der Produktionsorte wird vom OEM und Komponentenlieferant erstellt und von allen wertschöpfenden Rollen aktualisiert.

Die *Lokalisationsdaten* von Maschinen und Anlagen sind für die Rollen des Kreislaufökosystems von hohem Interesse. Dagegen stellt die Informationsbeschaffung für den Komponentenlieferanten und OEM eine Herausforderung dar. Während individuelles Equipment auch einige Jahre nach Auslieferung weiterhin vom Originalhersteller gewartet wird und daher der Standort bekannt ist, haben Komponentenlieferanten in der Regel keinen Zugriff auf den aktuellen Standort ihrer Komponenten (LEHANKA, Experteninterview, 2021; BOOTSMA, Experteninterview, 2023). Die Verantwortung zur Erstellung der Informationssentität liegt allerdings beim Nutzer. Ebenso erhalten Händler und Logistikunternehmen die Möglichkeit zur Aktualisierung des Standorts. Zugriff darauf erhält zudem die Rolle des Remanufacturers, um im Rahmen von Kostenkalkulationen die Transport- und Zollkosten der Kreislaufstrategien zu kalkulieren (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 8f.).

Die *Konformitätsdaten* bilden die Anforderungen öffentlicher Entitäten zur Dokumentation der Einhaltung von Standards, Vorschriften und Normen ab, um digital nachweisbar zu machen, dass das Produkt den rechtlichen Vorgaben genügt. So können mithilfe der Informationssentität Dokumentation OEM ihr Compliance-Management vereinfachen, indem sie die erforderlichen Datensätze für den digitalen Produktpass

bereitstellen und öffentliche Behörden darauf zugreifen lassen (s. GOTZ ET AL. 2021, S. 31). Es kann ermöglicht werden, dass sowohl einzelne Behörden als auch die EU auf erforderliche Daten direkt zugreifen können (s. GOTZ ET AL. 2021, S. 31). Insbesondere Behörden zur Marktüberwachung können dadurch gezielt prüfen, ob bestehende Produktstandards eingehalten wurden oder um Hersteller vor nonkonformen Wettbewerbern zu schützen (s. GOTZ ET AL. 2021, S. 32; s. ADISORN ET AL. 2021, S. 10). Zudem ist das Vertrauen in den Inhalt des digitalen Produktpasses elementar für seinen Erfolg, sodass Möglichkeiten zur Verifizierung getroffen werden müssen (s. BERG ET AL. 2022, S. 12). Mithilfe der Entität der Informationszertifikate kann der OEM einen Sicherheitsstandard auswählen, der für alle Rollen lesbar ist und Details zur Datenherkunft, -integrität, -verifizierung und -lagerung beinhaltet (s. BERG ET AL. 2022, S. 12).

Nachhaltigkeitsinformationen

Vor der Zielsetzung der Etablierung von digitalen, zirkulären Ökosystemen bilden die Nachhaltigkeitsinformationen als vierte Kategorie der Informationsmodellierung eine wesentliche Zielgröße ab. Es werden politische Anforderungen an die soziale und ökologische Verantwortung von Produkten im Rahmen des digitalen Produktpasses integriert (s. WALDEN ET AL. 2021, S. 1722ff.; s. EUROPEAN COMMISSION 2019, S. 8). Die Assoziationsmatrix der Nachhaltigkeitsinformationen im Ökosystem ist in Abbildung 5-45 dargestellt.

Unter-kategorie	Infor-mations-entitäten	Rollen										Politik	Neue Nutzer-gruppe
		Nutzer	OEM	Händler	OER	Unabhän-giger Re-manufacturer	Repurposer	Service-dienstleis-ter	Komponen-tenlieferant	Recycler	Logistik-unternehmen		
Ökologische Informationen	Bewertungs-methoden	r	c	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r
	Umwelt-kennzeichnungen	r	c	r	u	u	u	u	u	u	u	r	r
	Umwelt-auswirkungen	u	c	r	u	u	u	u	u	u	u	r	u
Soziale Informationen	Produktions-bedingungen	r	c	r	u	u	u	u	u	u	u	r	r
	Lieferketten-informations	r	u	r	u	u	u	c	u			r	r
Kreislauf-informationen	End-of-Life-Management	r	c	r			r	c	r			r	r
	Haltbarkeitsdaten	r	c	r	u	u	u	u	c	r			r

Legende: c = create; u = update; r = read; d = delete

Abbildung 5-45: Assoziationsmatrix der Nachhaltigkeitsinformationen und Ökosystemrollen (eigene Darstellung)

Die *Ökologischen Informationen* eines digitalen Produktpasses liefern Daten zu Auswirkungen des Produkts auf Klima und Umwelt entlang seines kompletten Lebenszyklus. Zunächst muss der OEM daher eine Bewertungsmethode und -rechnungsart

auswählen, ähnlich der Auswahl eines Rechnungslegungsstandards für international agierende Unternehmen. Die Auswahl kann zum Beispiel anhand der verfügbaren Datenmenge durchgeführt werden (s. BERGER ET AL. 2022, S. 7). Die restlichen Rollen des Ökosystems können anschließend auf die Bewertungsmethode zugreifen, um die Umweltauswirkungen dem gewählten Standard entsprechend zu aktualisieren. Ebenso werden die Umweltkennzeichnungen als nutzerorientierte Informationsentität vom OEM hinterlegt, um die Einhaltung ökologischer Standards vereinfacht zu präsentieren (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 40; s. BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) 2020, S. 44). Daher bieten sie primär Nutzern und Händlern einen Mehrwert in der Entscheidungsfindung ressourceneffizienter Produkte sowie der Vermarktung ebendieser (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 4). Die Politik hat als Marktaufsicht ebenso ein Interesse am Inhalt dieser Informationsentität (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 4). Remanufacturer, Repurposer und Recycler haben darauf aufbauend die Möglichkeit, Umweltkennzeichnungen nach Ausführung einer Kreislaufstrategie zu ergänzen. Aufbauend auf den Bewertungsmethoden werden in der Informationsentität der Umweltauswirkungen die ökologischen Einflüsse ermittelt. Das BMUV fordert diese Angaben im digitalen Produktpass, möchte dies allerdings mit einer Vereinfachung der Berichtspflichten für Unternehmen kombinieren (s. BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) 2020, S. 44). BERGER ET AL. schlägt vor, im ersten Schritt den CO₂-Fußabdruck abzubilden (s. BERGER ET AL. 2022, S. 7). Diese Informationsentität kann daher als aggregierende Kalkulation aller Rollen angesehen werden, dessen Erstellung durch den OEM initiiert wird, indem Informationen zu Umweltauswirkungen aus der Produktion freigegeben werden. Anschließend aktualisieren die Rollen des Ökosystems die Umweltauswirkungen kontinuierlich.

Die *Sozialen Informationen* der Informationsmodellierung bestehen aus den zwei Informationsentitäten der Produktionsbedingungen und Lieferketteninformationen. Gefordert vom BMUV im Rahmen des digitalen Produktpasses, werden damit die sozialen Auswirkungen aus der Herstellung von Produkten und Dienstleistungen zusammengefasst (s. BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) 2020, S. 44; s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 28). Der OEM erhält die Verantwortung zur Erstellung der Informationsentität der Produktionsbedingungen, wohingegen alle wertschöpfenden Rollen im Ökosystem die Daten gemäß ihren sozialen Standards aktualisieren. Nutzer und Politik besitzen Zugriffsrechte und können auf dieser Basis Kaufentscheidungen treffen. Die Lieferketteninformationen werden dagegen von den Komponentenlieferanten erstellt und nur von den involvierten Rollen aktualisiert. Darunter können Indikatoren wie die Arbeits-, Sicherheits- und Lohnbedingungen fallen (s. BERGER ET AL. 2022, S. 7).

Vor der Zielsetzung einer Informationsmodellierung zum unternehmensübergreifenden Werthalts besitzen alle bisher vorgestellten Informationsentitäten einen Einfluss auf die Zirkularität von Produkten. Allerdings beschreiben die *Kreislaufinformationen* spezifische Informationsentitäten zur Kreislaufwirtschaft von Investitionsgütern. Vor allem im Verbraucherbereich fordert die EU-Kommission Informationen zur Handhabung von Produkten am Ende ihrer Lebensdauer (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 9; s. EUROPEAN

COMMISSION 2019, S. 8). Diese Informationen werden in der Regel vom OEM zur Verfügung gestellt. Für Nutzer ergibt sich dadurch ein monetarisierbarer Vorteil, dass Informationen zum End-of-Life-Management zur Verfügung stehen und sie mit einem höheren Restwert rechnen können (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 10). Insbesondere im Fahrzeugbereich gibt es zum End-of-Life-Management bereits Vorgaben der EU, die den OEM dazu verpflichten, Informationen zur Demontage, Lagerung und Testen von Fahrzeugteilen zu veröffentlichen (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 6). Neben den Nutzern, die Möglichkeiten zur Weiterverwendung ihrer Produkte suchen, enthalten diese Daten einen Mehrwert für Recycler, die dadurch die Recyclingqualität erhöhen können. Überdies erhöhen Daten zur Produkthaltbarkeit die Transparenz über mögliche Einsatzgebiete und den verbleibenden Produktwert. Die initialen Haltbarkeitsdaten werden vom OEM anhand der Entwicklungsvorgaben festgelegt. Ein Beispiel ist die Zeit zwischen der Überholung von Flugzeugtriebwerken (engl. *Time between Overhauls*, TBO), die vom Hersteller angegeben werden müssen (s. TRANSPORT CANADA 2019). Diese Haltbarkeitsdaten müssen anschließend von den Servicedienstleistern oder Remanufacturern je nach Zustand aktualisiert werden.

5.4.3 Zusammenfassung und Reflexion

Das Wirkmodell dieses Kapitels hat zum Ziel, die Wirkungsbeziehungen zwischen den ausgewählten Produktinformationen aus Unterkapitel 5.3 und den Rollen des Ökosystems aus Unterkapitel 5.2 zu detaillieren. Mithilfe der Methodik der Assoziationsmatrix aus der Softwareentwicklung konnten die Ergebnisse des zweiten und dritten Beschreibungsmodells zusammengeführt werden, um die Verantwortlichkeiten zur Informationsbereitstellung im zirkulären Ökosystem zu bestimmen. Die Bewertung der Ausprägungen stützt sich auf die erfassten wissenschaftlichen Arbeiten und die identifizierten Fallstudien der vorherigen Kapitel. Durch die breite Literaturauswahl konnte eine umfassende Bewertung erfolgen, sodass fundierte Aussagen über die Informationsverantwortung getroffen werden konnten. Hervorzuheben ist, dass über den Produktlebenszyklus hinweg verschiedene Rollen eine zentrale Verantwortlichkeit für Informationsentitäten übernehmen müssen. Demnach liegt die initiale Verantwortung zur Bereitstellung von allgemeinen Informationsentitäten beim OEM, mit der Nutzungsphase erhält der Nutzer allerdings eigene Pflichten zur Informationsaktualisierung aus dem Betrieb. Hier zeigt sich die Komplexität in der Umsetzung eines digitalen Produktpasses und den erforderlichen Schnittstellen, um die umfangreichen und geforderten Funktionalitäten umsetzen zu können. Die Rolle der Remanufacturer und Servicedienstleister erhält aufgrund ihres späten Einsatzes im Lebenszyklus Pflichten zur Aktualisierung relevanter Informationen für neue Nutzer. Nur die Rolle der Politik besitzt keine Pflicht zur Erstellung oder Aktualisierung einer Informationsentität. Die Assoziationsmatrix liefert damit die Basis des Informationsmodells des folgenden Abschnitts 5.5. Es konnte die erste Teilfrage der vierten Forschungsfrage beantwortet werden:

Wie lassen sich die Produktinformationen mit den Rollen verknüpfen und in einem Informationsmodell vereinen?

Die zweite Teilfrage wird im folgenden Unterkapitel betrachtet. Dadurch lassen sich die Anwendbarkeit und Lesbarkeit durch Softwareingenieure sicherstellen, was eine übersichtliche Zusammenfassung des Wirkmodells ermöglicht.

5.5 Rollen- und strategiespezifische Informationsmodellierung

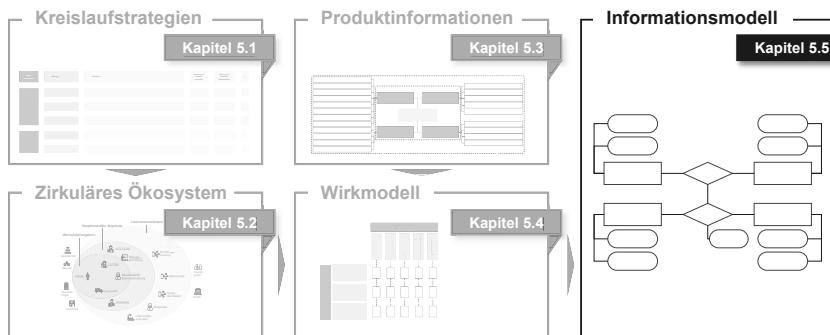


Abbildung 5-46: Rollenspezifische Informationsmodellierung zur Umsetzung eines unternehmensübergreifenden Werterhalts (eigene Darstellung)

Abschließend wird in Abschnitt 5.5 die übergreifende Forschungsfrage beantwortet:

Wie lassen sich Produktinformationen mit den Rollen für die Umsetzung von Kreislaufstrategien verknüpfen und in einem Informationsmodell zusammenführen?

In Unterkapitel 5.4 wurden bereits die Wirkungsbeziehungen zwischen den erforderlichen Produktinformationen und den Rollen im zirkulären Ökosystem in Assoziationsmatrizen beschrieben. Um eine Anwendbarkeit zu gewährleisten, ergibt sich daraus die Notwendigkeit zur Entwicklung eines rollenspezifischen Informationsmodells. Das Informationsmodell unterstützt Unternehmen im zirkulären Ökosystem dabei, ihre Aufgaben im Rahmen eines digitalen Produktpasses nachzuvollziehen und relevante Datenpunkte zu identifizieren. Dadurch lässt sich ein Verständnis über die unternehmensspezifische Informationsbedarfe und das Informationsangebot ableiten. Im folgenden Unterabschnitt 5.5.1 wird zunächst das rollenspezifische Informationsmodell abgeleitet, das im Aufbau von Datenbankstrukturen, bspw. eines digitalen Produktpasses, unterstützen kann. In Unterabschnitt 5.5.2 wird anschließend das Vorgehen zur Anwendung der Erkenntnisse dieser Dissertationsschrift beschrieben und in einem übergreifenden Ordnungsrahmen vereint.

5.5.1 Ableitung des rollenspezifischen Informationsmodells

Auf Basis der Assoziationsmatrizen werden im Folgenden rollenspezifische ER-Modelle auf Basis der vorgestellten Methode aus Unterkapitel 4.2.6 abgeleitet. Der ER-Modellierung folgend wird jede Rolle als eigenständiger Entitätstyp geführt und gemäß dem Wirkmodell aus Abschnitt 5.4 mit den erforderlichen Beziehungstypen und

Informationsentitäten verbunden. Zur besseren Lesbarkeit werden mehrere Informationsentitäten in ihren Kategorien gebündelt dargestellt.

Unter Berücksichtigung der spezifischen Einbindung der Ökosystemrollen abhängig von der betrachteten Kreislaufstrategie wird für die Informationsentitäten eine strategiespezifische Bewertung vorgenommen, um ihre Relevanz für den digitalen Produktionsrollen- und Kreislaufstrategiespezifisch darzulegen. Dies folgt der Zuordnung von Rollen zu Kreislaufstrategien aus Abschnitt 5.2. Dazu werden die Informationsentitäten abhängig von ihrem Einsatz in der Kreislaufstrategie anhand der Hintergrundschraffur in Abbildung 5-47 markiert.



Abbildung 5-47: Legende der folgenden Informationsmodellierung (eigene Darstellung)

Die Legende zeigt eine Teilmenge der vier einbezogenen Kreislaufstrategien: *Reuse*, *Refurbish*, *Remanufacture* und *Repurpose*. Basierend auf den Erkenntnissen aus den Fallstudien des Unterabschnitts 5.2.3 werden die Kreislaufstrategien *Refurbish* und *Remanufacture* zu *Refurbish/Remanufacture* zusammengeführt, um die praktische Anwendbarkeit sicherzustellen. Gemeinsame Varianten der drei ausgewählten Teilmengen der Kreislaufstrategien werden durch diagonale Schraffierungen visualisiert. Eine Teilmenge aus den Kreislaufstrategien *Reuse* und *Repurpose* wurde nicht identifiziert.

Nutzer

Im Folgenden wird zunächst das Informationsmodell der Rolle des Nutzers präsentiert. Für Investitionsgüter besteht die Rolle des Nutzers in der Regel aus produzierenden Unternehmen, die die Maschinen und Anlagen zur eigenen Produktion nutzen. Als zentrale Rolle im zirkulären Ökosystem ist es das Ziel, eine kosteneffiziente, ressourcenschonende und störungsresiliente Produktion aufrechtzuerhalten (s. Unterabschnitt 5.2.4). Die Nutzung des digitalen Produktpasses motiviert sich aus der Wertstabilisierung von bestehenden Maschinen und Produktionsanlagen. Dazu zeigt das Informationsmodell auf, welche Informationsentitäten vom Nutzer eingebracht werden müssen (s. Abbildung 5-48). Der erste Nutzer trägt die Verantwortung, relevante Informationsentitäten der dynamischen Zustandsinformationen zu erstellen und zu aktualisieren. Im Gegenzug erhält er Leserechte auf Produktwerte und Serviceinformationen. Insbesondere die Kategorie der Produktwerte, die vom Händler erstellt und aktualisiert werden, steigert die Preistransparenz und bringt einen direkten Vorteil für den Nutzer. Die Informationsentitäten der dynamischen Zustandsinformationen sind zur Umsetzung aller betrachteten Kreislaufstrategien erforderlich, da beim Nutzerwechsel der Maschinenzustand ein Entscheidungskriterium des Ankaufs und der Weiternutzung darstellt (s. NIELSEN 2016).

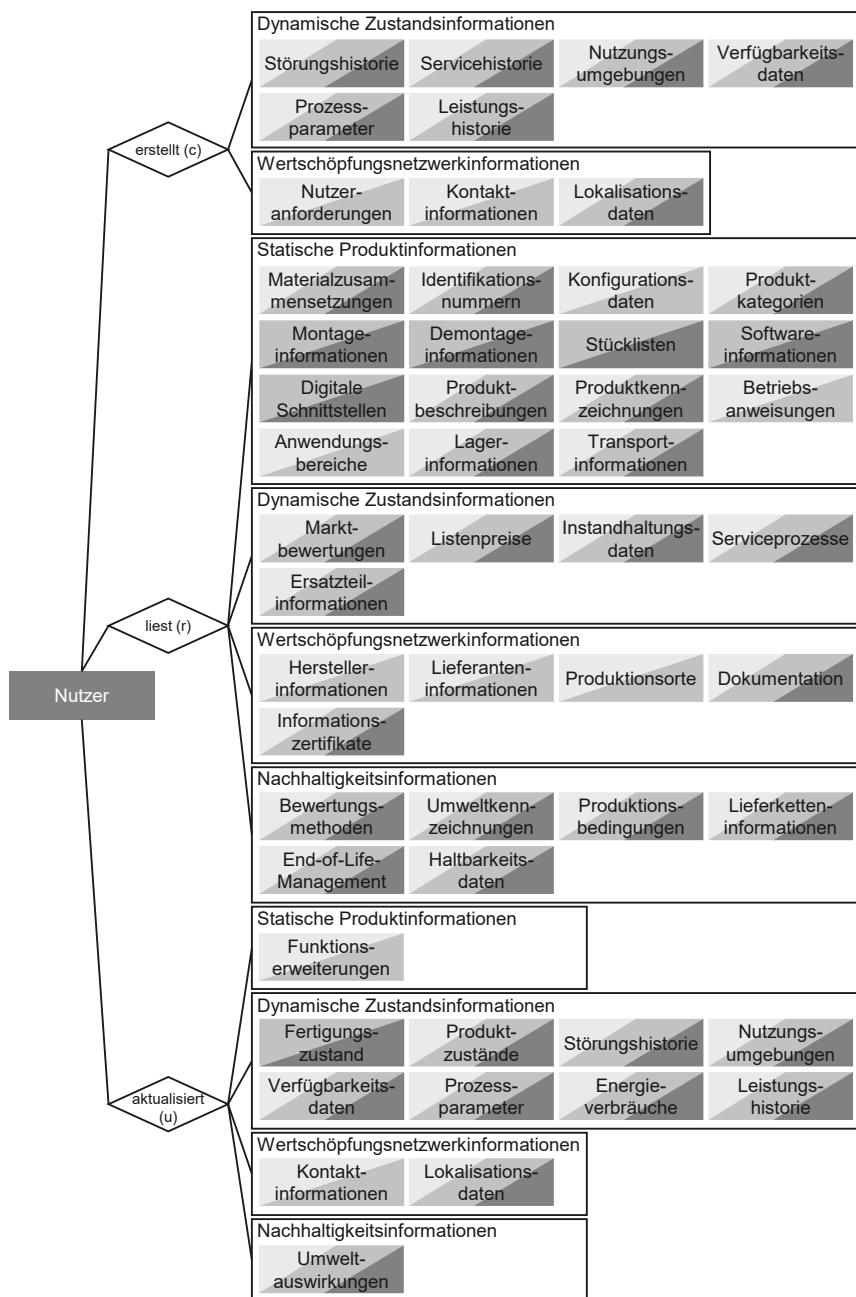


Abbildung 5-48: Informationsmodell der Rolle Nutzer (eigene Darstellung)

Beim *Reuse* entscheidet ein neuer Nutzer auf Grundlage des Zustands, beim *Refurbish/Remanufacture* trifft die Entscheidung ein Remanufacturer und beim *Repurpose* ein Repurposer. Eine Ausnahme bildet die Informationsentität des Fertigungszustands, da für die *Reuse*-Strategie zwischen Nutzern nur fertiggestellte Maschinen und Anlagen gehandelt werden.

Die Kategorie der Wertschöpfungsnetzwerkinformationen ist vorwiegend für die Kreislaufstrategien des *Reuse* und *Refurbish/Remanufacture* erforderlich, denn Nutzer- und Herkunftsinformationen werden im *Repurpose*-Fall aufgrund neuer Anforderungen und Funktionalitäten obsolet. Lokalisationsdaten sind allerdings weiterhin für alle Kreislaufstrategien erforderlich und stellen eine zentrale Anforderung des digitalen Produktpasses dar (s. Unterabschnitt 5.3.2). Weiterhin obliegt dem Nutzer die Aufgabe, Nutzer-, Kontakt- und Standortinformationen bereitzustellen sowie regelmäßig zu aktualisieren. Ein Leserecht erhält er auf vorgelagerte Wertschöpfungsnetzwerkinformationen wie Hersteller- und Lieferanteninformationen.

Als potenzieller Käufer erhält der Nutzer frühzeitig Leserechte auf eine Vielzahl der statischen Produktinformationen, um eine fundierte Kaufentscheidung, insbesondere am Sekundärmarkt, treffen zu können. Die statischen Produktinformationen unterscheiden sich in ihrer Relevanz zwischen den Kreislaufstrategien. Für alle Kreislaufstrategien relevant sind solche, die Produkteigenschaften enthalten, wie Materialien, Identifikationsnummern und Produktbeschreibungen. Herstellungs- und Systeminformationen sind primär für die Strategien des *Refurbish/Remanufacture* und des *Repurpose* von Interesse, da sie die Effizienz der Veränderungsprozesse erhöhen. Funktionsspezifische Informationsentitäten wie Betriebsanweisungen, Anwendungsbereiche und Funktionserweiterungen sind demgegenüber für das *Repurpose* irrelevant.

Auf die Nachhaltigkeitsinformationen hat der Nutzer für alle Kreislaufstrategien vollen Zugriff, um eine ressourcenoptimierte und sozialgerechte Entscheidung treffen zu können (s. GÖTZ ET AL. 2021, S. 29). Allerdings hat er ebenso die Verantwortung, eigene Umweltauswirkungen über den Produktlebenszyklus zu ergänzen.

OEM

Neben dem Nutzer besetzt der OEM als Inverkehrbringer des Originalprodukts eine zentrale Rolle im zirkulären Ökosystem. Aus den Anforderungen an den digitalen Produktpass folgen daher zunächst einige Pflichten für den Hersteller (s. ADISORN ET AL. 2021, S. 11). Demnach liegen die statischen Produktinformationen im Verantwortungsbereich des OEM (s. Abbildung 5-49). Hier gilt es zu berücksichtigen, dass besonders schützenswerte Datensätze wie CAD-Modelle und Simulationsdaten eigenen Lizenzbestimmungen unterliegen können, deren Gestaltung im Rahmen dieser Dissertationsschrift nicht betrachtet werden kann. Für ausgewählte Rollen kann daher das Leserecht eingeschränkt werden, um den Lizenzanforderungen gerecht zu werden. Statische Produktinformationen, die Produktcharakteristika beschreiben, sind dabei für alle Kreislaufstrategien relevant, wohingegen funktionspezifische Informationsentitäten vorwiegend für *Reuse* und *Refurbish/Remanufacture* von Interesse sind.

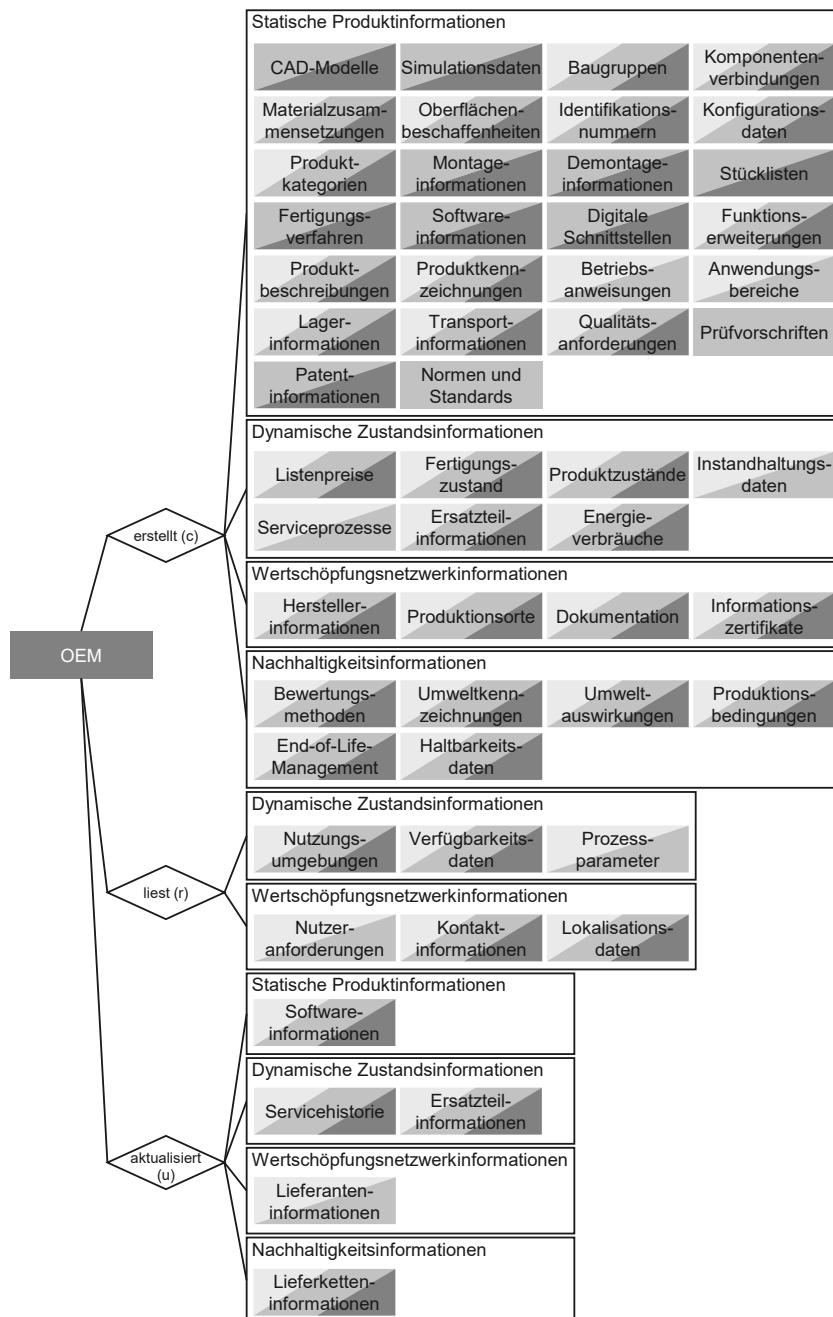


Abbildung 5-49: Informationsmodell der Rolle OEM (eigene Darstellung)

Informationsentitäten, die zur effizienten Produktanpassung beitragen, sind entsprechend nur für die Kreislaufstrategien *Refurbish/Remanufacture* und *Repurpose* relevant (u. a. CAD-Modelle, Simulationsdaten, Montage- und Demontageinformationen). Prüfvorschriften sowie einzuhaltende Normen und Standards werden überdies nur für *Refurbish/Remanufacture* erforderlich.

Ebenso werden Informationsentitäten aus der Kategorie der dynamischen Zustandsinformationen vom OEM erstellt. Diese Informationsentitäten werden zur Umsetzung aller Kreislaufstrategien benötigt, mit der Ausnahme der Instandhaltungsdaten und Serviceprozesse. Diese Entitäten bilden servicespezifische Bereiche ab und sind daher nur für *Reuse* und *Refurbish/Repurpose* relevant. Obwohl der OEM die meisten Informationen bereitstellen muss, ergibt sich für ihn eine Incentivierung über Leserechte zu Informationen, die ihm anders vorenthalten bleiben. Entsprechend ist es für den OEM wichtig, dass alle weiteren Rollen im zirkulären Ökosystem ihre Informationsentitäten aus der Nutzungsphase aktualisieren. Beispielsweise ermöglicht die *Asset Administration Shell* über den digitalen Produktpass einen direkten Kontakt mit dem Service (FRITZ, Experteninterview, 2023). Ferner sind Informationen zur Nutzungsumgebung und zu Prozessparametern nur in spezifischen Branchen für den OEM zugänglich und bieten so Potenziale in der Produktoptimierung.

In den Kategorien der Wertschöpfungsnetzwerk- und Nachhaltigkeitsinformationen erstellt der OEM relevante Entitäten, die jeweils in allen Kreislaufstrategien erforderlich sind. In den Wertschöpfungsnetzwerkinformationen werden die Entitäten erstellt, die im Verantwortungsbereich des OEMs liegen und in den Nachhaltigkeitsinformationen erfordert die Rolle des Inverkehrbringers eine Erstellung relevanter Informationsentitäten. Ebenso wird die nachhaltige Bewertungsmethode durch den OEM ausgewählt, auf dessen Berechnungsbasis die zukünftigen Umweltauswirkungen berechnet werden.

Händler

Die Rolle des Händlers nimmt als Intermediär zwischen Nutzer und OEM oder Remanufacturer im Rahmen des Informationsmodells die dritte zentrale Position ein. Für diese Rolle ergeben sich aus der zusätzlichen Transparenz eines digitalen Produktpasses nur indirekte Vorteile. Zum Beispiel ist ein konstantes Wissen über den Standort einer Maschine vorteilhaft und eine digitale Zustandsermittlung erhöht das Vertrauen in Produkte des Sekundärmarkts.

Das vollständige Informationsmodell der Rolle des Händlers ist in Abbildung 5-50 dargestellt und zeigt, dass der Händler nur die Verantwortlichkeit zur Erstellung einer Informationsentität besitzt. Dies umfasst die Erstellung einer aktuellen maschinenspezifischen Marktbewertung, die aus ökonomischer Sicht eine Indikation über den Wiederverkaufswert und Zustand des Sekundärmaschinenmarkts gibt und für die Umsetzung aller Kreislaufstrategien relevant ist. Ferner erhält die Rolle relevante Leserechte in den vier Hauptkategorien, um potenziellen Nutzern einen umfassenden Wissensstand über die Maschine oder Anlage präsentieren zu können. Zusätzlich ist ein Zugriff auf Nachhaltigkeitsinformationen gewährleistet, sodass bisherige ökologische und soziale

Auswirkungen an die Kundschaft als Entscheidungsunterstützung weitergegeben werden können. Zu aktualisieren sind Informationsentitäten, die aufgrund eines Eigentümerwechsels (z. B. Kontaktinformationen, Lokalisationsdaten) oder durch Aufbereitungsprozesse (z. B. Produktzustand, Fertigungszustand) verändert wurden. Überdies ist die Rolle des Händlers an vielen Transaktionen beteiligt und ein wichtiger Teil des Ökosystems, verändert jedoch nicht die Eigenschaften einer Maschine, die für den digitalen Produktpass relevant wären.

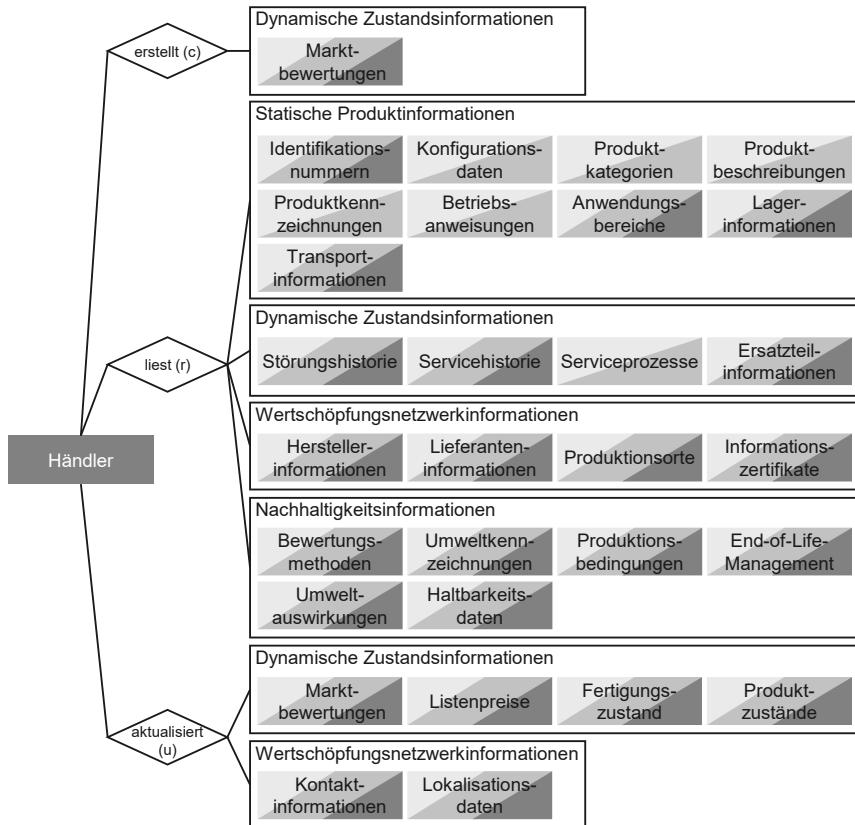


Abbildung 5-50: Informationsmodell der Rolle Händler (eigene Darstellung)

Aufgrund dieser Position im Ökosystem ergibt sich für die Vielzahl der Informationsentitäten eine Relevanz in allen Kreislaufstrategien. Ausnahmen bilden Entitäten zur Konfiguration, spezifischen Beschreibung einer Maschine und deren Serviceprozesse, die für das *Repurpose* nur eine untergeordnete Relevanz spielen.

OER

Der OER bereitet als subsidiäre Gesellschaft des OEMs dessen Originalprodukte auf und verfolgt daher nur die Kreislaufstrategie des Remanufacturers. Im

Informationsmodell zeigt sich diese strategische Ausrichtung anhand der Einordnung aller Informationssentitäten in *Refurbish/Remanufacture* (s. Abbildung 5-51).

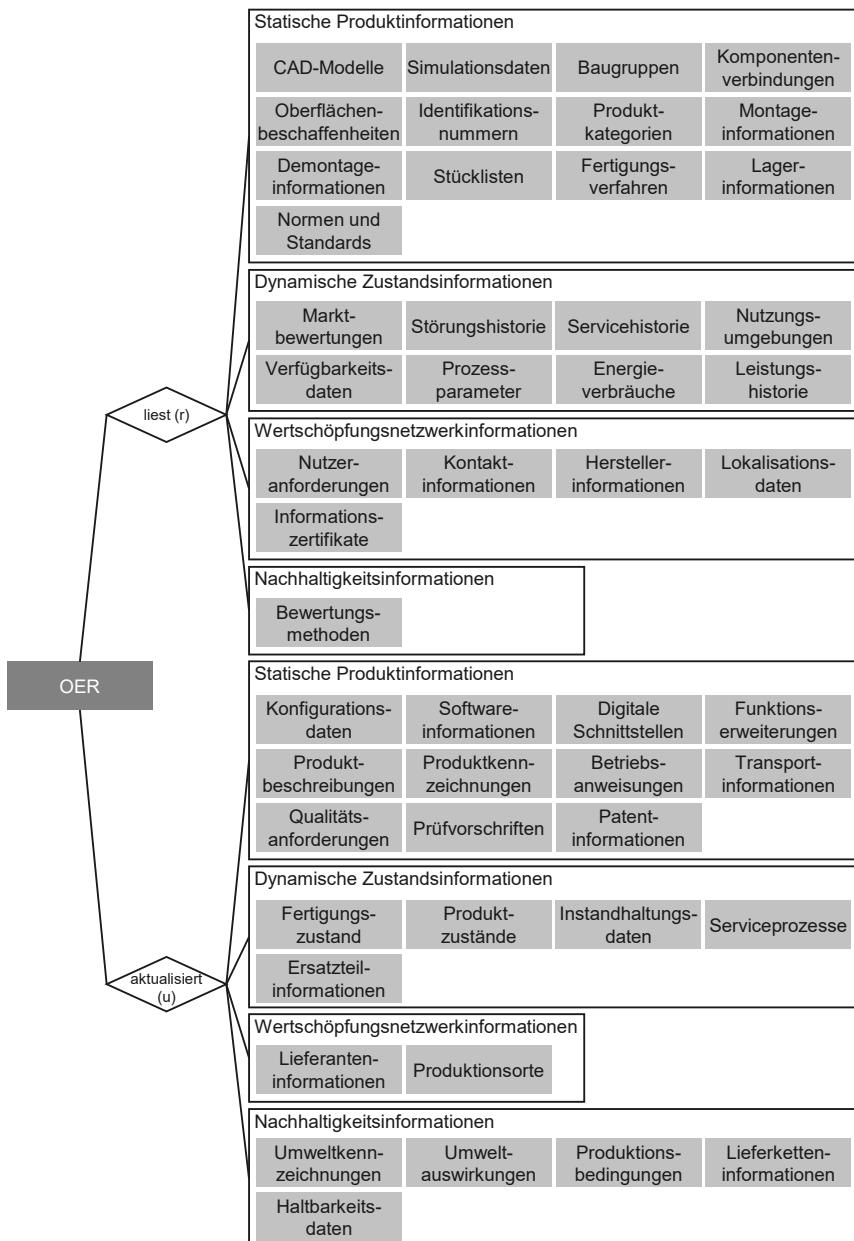


Abbildung 5-51: Informationsmodell der Rolle OER (eigene Darstellung)

Vorteilhaft für den OER ist die enge Beziehung zum OEM, sodass in der Regel auf das vollständige geistige Eigentum des OEMs zurückgegriffen werden kann (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 2f.). Neben dem strategischen Vorteil der Entwicklungsdaten beginnen die Aktivitäten des OERs erst nach der ersten Einsatzphase einer Maschine; er profitiert daher besonders vom zusätzlichen Informationsgehalt des digitalen Produktpasses. Insbesondere manuelle Prozesse zur Ermittlung des Produktzustands werden durch einen digitalen Produktpass reduziert, was sich an den umfangreichen Leserechten des OER im Informationsmodell widerspiegelt.

An der Verteilung der Erstell-, Lese- und Aktualisierungsrechte ist ebenso zu erkennen, dass der OER eine Vielzahl an Informationseinheiten aktualisieren muss. Neuen Erkenntnissen aus der Aufarbeitung mehrerer Maschinen des gleichen Typs entsprechend kann der OER u. a. Instandhaltungsdaten und Ersatzteilinformationen des Maschinentyps für weitere Nutzer und Remanufacturer aktualisieren (s. MORRIS 2016, S. 1). Zudem werden im Rahmen des Aufbereitungsprozesses Veränderungen an der Maschine vorgenommen, die es zu aktualisieren gilt. In der Regel werden technologische Aktualisierungen und Softwareupdates vorgenommen, sodass die Maschinenkonfiguration aktualisiert werden muss (s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 6).

Unabhängiger Remanufacturer

Die Rolle des unabhängigen Remanufacturers unterscheidet sich zum OER dadurch, dass sie als eigenständige Organisation, die keine Gesellschafterstruktur mit einem OEM teilt, besteht. Daher stellt der digitale Produktpass eine regulierte Möglichkeit dar, relevante Informationen über die Produktkonfiguration und den Produktzustand zu erhalten und die Effizienz der Aufbereitungsprozesse zu erhöhen (s. RIDLEY ET AL. 2019, S. 263). Insbesondere unabhängige Akteure haben Schwierigkeiten bei der Informationsbeschaffung von nicht lizenzenfreien Daten wie Geometriedaten oder Stücklisten (s. CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018, S. 2f.). Somit ist die Barriere für den Einstieg von unabhängigen Remanufacturers sehr viel höher. Ferner ist die Anpassungsgeschwindigkeit hinsichtlich der Produktänderungen und gesetzliche Veränderungen aufgrund der Entfernung zum OEM geringer und etablierte Aufbereitungsprozesse finden keine Anwendung mehr (s. MORRIS 2016, S. 1).

Im Informationsmodell ist es daher von kritischer Bedeutung für unabhängige Remanufacturer, dass ein Zugriffsrecht auf die erforderlichen Informationseinheiten vorhanden ist. Das Informationsmodell unterscheidet sich in Bezug auf den OER nur dadurch, dass die Betriebsanweisungen und Patentinformationen nicht aktualisiert werden, sondern über Zugriffsrechte gelesen werden können (s. Abbildung 5-52). Hier gilt es allerdings zu beachten, dass sie teilweise lizenziert werden müssen und somit nicht automatisch zur Verfügung stehen. Überdies gelten identische Erstell-, Lese- und Aktualisierungspflichten im Vergleich zum OER. Einzig die Motivation zur Etablierung eines digitalen Produktpasses ist für unabhängige Akteure höher als für OER, die im Zweifel durch Eigeninitiative auf eine Vielzahl von Herstellerdaten zugreifen können. Ebenso betrachtet das Informationsmodell nur die Kreislaufstrategie des *Refurbish/Remanufactures* aufgrund der einzigen Beteiligung in diesem zirkulären Ökosystem.

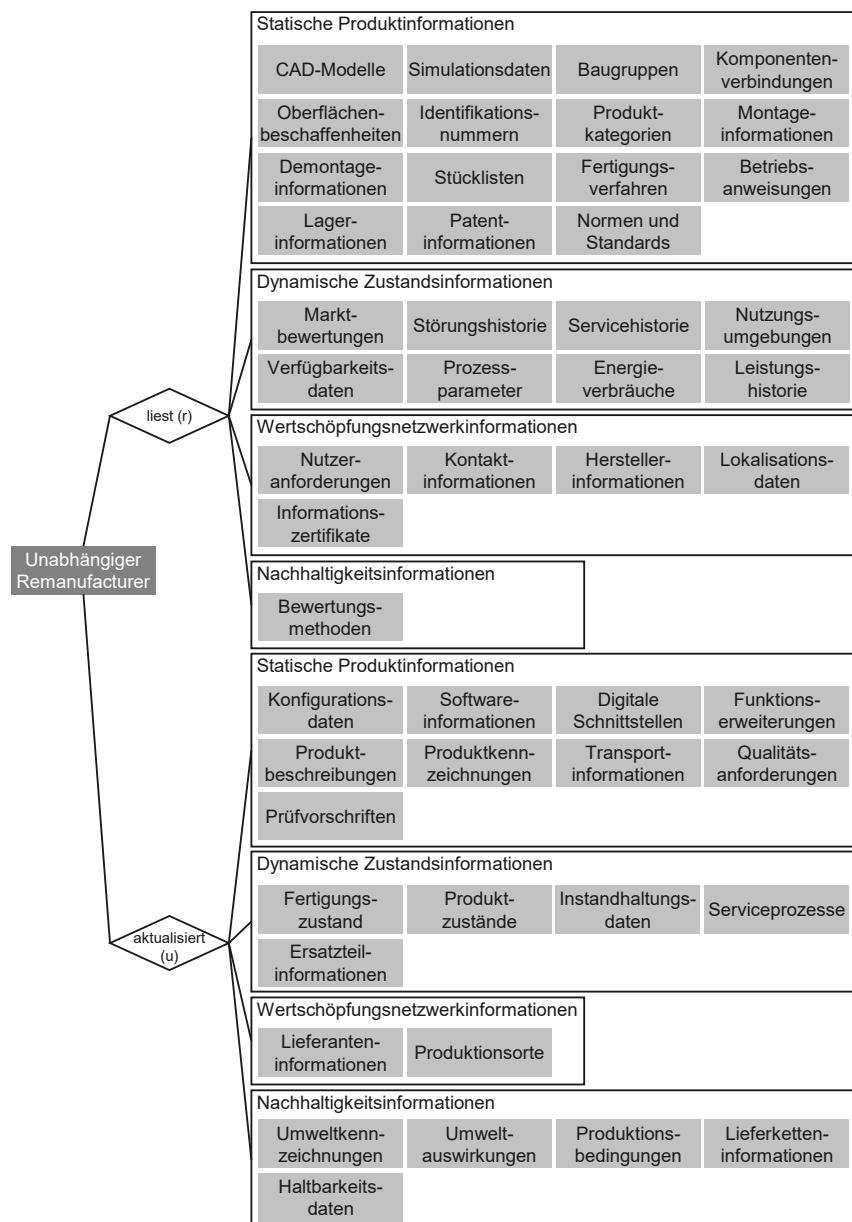


Abbildung 5-52: Informationsmodell der Rolle **unabhängiger Remanufacturer** (eigene Darstellung)

Repurposer

Die Rolle des Repurposers ist dadurch gekennzeichnet, dass im Gegensatz zu den verbleibenden Rollen ein klarer Fokus auf der Kreislaufstrategie des *Repurpose* liegt. Daher werden im korrespondierenden Informationsmodell in Abbildung 5-53 nur Informationsentitäten zur Kreislaufstrategie des *Repurpose* präsentiert. Zudem umfasst diese Kreislaufstrategie eine umfassende Veränderung des Produkts, die die primäre Funktionsweise an ein neues Anforderungsprofil anpasst. Daraus ergibt sich eine Vielzahl an Verantwortlichkeiten für den Repurposer.

Zu erkennen ist, dass keine Pflicht zur Erstellung einer Informationsentität besteht, da die Kreislaufstrategie des Repurpose auf bereits bestehenden Maschinen fundiert. Der Repurposer besitzt viele Leserechte, um Detailinformationen über die Maschine zu erhalten und eine eigene Zustandsbewertung durchführen zu können. Dies beeinflusst primär die Entscheidungsfindung, ob sich die betrachteten Maschinen zum Repurpose eignet. Das Repurpose erfordert anschließend die Aktualisierung einer Vielzahl an Informationsentitäten, vergleichbar mit der Rolle des OEMs als Inverkehrbringer eines neuen Produkts. Hier gilt es, den Informationsstand an die neue Funktionalität anzupassen und entsprechend relevante Informationen im Produktpass zu hinterlegen.

Servicedienstleister

Der Servicedienstleister wird in der Regel direkt vom Nutzer beauftragt und übernimmt auf Anfrage Aktivitäten wie die Instandhaltung, Reparatur und Aufbereitung von Maschinen. Das Informationsmodell ist daher vorwiegend durch Leserechte charakterisiert, die zur effektiven Ausführung der Dienstleistungen erforderlich sind (s. Abbildung 5-54). Die betrachteten Kreislaufstrategien beinhalten nur das *Reuse* und *Refurbish/Remanufacture*, da Servicedienstleister im zirkulären Ökosystem des *Repurpose* nicht involviert sind (s. Unterabschnitt 5.2.3).

Als einzige Informationsentität werden die Serviceprozesse durch den Servicedienstleister erstellt, sodass für den Nutzer eindeutig ist, welche Instandhaltungsmöglichkeiten bestehen und wie ein Aufbereitungsprozess initiiert wird. Von den Informationsentitäten sind nur ebensolche für die Verfolgung des Remanufacturings relevant, die zur Durchführung von Aufbereitungsprozessen an der Maschine erforderlich sind. Neben den Baugruppen und Stücklisten umfasst dies ebenso Systeminformationen. Diese Informationsentitäten werden zur Umsetzung der Kreislaufstrategie des *Reuse* daher nicht benötigt. Alle weiteren Informationsentitäten sind ebenso für *Reuse* wie für *Refurbish/Remanufacture* von Interesse. Aktualisiert werden weiterhin servicerelevante Informationsentitäten, sodass im digitalen Produktpass die aktuelle Servicehistorie hinterlegt ist und aufgetretene Problemstellen identifizierbar sind. Diese Information liefern dem OEM für darauffolgende Produktentwicklungen wichtige Erkenntnisse.

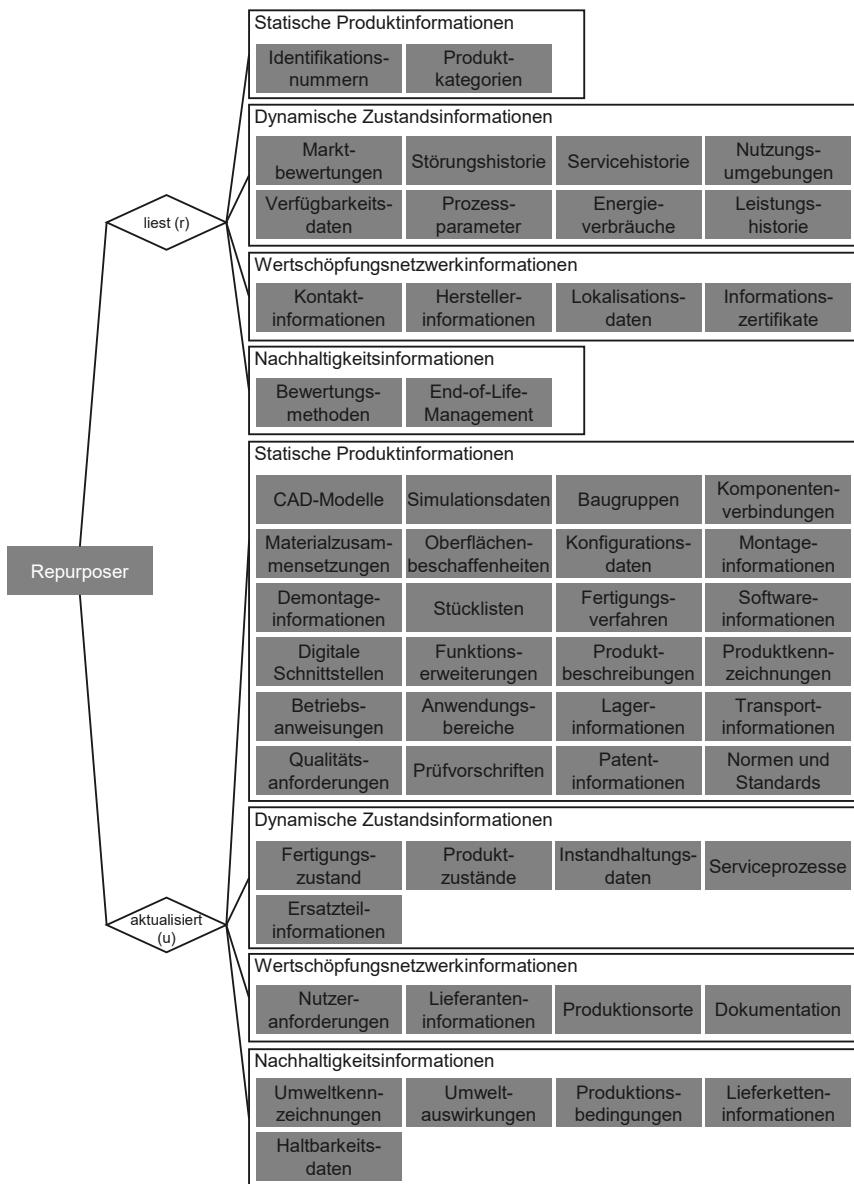


Abbildung 5-53: Informationsmodell der Rolle Repurposer (eigene Darstellung)

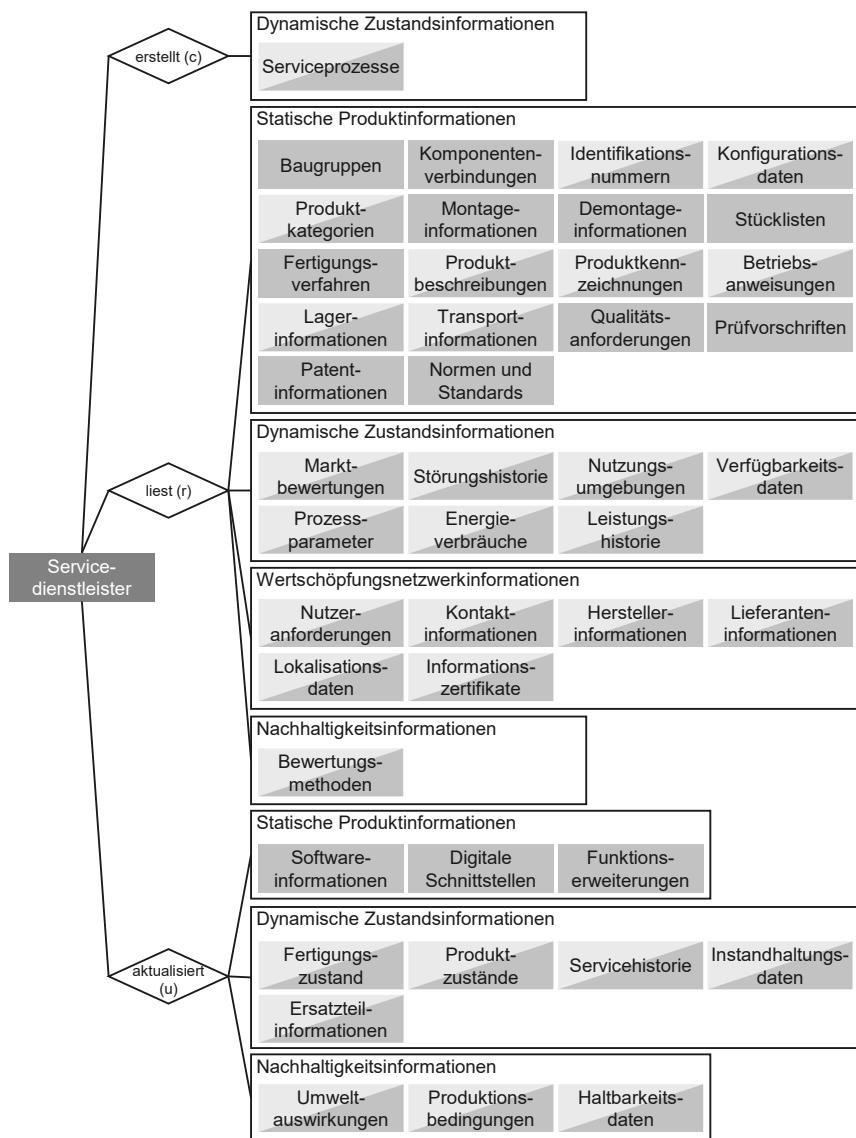


Abbildung 5-54: Informationsmodell der Rolle **Servicedienstleister** (eigene Darstellung)

Komponentenlieferant

Die Rolle des Komponentenlieferanten lässt sich im Kontext der Kreislaufstrategien des unternehmensübergreifenden Werterhalts dadurch charakterisieren, dass erforderliche Ersatzteile und Komponenten für den Aufbereitungsprozess zur Verfügung gestellt werden, um eine Maschine auf Originalqualität aufbereiten zu können (s. BOURGEOIS U. LELEUX 2005, S. 13; s. BOOTSMA 2016, S. 1; s. BRAMMER 2016, S. 1). Dadurch ergibt sich für das Informationsmodell die Herausforderung, zwischen OEM-Zulieferer und Ersatzteillieferant zu unterscheiden. An den digitalen Produktpass wird jedoch die technische Anforderung gestellt, dass er zum einen erweiterbar ist und zum anderen entlang der Supply-Chain mitgeführt und um die relevanten Informationsentitäten ergänzt wird (s. BERG ET AL. 2022, S. 15f.). Somit kann die Rolle des Komponentenlieferanten als eigenständiger Produkthersteller betrachtet werden und erhält vergleichbare Erstell-, Lese- und Aktualisierungsrechte wie die Rolle des OEMs (s. Abbildung 5-55). Insbesondere die Kategorie der statischen Produktinformationen ist nahezu identisch mit der Rolle des OEMs und umfasst die Erstellung der Vielzahl an Informationsentitäten. Einzig unterscheidet sich diese Kategorie in der Informationsentität der Baugruppen und den Unterkategorien der Identifikationsinformationen und Anwendungsinformationen, die vom OEM für das Gesamtprodukt vorgegeben werden (s. Abbildung 5-49). Dabei werden für diese Rolle nur die Kreislaufstrategien des *Refurbish/Remanufactures* und *Repurpose* berücksichtigt, da der Komponentenlieferant im *Reuse* in der Regel nicht involviert ist. Eine Ausnahme bilden nur konfigurationsspezifische Informationsentitäten, die bei einer Maschinenumfunktionierung irrelevant werden.

Ferner müssen abhängig vom Komponententyp Instandhaltungsdaten und Energieverbräuche geliefert und die dazugehörigen Informationsentitäten erstellt werden. Dies gilt ebenso für relevante Informationen aus dem Wertschöpfungsnetzwerk (u. a. Produktionsorte) und Nachhaltigkeitsinformationen (u. a. Umweltkennzeichnungen, Haltbarkeitsdaten). Allerdings ergeben sich aus dieser frühen Position im Produktlebenszyklus nur begrenzte Leserechte und Aktualisierungspflichten im weiteren Verlauf. Neben den erforderlichen Daten wie einer eindeutigen Identifikationsnummer und der angewandten Bewertungsmethode zur Berechnung des ökologischen Umwelteinflusses kann auf die Informationsentitäten der Nutzeranforderungen und Herstellerinformationen zugegriffen werden, um daraus etwaige Anpassungen vornehmen zu können. Zudem erhält der Komponentenlieferant ein Leserecht der Lokalisationsdaten, um im Lebenszyklus die Chance zur Komponentenaufbereitung zu erhalten, die derzeit nicht gegeben ist (LEHANKA, Experteninterview, 2021). Pflichten zur Aktualisierung behält der Komponentenlieferant nur für Nachhaltigkeitsinformationen, die aufgrund einer Systemrechnung der gesamten Maschine um die Umweltauswirkungen einer Komponente sowie deren Produktionsbedingungen erweitert werden müssen. Zusammenfassend behält der Komponentenlieferant somit vergleichbare Pflichten wie der OEM in der Informationsbereitstellung, hat jedoch im weiteren Produktlebenszyklus weniger Zugriffsmöglichkeiten.

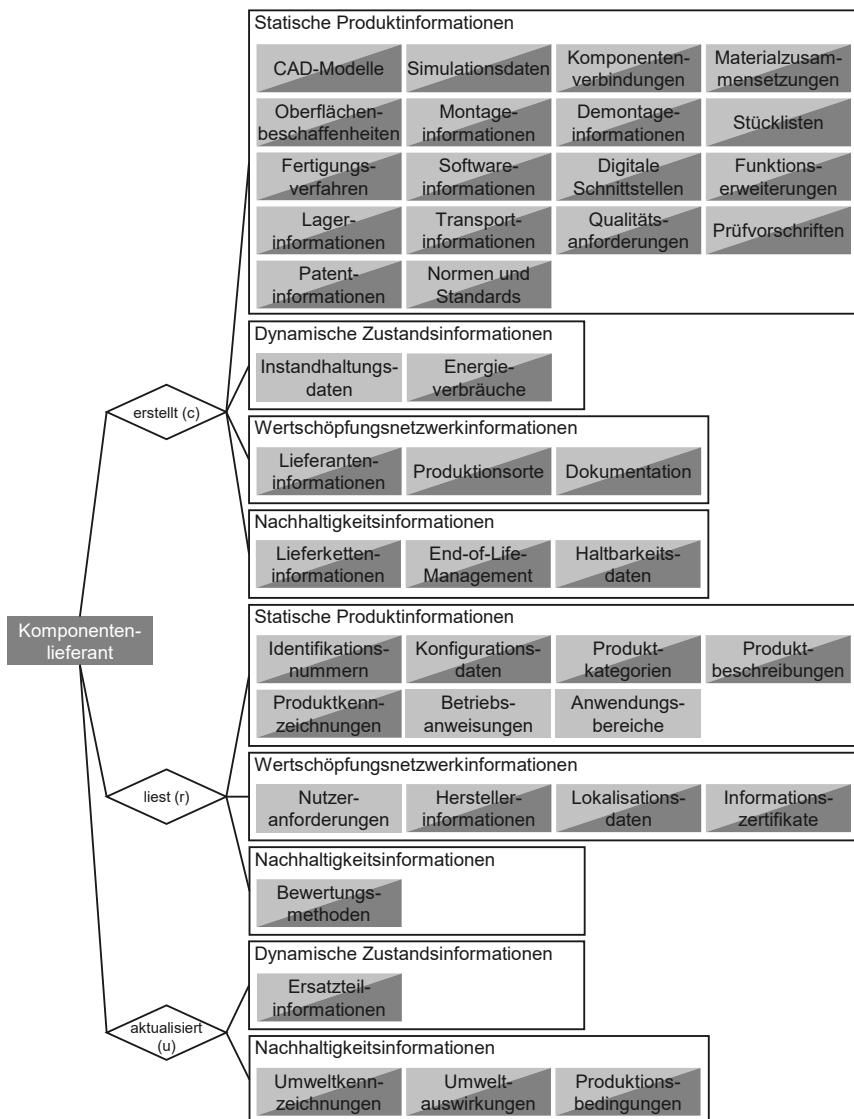


Abbildung 5-55: Informationsmodell der Rolle **Komponentenlieferant** (eigene Darstellung)

Recycler

Die Rolle des Recyclers ist innerhalb der Kreislaufstrategien des unternehmensübergreifenden Werterhalts ohne wertschöpfenden Anteil, gilt jedoch als zentrale Zielgruppe eines digitalen Produktpasses und seiner Materialdaten (s. O'CONNOR ET AL. 2016, S. 5884; s. BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) 2020, S. 18). Im Aufbereitungsprozess wird die Menge der ausgemusterten Bauteile und Komponenten zwar auf das Nötigste reduziert, allerdings gibt es einen Anteil an sicherheitsrelevanten Komponenten und Verschleißteilen, die ausgetauscht und einem Recycler zugesandt werden müssen (s. BOOTSMA 2016, S. 1). Davon ausgehend beschreibt Abbildung 5-56 das Informationsmodell für die Rolle des Recyclers. Alle betrachteten Informationsentitäten sind den Kreislaufstrategien des *Refurbish/Remanufacture*s und des *Repurpose* zuzuordnen, da in der *Reuse*-Strategie keine zu recycelnden Komponenten anfallen.

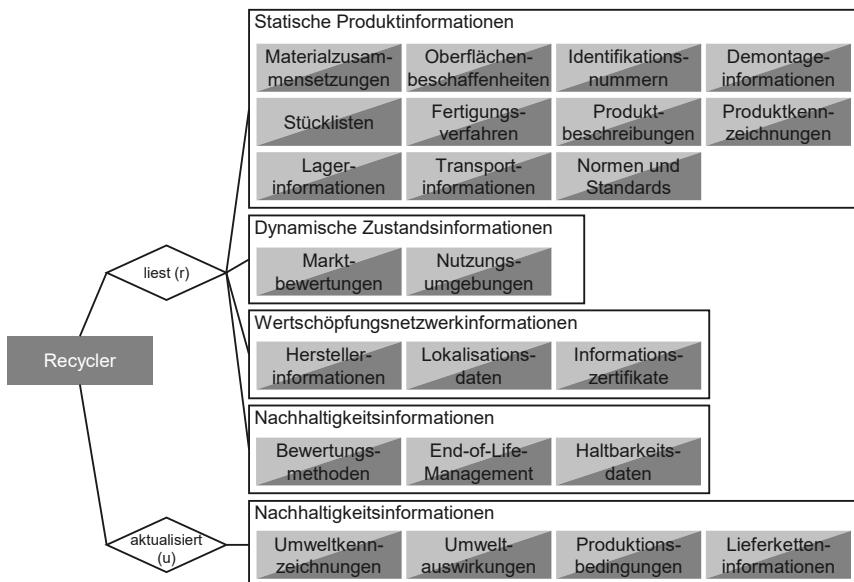


Abbildung 5-56: Informationsmodell der Rolle Recycler (eigene Darstellung)

Aufgrund des Tätigkeitsbereichs, das Material von Komponenten in den Kreislauf zurückzuführen, endet der funktionale Produktlebenszyklus beim Recycler, sodass eine Aktualisierung vieler Informationsentitäten nicht mehr erforderlich ist. Dadurch erhält der Recycler Leserechte für die Materialzusammensetzungen, die Oberflächenbeschaffenheiten und die Demontageinformationen, um einen effizienten Recyclingprozess durchführen zu können. Ebenso können aktuelle Marktbewertungen und Lokalisationsdaten unterstützen, die Wirtschaftlichkeit des Prozesses zu berechnen. Aktualisiert werden abschließend nur die Entitäten der Umweltkennzeichnungen und

Umweltauswirkungen, sodass für der ökologische Fußabdruck des Sekundärmaterials nachgewiesen werden kann.

Logistikunternehmen

Die Rolle des Logistikunternehmens gilt als Befähiger im Kreislaufökosystem und ermöglicht den Transport von Investitionsgütern zwischen Akteuren des Ökosystems. Insbesondere vor dem Hintergrund hoher Transportkosten, ungeplanter Verzögerungen und zusätzlicher Gebühren erfordert die Rolle des Logistikunternehmens eine bessere Informationstransparenz, um ungenauen Kapazitätsplanungen und erhöhten Durchlaufzeiten in Remanufacturing-Zentren vorzubeugen (s. RÖNKKÖ ET AL. 2021, S. 8). Das Informationsmodell umfasst primär Leserechte zur Identifikation, Lokation, Lagerung und Transport von Maschinen, indem möglichst wenige technische Informationen freigegeben werden (s. Abbildung 5-57). Diese Informationssentitäten sind ebenso für alle betrachteten Kreislaufstrategien relevant. Zusammengefasst stellt der digitale Produktpass Informationen zur Verfügung, die dabei unterstützen, das korrekte Produkt zu identifizieren und relevante Logistikinformationen zu erhalten, um einen effizienten Transport zu realisieren. Das Logistikunternehmen ist in der Pflicht, Informationssentitäten zur neuen Lokation und den Umweltauswirkungen des Transports zu aktualisieren.

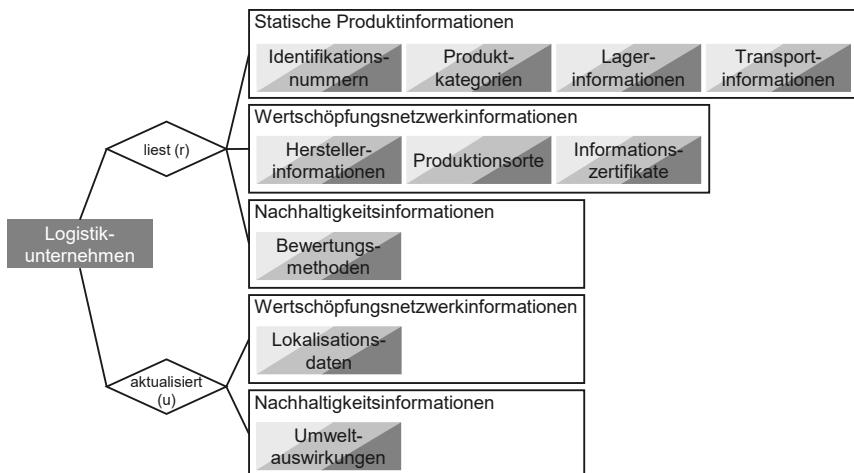


Abbildung 5-57: Informationsmodell der Rolle **Logistikunternehmen** (eigene Darstellung)

Politik

Die Rolle der Politik kann ihrer regulierenden Funktion mithilfe eines flächendeckenden Produktpasses einfacher gerecht werden. Demnach werden für die Regulatorik relevante Informationen in einem digitalen Produktpass einheitlich gespeichert und nutzergerecht zur Verfügung gestellt (s. BERG ET AL. 2021, S. 49). Das entsprechende Informationsmodell umfasst ausschließlich Leserechte zu den relevanten

Informationsentitäten. Dies beinhaltet Produktinformationen zur Identifikation, zu Kennzeichnungen, zu Patenten sowie zu eingehaltenen Normen und Standards. Ergänzt werden Wertschöpfungsnetzwerkinformationen zur Identifikation des Herstellers und Nutzers sowie Nachhaltigkeitsinformationen, die aus europäischer Perspektive eine Motivation des digitalen Produktpasses darstellen (s. EUROPEAN COMMISSION 2020a, S. 4). Relevant sind die betrachteten Informationsentitäten für alle Kreislaufstrategien.

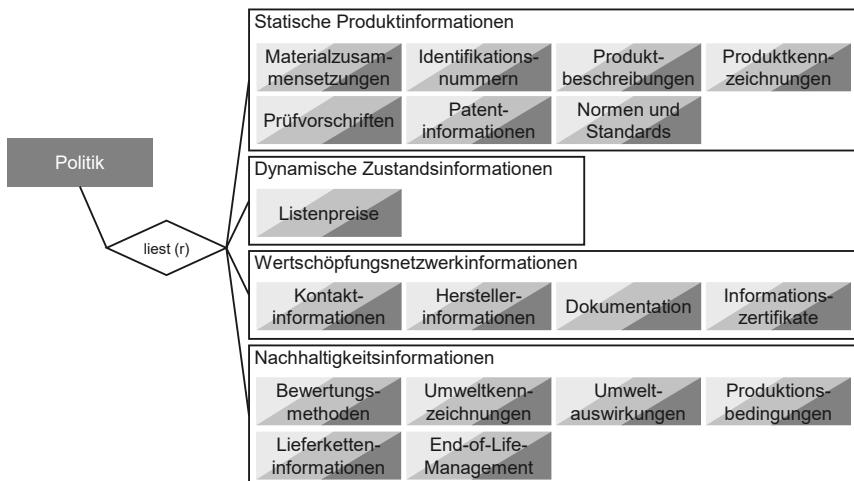


Abbildung 5-58: Informationsmodell der Rolle **Politik** (eigene Darstellung)

Neue Nutzergruppe

Die Rolle der neuen Nutzergruppe unterscheidet sich nur geringfügig von der Rolle des Nutzers, ist jedoch dadurch gekennzeichnet, dass ausschließlich die Kreislaufstrategie des *Repurpose* verfolgt wird. Daher hat die neue Nutzergruppe insbesondere vor einer Kaufentscheidung das Interesse, historische Daten und den Produktzustand nachverfolgen zu können, um zukünftige Instandhaltungsaufwände und die Produkt haltbarkeit abzuschätzen (s. SCHULZ-MÖNNINGHOFF U. EVANS 2023, S. 566).

Vor diesem Hintergrund erhält diese Rolle Leserechte und keine Erstellpflichten, so dass eine ausreichende Informationslage vor der Kaufentscheidung zu erwarten ist (s. Abbildung 5-59). Speziell auf statische Produktinformationen kann zugegriffen werden, solange die veränderten Informationsentitäten zuvor vom Repurposer aktualisiert wurden (s. Abbildung 5-53). Damit einher gehen die Leserechte der dynamischen Zustandsinformationen, Wertschöpfungsnetzwerkinformationen und Nachhaltigkeitsinformationen, deren Qualität und Aktualität vom Repurposer abhängen. Ebenso erhält die neue Nutzergruppe Pflichten zur Aktualisierung von Produktinformationen im Nutzungszyklus des Produkts. Auf Zustandsinformationen aus dem ersten Nutzungszyklus aufbauend, werden aktuelle Daten aus der neuen Nutzungsphase ergänzt. Ebenso werden die Wertschöpfungsnetzwerkinformationen ergänzt und die

Umweltauswirkungen aus dem zweiten Nutzungszyklus nach den benannten Bewertungsmethoden berechnet.

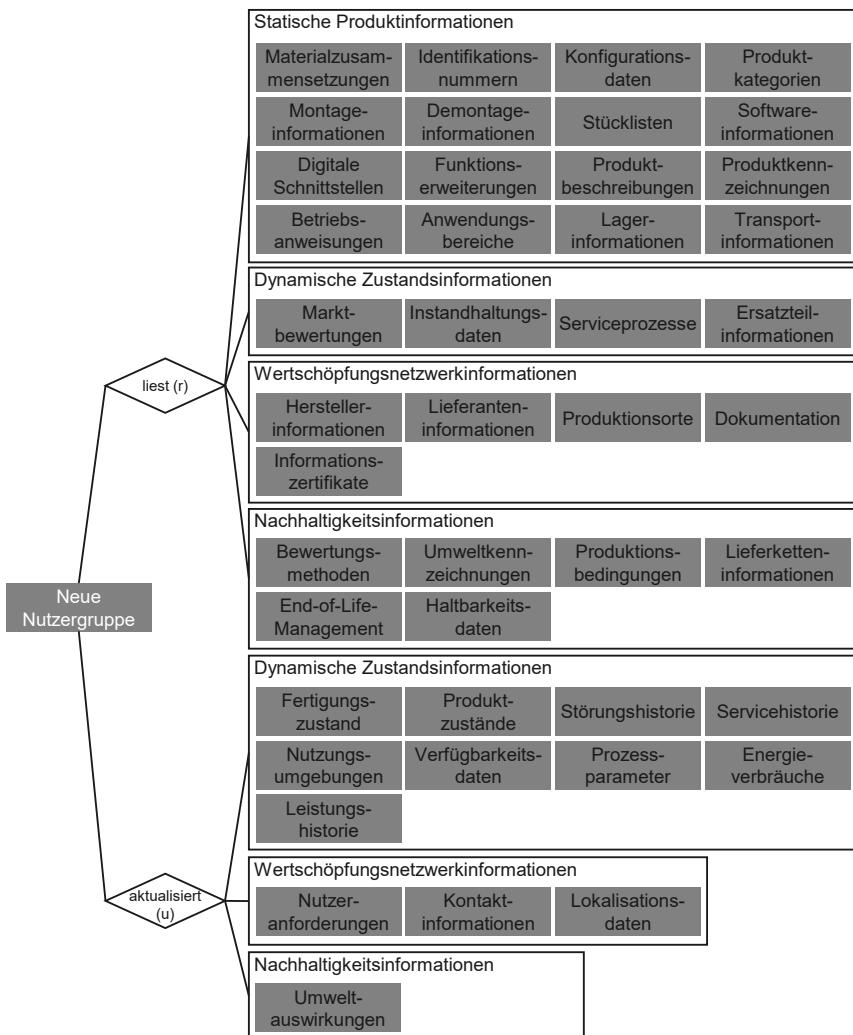


Abbildung 5-59: Informationsmodell der Rolle **Neue Nutzergruppe** (eigene Darstellung)

Es kann festgestellt werden, dass das Informationsmodell der neuen Nutzergruppen eine hohe Übereinstimmung der ermittelten Informationsentitäten mit denen des Nutzers besitzt. Allerdings ist die Nutzerrolle mit den Pflichten belegt, davon viele Informationsentitäten erststellen zu müssen, wohingegen die neue Nutzergruppe nur Aktualisierungen durchführen muss.

5.5.2 Anwendung des Informationsmodells

In diesem Unterabschnitt gilt es, eine geeignete Vorgehensweise zur Anwendung des Informationsmodells in der praktischen Umsetzung darzustellen. Im Fokus steht hierbei ein klarer Prozess mit definierten Schritten, der umsetzende Personen im Unternehmen, z. B. leitende Softwareingenieure oder Innovationsmanager, dabei unterstützt, die antizipierten Ergebnisse zu erlangen. Das Vorgehen besteht aus fünf Schritten, die nachstehend beschrieben werden (s. Abbildung 5-60):

Schritt 1 – Identifikation der adressierten Kreislaufstrategien

Der erste Schritt begleitet den Einstieg in die Kreislaufwirtschaft mithilfe von Kreislaufstrategien, welche eine strategische Ausrichtung des betrachteten Produkts vorgeben können (s. Unterkapitel 5.1). Somit kann zunächst ein Verständnis über den Umfang potenzieller Handlungsfelder geschaffen werden, sodass der Anwendungsbereich auf priorisierte Themen fokussiert werden kann. Ausgehend von den Kreislaufstrategien sollten die Projektverantwortlichen produktspezifisch und strategisch diskutieren, um die Unternehmens-, Produkt- und Kreislaufstrategien zu vereinen. Dazu kann es vorteilhaft sein, ein abteilungsübergreifendes Projektteam aufzustellen, welches bspw. aus Vertretern des Business-Developments, der Forschung & Entwicklung, des Service sowie des Vertriebs besteht. Abhängig von der Kreislaufstrategie können aus den verschiedenen Abteilungen unterschiedliche Erkenntnisse eingebracht werden. Am Beispiel von DMG Mori wurde aufgezeigt, dass während einer Krisenphase das Remanufacturing priorisiert werden kann, um mit freien Kapazitäten Bestandskunden zusätzliche Services anbieten zu können (HUSMANN, Experteninterview, 2021). Wird ein Konsens hinsichtlich der zu verfolgenden Kreislaufstrategien gefunden, sollte dieser mit dem Fokus der vorliegenden Dissertationsschrift überprüft werden. Handelt es sich dabei um Kreislaufstrategien aus der Kategorie *Unternehmensübergreifender Werterhalt*, kann mit Schritt 2 – Identifikation der Ökosystemrolle die nächste Phase gestartet werden.

Schritt 2 – Identifikation der Ökosystemrolle

Aufgrund des langen Lebenszyklus von Maschinen und Anlagen kann deren Kreislaufwirtschaft nur in unternehmensübergreifenden Ökosystemen gestaltet werden. Daher gilt es in diesem Schritt, ausgehend von den identifizierten Kreislaufstrategien die individuellen Ökosystemrollen zu identifizieren und darüber hinaus weitere, erforderliche Akteure zu ermitteln. Die in Unterkapitel 5.2 entwickelten Ökosystemrollen und deren Beschreibungen bieten eine Übersicht des zu entstehenden Kreislaufökosystems. Anhand der Rollenbeschreibungen sollte zudem die Motivation der individuellen Rollen betrachtet und in Bezug auf den eigenen Anwendungsfall überprüft werden, um im Rahmen des zu entwickelnden Informationsmodells akteurspezifische Anreize bieten zu können. Als Ergebnis des zweiten Schrittes sind somit eine Rollenübersicht und -beschreibung für die im ersten Schritt identifizierten Kreislaufstrategien zu erwarten.

Schritt 3 – Auswahl von Informationsentitäten

Nachdem die Kreislaufstrategien und Rollen in den vorangegangenen Schritten spezifiziert wurden, muss im dritten Schritt eine Auswahl erforderlicher Informationsentitäten für ein Informationsmodell getroffen werden. Anhand identifizierter Anforderungen aus verschiedenen Perspektiven wurde dazu in Abschnitt 5.3 eine Klassifizierung von Produktinformationen für Kreislaufstrategien des unternehmensübergreifenden Werterhalts abgeleitet. Hier gilt es zu überprüfen, ob im betrachteten Ökosystem weitere Anforderungen gestellt werden oder alternative Abweichungen zutreffen. Die im Rahmen dieser Dissertationsschrift abgeleiteten Informationsentitäten bieten ein umfangreiches Angebot an, welches allerdings auch auf unternehmensindividuelle Beschränkungen wie Patente und Eigentumsrechte geprüft werden muss. Hier gilt es zu beachten, dass die Auswahl auf Basis einer ausführlichen Anforderungsanalyse basiert, die nicht für jeden Anwendungsfall vollkommen zutrifft. Ferner sollte überprüft werden, ob der eigene Informationsbedarf im Rahmen der Produktinformationen gedeckt werden kann. Die identifizierten und klassifizierten Produktinformationen dienen anschließend als Grundlage für die Wirkungsbeziehungen im Ökosystem.

Schritt 4 – Analyse Wirkungsbeziehungen

Auf Basis der identifizierten Ökosystemrollen und Informationsentitäten lassen sich im vierten Schritt die Wirkungsbeziehungen zwischen ebendiesen anhand von Assoziationsmatrizen analysieren und verstehen. Die in Abschnitt 5.4 präsentierten Assoziationen dienen als Ausgangsbasis für rollenspezifische Informationsbedarfe und -verfügbarkeiten. Die entsprechenden Rechte und Pflichten, die aus einer umfassenden Fallstudienanalyse hervorgegangen sind, können anschließend abgeleitet werden. Für das zu betrachtende Ökosystem und die ausgewählten Informationsentitäten werden die Wirkungsbeziehungen sukzessive analysiert und bei Abweichungen rollenspezifisch angepasst. Während dieses Schritts ist es von hohem Interesse, die unternehmensinterne Informationsverfügbarkeit zu überprüfen und ggf. eine Bereitstellung erforderlicher Informationsentitäten zu initiieren. Ebenso sollte das Ökosystem darauf überprüft werden, ob die eigenen Informationsbedarfe ausreichend von den bestehenden Ökosystemrollen gedeckt werden können oder ob weitere Maßnahmen ergriffen werden müssen. Ziel dieses Schrittes ist es, ein vollständiges Systemverständnis zu erhalten, sodass eine zuverlässige Informationsverteilung für die erfolgreiche Umsetzung der Kreislaufstrategien geschaffen werden kann.

Schritt 5 – Initiierung Informationsmodell

Im abschließenden und fünften Schritt wird das rollenspezifische Informationsmodell betrachtet und entsprechend den vorherigen Schritten angepasst. Basierend auf den Assoziationsmatrizen enthält das Informationsmodell einen rollenspezifischen Fokus, um den Aufbau des digitalen Produktpasses zu unterstützen. Abbildung 5-60 fasst das beschriebene Vorgehen zusammen und bietet eine Übersicht der durchzuführenden Schritte zur Anwendung der Erkenntnisse aus diesem Dissertationsvorhaben.

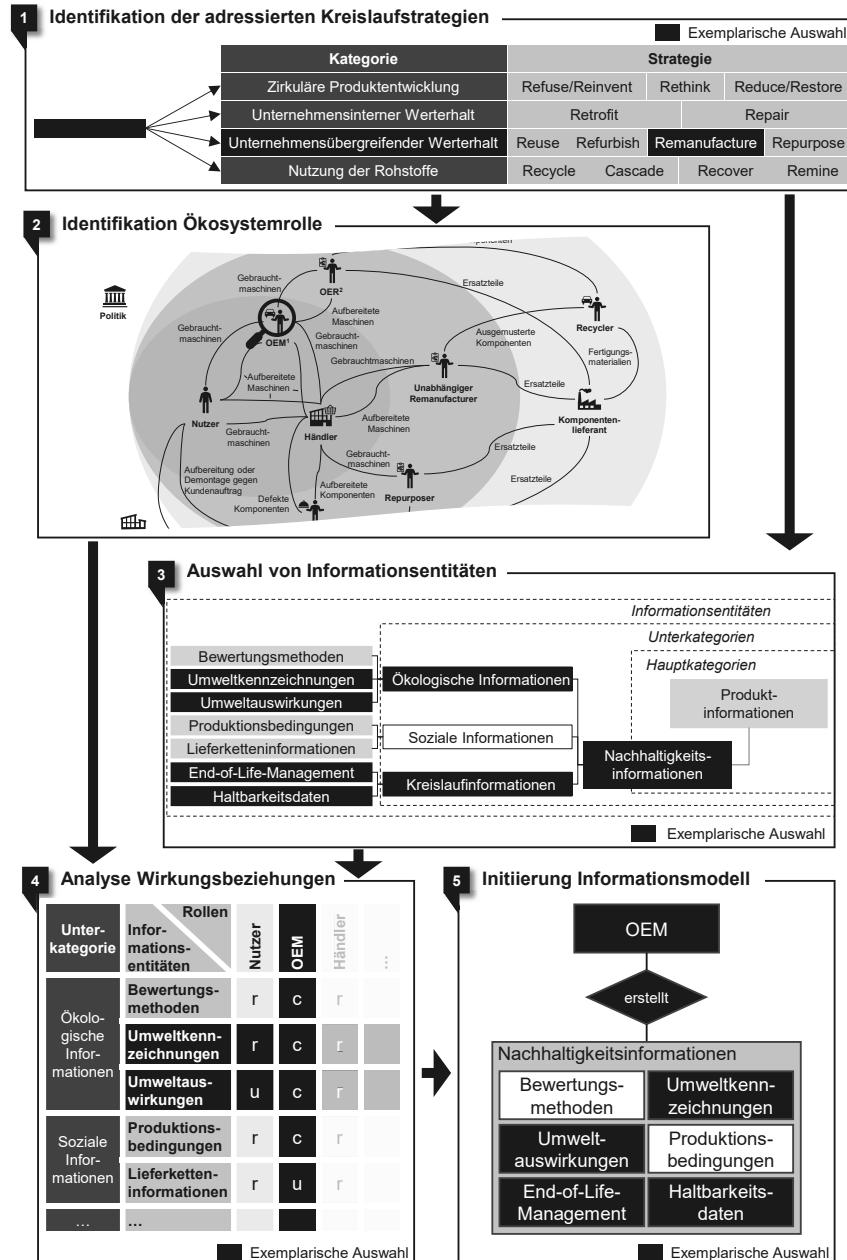


Abbildung 5-60: Vorgehensweise zur Anwendung des Informationsmodells (eigene Darstellung)

Weiterhin gilt es, die identifizierten Informationsentitäten näher zu definieren und mit konkreten Attributen zu versehen, sodass ein vollständiger Produktpass erstellt werden kann. Sobald eine Spezifizierung im Ökosystem stattgefunden hat, ist die konzeptionelle Phase des Produktpasses abgeschlossen und es kann eine Erstellung des Produktpasses initiiert werden. Dazu sollte jede Rolle im Ökosystem ein spezifisches Informationsmodell vorliegen, auf dessen Basis sich der gemeinsame digitale Produktpass erstellen lässt.

5.5.3 Zusammenfassung und Reflexion

Das Ziel der Informationsmodellierung in Unterkapitel 5.5 ist die Erstellung von anwendungsnahen Modellen für Softwareingenieure zur inhaltlichen Gestaltung von digitalen Produktpässen. Dazu werden das Wirkmodell des vorherigen Unterkapitels und die wissenschaftlichen Erkenntnisse aus den vorherigen Kapiteln in einen praktischen Kontext gesetzt und um eine Vorgehensweise zur Anwendung im Unternehmen ergänzt. Aufgrund der unternehmensindividuellen Informationsbereitstellung wurde dazu eine rollenspezifische Modellierung gewählt, sodass unternehmenseigene Softwareingenieure die erforderlichen Informationsentitäten für den digitalen Produktpass bereitstellen können. Daran zeigt sich allerdings eine Divergenz aus technisch möglicher und strategisch beabsichtigter Informationsbereitstellung. Der OEM besitzt eine hohe Informationsdichte, insbesondere im Bereich der statischen Produktinformationen, benötigt jedoch eigene Anreize, um diese Informationen im Ökosystem freizugeben. Darauffolgend wird eine Vorgehensweise zur Anwendung des Informationsmodells vorgeschlagen und näher beschrieben. In diesem fünfphasigen Prozess wird von der Kreislaufstrategie ausgehend ein individuelles Informationsmodell erstellt und bis zur Anwendung finalisiert. Abbildung 5-60 beschreibt dazu die Zusammenfassung der zentralen Vorgehensweise dieser Dissertation in Gänze. Hierbei zeigt sich der theoretisch-konzeptionelle Ansatz dieser Dissertationsschrift, der eine Struktur des digitalen Produktpasses liefert, allerdings Detailfragen offenlässt. Demnach fehlt eine spezifische Ausgestaltung der Informationsentitäten mit konkreten Datenpunkten und Attributen für die vollständige Realisierung eines digitalen Produktpasses. Hier sind Standardisierungsinstitutionen und Betreiber von digitalen Produktpässen gefragt, den erforderlichen Detailgrad zu schaffen. Trotz dieses weiteren Forschungsbedarfs konnte im Informationsmodell die zentrale Fragestellung dieser Dissertationsschrift beantwortet werden:

Wie lassen sich Produktinformationen mit den Rollen für die Umsetzung von Kreislaufstrategien verknüpfen und in einem Informationsmodell zusammenführen?

6 Validierung

Im sechsten Kapitel dieser Dissertationsschrift wird die entwickelte Informationsmodellierung mit Anwendungspartnern aus der Praxis überprüft und validiert. Aus dem Zusammenhang kommend, dass das Ziel der angewandten Wissenschaften nicht die Prüfung von Hypothesen, sondern die praktische Anwendbarkeit von Modellen zur Erbringung eines realen Nutzens darstellt, werden die Ergebnisse dieser Dissertationsschrift mit Experten zur digitalen Kreislaufwirtschaft aus der Industrie diskutiert (s. ULRICH 1981, S. 7). Dazu werden mehrere Rollen des zirkulären Ökosystems ausgewählt und zu Validierungsgesprächen eingeladen. In Abschnitt 6.1 werden zunächst die Vorgehensweise der Validierung und der Verlauf der Fallstudiengespräche vorgestellt. Anschließend werden in Abschnitt 6.2 bis 6.5 vier konkrete Fallstudien aus der Industrie veranschaulicht, in denen die Vorgehensweise zur Anwendung des Informationsmodells (s. Abbildung 5-60) durchlaufen wird. In jeder Fallstudie wird dabei die Situation des digitalen Produktpasses im Unternehmen beleuchtet und im Anschluss anhand einer Rolle sowie eines Partialmodells detailliert besprochen.

6.1 Vorgehensweise der Validierung

Die Unternehmen und Experten, die für die Validierung der Ergebnisse dieser Dissertationsschrift infrage kommen, wurden anhand von zwei wesentlichen Anforderungen ausgewählt: Zum einen müssen mehrere Rollen des zirkulären Ökosystems abgedeckt werden, um auch alternierende Perspektiven zu inkludieren. Zum anderen werden Unternehmen und Ansprechpartner ausgewählt, die bereits ein Grundverständnis des digitalen Produktpasses vorweisen können. Damit wird gewährleistet, dass im Gespräch eine inhaltliche Tiefe geschaffen wird, die es ermöglicht, die Beschreibungs- und Erklärungsmodelle angemessen zu validieren. Somit kommen produzierende und innovative Unternehmen infrage, aus denen die vier folgenden ausgewählt wurden: Schaeffler AG, BMW AG, Reifenhäuser GmbH & Co. KG Maschinenfabrik, Parametric Technology GmbH (PTC). Damit werden die Perspektiven der Experten eines Komponentenlieferanten, eines OEMs aus der Fahrzeugindustrie, eines OEMs aus dem Maschinenbau und eines Softwareunternehmens berücksichtigt. Obwohl das Softwareunternehmen nur indirekt im zirkulären Ökosystem agiert, gilt PTC als Befähiger in der Umsetzung des digitalen Produktpasses. Diese Zusammenstellung innovativer Unternehmen bestätigt den hohen Stellenwert, der der Auswahl der Validierungspartner beigemessen wurde.

Die Validierungsgespräche folgen einer klaren Agenda, die zunächst mit der Vorstellung der Ideenfindung und der Motivation des Themas beginnt. Darin wird auf die fehlenden Informationsdurchgängigkeit im Lebenszyklus von Maschinen hingewiesen und jene mit wissenschaftlichen sowie praktischen Beispielen belegt. Anschließend wird auf die Situation im Unternehmen des Fallbeispiels eingegangen. Dazu wird die strategische Einordnung des digitalen Produktpasses vorgestellt und es werden individuelle Ausgangssituationen sowie Herausforderungen besprochen. Aufgrund der

Aktualität des Themas werden aktuelle politische Initiativen und die strategische, unternehmerische Ausrichtung im Bereich der Nachhaltigkeit eingebracht. Auf dieser Basis wird in die Vorstellung der Dissertationsergebnisse eingestiegen, die zunächst mit einer Präsentation der identifizierten Kreislaufstrategien und deren Anwendung in der Industrie beginnt. Daraufhin wird das zirkuläre Ökosystem für die Kreislaufstrategien des unternehmensübergreifenden Werterhalts präsentiert und anhand seiner Anforderungen diskutiert. Abhängig vom Fokus des Gesprächs wird jeweils ein Modell tiefergehend validiert, wohingegen die restlichen Modelle in ihrer Gesamtheit besprochen werden. Ergänzt um eine Vorstellung der Informationsentitäten des digitalen Produktpasses für Maschinen und Anlagen, wird im Hauptteil das Wirk- und Informationsmodell vorgestellt. Hier werden einzelne Informationsentitäten ausgewählt, um diese detailliert zu besprechen und so eine Validierung des Gesamtmodells zu erhalten.

Das Ziel der Validierungsgespräche ist es, eine Einschätzung treffen zu können, ob die definierten Anforderungen aus Unterkapitel 4.1 auf die entwickelten Modelle dieser Dissertationsschrift zutreffen (s. Abbildung 6-1).

Formale Anforderungen	
Richtigkeit	Sind die entwickelten Modelle formal einwandfrei und widerspruchsfrei gestaltet, sodass Aussagen reproduzierbar und nachprüfbar sind?
Relevanz	Liegen dem Modellierungszweck relevante und real existierende Sachverhalte zugrunde?
Abstraktion	Sind die einzelnen Modelle ausreichend konzeptualisiert und allgemein anwendbar?
Klarheit & Handhabbarkeit	Sind die einzelnen Modelle benutzerfreundlich anzuwenden und die Ergebnisse leicht zu interpretieren?
Wirtschaftlichkeit	Kann der Anwendungsaufwand zur Erreichung des Modellierungszweckes niedrig gehalten werden?
Inhaltliche Anforderungen	
Auswahl von Kreislaufstrategien	Sind die identifizierten Kreislaufstrategien vollständig, praxistauglich und wertstiftend?
Ökosystembeschreibung	Bildet die dargestellte Ökosystembeschreibung die Realität ab und ist nachvollziehbar dargestellt?
Beschreibung Informationsentitäten	Sind die identifizierten Informationsentitäten vollständig, praxistauglich und überschneidungsfrei?
Beschreibung Wirkungsbeziehungen	Wird die Wirkung zwischen Rollen des zirkulären Ökosystems und den klassifizierten Informationsentitäten für die Praxis verständlich erklärt?
Innere Konsistenz	Weisen alle partialen Modelle eine inhaltliche Konsistenz auf?
Visualisierung	Trägt die gewählte Form der Darstellung dazu bei, Sachverhalte übersichtlich und für die Praxis leicht verständlich zu transportieren?
Adaptionsfähigkeit	Sind die partialen Modelle vor dem Hintergrund eines kontinuierlichen technologischen Wandels anpassungsfähig?

Abbildung 6-1: Bewertungslogik für die Validierung der Dissertationsergebnisse (eigene Darstellung)

Aufgrund der Zeitrestriktion kann die Bewertungslogik nicht vollständig diskutiert werden, allerdings werden etwaige Abweichungen aus dem Gespräch durch den Autor

vermerkt. Die vollständige Überprüfung der Anforderungen aus allen Validierungsge- sprächen ist in Unterkapitel 6.6 zu finden.

6.2 Fallbeispiel der Schaeffler AG

Das erste Validierungsgespräch im Rahmen dieser Dissertationsschrift wurde mit zwei Experten der Schaeffler AG geführt. Bei den Experten handelt es sich um den *Subprogram Lead Sustainability & Engagement* sowie den *Product Owner Engineering Design Data*, die aus strategischer und operativer Sicht in die aktuellen Initiativen von Schaeffler zum digitalen Produktpass involviert sind. Damit ist ein hoher und aktueller Kenntnisstand der Gesprächspartner gewährleistet. Das Interview fand im Rahmen eines virtuellen Videotelefonats statt. Zu Beginn der Erstellung der Dissertationsschrift wurde mit einem Experten bereits über die Motivation des digitalen Produktpasses diskutiert, sodass Vorkenntnisse zur thematischen Ausrichtung des Dissertationsvorhabens bestehen. Das Validierungsgespräch begann mit einer Vorstellung der Teilnehmer und der Motivation für die Themenstellung. Darauffolgend wurde über aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen in der Umsetzung eines digitalen Produktpasses bei der Schaeffler AG diskutiert. Anschließend wurden die Modelle der Dissertationsschrift vorgestellt und diskutiert. Fokussiert wurde die Klassifizierung der Informationsentitäten des digitalen Produktpasses. Durch das Expertengespräch war es möglich, die Perspektive des Komponenten- und Systemlieferanten zu integrieren und aus der Praxisperspektive kritischer hinterfragen zu lassen, um eine anwendungsorientierte Validierung zu gewährleisten.

Beschreibung des Anwendungsfeldes

Das Themenfeld des digitalen Produktpasses wird bei der Schaeffler AG seit einigen Jahren in der Nachhaltigkeitsabteilung und im Bereich Digitalisierung interessiert verfolgt. Begleitet wurde die Diskussion allerdings von einer unklaren politischen Situation, die eine erhöhte Unsicherheit bzgl. dedizierter Investitionen in eine eigene Entwicklung des digitalen Produktpasses verursacht hat. Mit Detaillierung der politischen Vorgaben wurden bei Schaeffler die Chancen, die sich durch einen digitalen Produktpass ergeben, erkannt und in die Nachhaltigkeitsstrategie des Unternehmens integriert. Das Ziel ist es, bei Schaeffler die digitalen Voraussetzungen zu schaffen, um zum einen Konformität mit Gesetzen und Regularien zu gewährleisten und zum anderen mögliche neue, digitale Geschäftsmodelle im Kontext der Kreislaufwirtschaft zu unterstützen.

Im Nachhaltigkeitsprogramm unter der Initiative „Green Products“ aufgehängt, werden bei Schaeffler zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Dissertationsschrift die gesetzlichen Rahmenbedingungen evaluiert und die notwendigen Strukturen für den Aufbau von Prototypen zu den vorher genannten Anwendungsfällen geschaffen. Ferner werden Initiativen wie die Berechnung des „*Product Carbon Footprint*“ sowie die Entwicklung von Öko-Design-Ansätzen unter „*Green Products*“ verfolgt. In Abbildung 6-2 ist das vollständige Nachhaltigkeitsprogramm der Schaeffler AG abgebildet, in das sich der digitale Produktpass unter IV einordnen lässt.

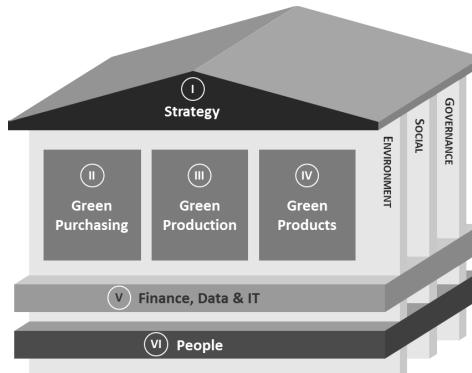


Abbildung 6-2: Strategic framework for the sustainability strategy – Nachhaltigkeitsprogramm Sustainability & Engagement der Schaeffler AG (Schaeffler AG 2023)

Das Programm folgt aus den übergeordneten Nachhaltigkeitszielen der Schaeffler AG und strukturiert Initiativen, Projekte und Maßnahmen, sodass Fachbereichs- und Gruppenstrategien umgesetzt werden können. Im Zuge der Entwicklung des digitalen Produktpasses nutzt Schaeffler die Chance, um möglichst viele Datenpunkte zu vernetzen und die Informationsverfügbarkeit über den gesamten Lebenszyklus zu verbessern. Allerdings ergibt sich die Herausforderung, dass zumeist die Inverkehrbringer der Produkte an den Datenschnittstellen sitzen und die Kontaktpunkte zum Kunden pflegen. Für einen Komponenten- und Systemlieferanten wie Schaeffler ist es daher schwierig, auf die erforderlichen Daten aus der Nutzungsphase zurückzugreifen. Als Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz des digitalen Produktpasses wird von den Experten die Standardisierung, z. B. im Rahmen von Catena-X, genannt, um Datentransparenz und Vertrauen aufzubauen. Dies beschränkt sich nicht nur auf die Verbindung von Kunde zu OEM, sondern auch zwischen OEM und Lieferanten sowie weiteren Sub-Lieferanten.

In der konkreten Entwicklung des digitalen Produktpasses bei Schaeffler werden zunächst Kundenanforderungen aufgenommen und sich die Frage gestellt: „Wo fragen Kunden derzeit schon Datenpunkte ab?“ Daraus werden Anforderungen für unternehmensinterne IT-Systeme abgeleitet, um die Datenverfügbarkeit im Unternehmen sicherstellen zu können. Ein Anwendungsfall, der bei Schaeffler bereits umgesetzt wurde, ist ein QR-Code für Ware im Aftermarket, der zu den wichtigsten Produktinformationen führt und eine Vorstufe des digitalen Produktpasses bildet. In diesem Anwendungsfall hat sich Schaeffler dazu entschieden, den Betrieb der IT-Infrastruktur selbst zu übernehmen. Ein weiteres System ist OPTIME, eine Condition-Monitoring-

Lösung, die den Zustand u. a. von Lagern überwachen kann⁵. Mithilfe solcher Lösungen lässt sich die Datenverfügbarkeit ohne Zwischenkunde sicherstellen, was eine zeitnahe Erreichung der Zielgrößen von Datentransparenz, -bündelung und -durchgängigkeit im Produktlebenszyklus ermöglicht. Ausgehend von dieser Erkenntnis wurde die Diskussion über die im Rahmen des Dissertationsvorhabens entwickelten Modelle fortgeführt.

Darstellung der Ergebnisse

In Anbetracht der vorherigen Diskussion über aktuelle Entwicklungen bei Schaeffler wurde für die Ergebnisdarstellung das Beschreibungsmodell der Informationsklassifizierung als Fokus gewählt. Zunächst wurde die Struktur der Dissertationsschrift vorgestellt und auf die Beschreibungsmodelle der Kreislaufstrategien sowie des zirkulären Ökosystems eingegangen. Zum Abschluss wurden darauffolgend die Wirkungsbeziehungen zwischen den Rollen im zirkulären Ökosystem und den Produktinformationen vorgestellt und im Informationsmodell präsentiert.

Die Struktur der Dissertationsschrift konnte von den Experten als systematisch, logisch und verständlich bestätigt werden. Zunächst wurde mit der Vorstellung der Auswahl der Kreislaufstrategien des unternehmensübergreifenden Werterhalts begonnen. In der Ergebnisvorstellung wurde von den Experten ergänzt, dass, obwohl die Kreislaufstrategie des Recyclings nicht in den Betrachtungsraum einbezogen wurde, diese Kreislaufstrategie für die Praxis trotzdem sehr relevant ist. Sie betonten, dass insbesondere das Zurückführen spezieller Materialien einen motivierenden Faktor für den Einsatz des digitalen Produktpasses darstellt. Im Speziellen zeigen OEM aus der Automobilindustrie ein hohes Interesse am Einsatz des digitalen Produktpasses im Recycling, da ein Remanufacturing oder Refurbishing aus Qualitätsgründen nicht immer verfolgt wird. Die Experten bestätigten, dass in anderen Branchen, in denen Investitionsgüter über einen längeren Zeitraum in Betrieb sind, werterhaltende Kreislaufstrategien wie das Remanufacturing bereits verbreitet sind und der Fokus des Dissertationsvorhabens somit passend gewählt wurde. Beispielhaft wurden die Luft- und Raumfahrt sowie der Schienenverkehr genannt, in denen aufbereitete Lager, die bereits fehlerfrei eine definierte Anzahl an Betriebsstunden absolviert haben, gegenüber neuen Lagern favorisiert werden. Dabei betonten die Experten, dass dies im Automobilbereich gegenläufig gehandhabt wird.

Darauffolgend wurde das Beschreibungsmodell des zirkulären Ökosystems vorgestellt. Von den Experten wurde das Modell als verständlich und als ausgezeichnete Übersicht der Warenströme im Aufbereitungsprozess bestätigt. In der Diskussion wurde allerdings aufgezeigt, dass die Terminologie des OEMs bei Schaeffler in der Automobilindustrie sehr geläufig ist, hier jedoch zu Doppeldeutigkeiten führen kann. Vor dem Hintergrund, dass die Schaeffler AG zudem eine eigene Entität besitzt, die

⁵ Informationen der Unternehmenswebseite entnommen: <https://www.schaeffler.de/de/produkte-und-lösungen/industrie/produktportfolio/instandhaltungsprodukte/optime/> (Link zuletzt geprüft: 03.05.2024)

Komponenten wie Lager eigenständig aufbereitet (ähnlich einem OER), ist auch eine Weiterleitung der Aufbereitungsdienstleistung vom OEM zum Komponentenlieferanten nicht im Modell inkludiert. Aufgrund des Modellfokus auf komplett Maschinen und Anlagen ergab sich eine weitere Komplexitätsebene für die Aufbereitung von Komponenten durch große Systemlieferanten, die durch vergleichbare Strukturen eines OEM zu charakterisieren sind. Diese Komplexität wurde für eine bessere Lesbarkeit und Verständlichkeit nicht in das Beschreibungsmodell integriert, sodass sich der Anwendungsbereich des Ökosystems auf komplett Investitionsgüter beschränkt und für Komponenten nur teilweise anwendbar ist. Überdies können die Experten die Korrektheit des zirkulären Ökosystems bestätigen.

Im Anschluss wurde das zweite Beschreibungsmodell der Klassifizierung von Produktinformationen präsentiert und diskutiert. Der Struktur und dem Inhalt der Informationsklassifizierung wurde von den Experten zugestimmt und es wurde hervorgehoben, dass das Modell auch intern weitergenutzt werden kann. Aus Sicht der Experten sind insbesondere die Materialinformationen ein zentraler Bestandteil, da viele Themen im Bereich der Material-Compliance zeitnah umgesetzt und feingranular betrachtet werden müssen. Hier gilt es, eine Datenbasis zu schaffen, sodass effizient und gesetzeskonform auf Materialverbote reagiert werden kann. Besondere Beachtung fand zudem die Informationsentität des Produktwerts, die entgegen starren und vorgegebenen Produktdaten einen dynamischen Datenpunkt und externe Perspektive für Hersteller integriert. Von den Experten wurde darüber hinaus aufgezeigt, dass Zollinformationen nicht explizit aufgenommen sind, in der Praxis allerdings einen hohen Stellenwert besitzen. In der präsentierten Klassifizierung unter der Informationsentität Dokumentation einzuordnen, sollte die Warengruppennummer zur Tarifberechnung von Zollgebühren betrachtet werden. Abschließend wurden aus der Kategorie der Nachhaltigkeitsinformationen die Umweltkennzeichnungen hervorgehoben. Die Belegbarkeit von „Green Claims“ und erlaubten Werbemöglichkeiten, sodass gesetzeskonform die positiven Umwelteigenschaften präsentiert werden können, stellen eine zusätzliche Motivation des digitalen Produktpasses für die Schaeffler AG dar. Zusammenfassend wurde die Klassifizierung von den Experten als sachlogisch hergeleitet und inhaltlich korrekt bestätigt.

Aufgrund der Zeitbeschränkung des Validierungsgesprächs konnte nur begrenzt auf das Wirkmodell eingegangen werden. Aus der Vorstellung konnten die Experten jedoch die Systematik und logische Folgerung bestätigen. Die Überlegungen wurden zudem als sehr relevant gekennzeichnet. Schlussfolgernd aus dem gesamten Fallstudiengespräch konnten die Experten der Schaeffler AG die Dissertationserkenntnisse als sehr relevant bestätigen. Im Hinblick auf ihre Tätigkeiten im Unternehmen haben sich viele Schnittmengen ergeben, die in die weitere Verfolgung des digitalen Produktpasses einfließen können.

6.3 Fallbeispiel der BMW AG

Das zweite Validierungsgespräch dieses Dissertationsvorhabens wurde mit dem *Project Director Circular Economy Digital* der BMW AG durchgeführt. Als promovierter Experte verantwortet er die Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Projekt „Catena-X“ aus Sicht des deutschen OEMs der Automobilindustrie und weist somit einen hohen Kenntnisstand im Bereich der digitalen Kreislaufwirtschaft auf. Aufgrund der politischen Vorgaben im Zuge des digitalen Batteriepasses nimmt die Automobilindustrie eine Vorreiterrolle ein, die zur Validierung der erarbeiteten Ergebnisse dieser Dissertationsschrift eine hervorragende Ausgangsbasis bildet. Das Gespräch wurde im Winter 2023 in Form eines virtuellen Videotelefonats durchgeführt. Zunächst wurde entlang der Agenda die Motivation der Themenstellung erläutert und die Ausgangssituation geschildert. Anschließend wurde auf die aktuellen Entwicklungen und Herausforderungen der BMW AG und des Catena-X-Konsortiums eingegangen. Ausgehend von den genannten Herausforderungen wurden die Modelle des Dissertationsvorhabens vorgestellt und vor dem Hintergrund der Anwendbarkeit in der Industrie diskutiert. Das Gespräch wurde mit einer abschließenden Einschätzung geschlossen.

Beschreibung des Anwendungsfeldes

Die BMW AG gehört zu den Gründungsmitgliedern der Catena-X-Initiative, die sich zum Ziel gesetzt hat, ein Datenökosystem zur Kollaboration innerhalb der Lieferkette zu entwickeln (s. CATENA-X AUTOMOTIVE NETWORK E. V. 2023, S. 5). Dazu werden End-to-End-Lösungen entwickelt, die einen kontinuierlichen Informationsfluss zwischen allen Wertschöpfungspartnern zulassen und industrieweit skalierbar sind (s. CATENA-X AUTOMOTIVE NETWORK E. V. 2023, S. 4). Neben dem Aufbau eines digitalen Produktpasses werden weitere Anwendungsfälle wie das Verwalten von Stammdaten, die Nachverfolgbarkeit von Bauteilen, die Unterstützung von ESG-Reportings und das Planen von Nachfragekapazitäten verfolgt (s. CATENA-X AUTOMOTIVE NETWORK E. V. 2023, S. 5).

Das Wertversprechen und die Wirkungsweise von Catena-X werden in der folgenden Abbildung 6-3 dargestellt. Zentral ist der digitale Produktpass zur Generierung eines End-to-End-Informationsflusses; allerdings werden auch industrieübergreifende Konnektoren entwickelt, die über die Automobilindustrie hinweg einen Datenaustausch sicherstellen (s. CATENA-X AUTOMOTIVE NETWORK E. V. 2023, S. 7). Zunächst liegt der Fokus der Entwicklung allerdings auf Materialdaten und -flüssen, die mithilfe von Materialkonten auch Zulieferern die Möglichkeit einräumen, ihre Materialien zurückzuerlangen. Zudem sollen eigene Materialmarktplätze den Sekundärmarkt ergänzen und Vorhersagen über die Materialrücklaufquoten eine verbesserte Planbarkeit ermöglichen (s. CATENA-X AUTOMOTIVE NETWORK E. V. 2023, S. 7). Für OEM und Demoneure lassen sich aus den Daten Dashboards kreieren, die bei der Auswahl geeigneter Kreislaufstrategie unterstützen (s. CATENA-X AUTOMOTIVE NETWORK E. V. 2023, S. 7).

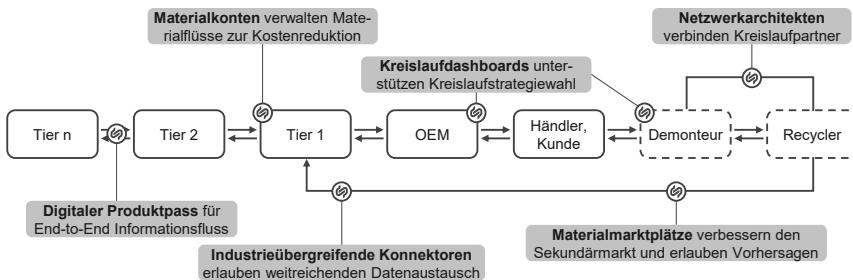


Abbildung 6-3: Beschreibung des Wertversprechens der Catena-X-Initiative (eigene Darstellung i. A. a. CATENA-X AUTOMOTIVE NETWORK E. V. 2023, S. 7)

Im Validierungsgespräch konnte darüber hinaus über den aktuellen Stand der Entwicklungen und Herausforderungen in der Erreichung des Zielbilds diskutiert werden. Eine Herausforderung ergibt sich aus dem Umfang und der Komplexität des Gesamtfahrzeugs, sodass zum derzeitigen Entwicklungsstand (Dezember 2023) komponentenbasierte Produktpässe existieren, die bislang nicht in einem Gesamtfahrzeug aggregiert wurden. Für das Gesamtfahrzeug ergibt sich somit eine noch unvollständige Liste aus Produktpässen, die zentrale Komponenten beschreiben und bis auf die Bauteile heruntergebrochen werden können. So ist es beispielsweise innerhalb des Getriebes bereits möglich, die Daten bis zur Ölwanne aufzuschlüsseln. Die übergreifende Datenstruktur ist dabei so weit standardisiert, dass eine Anpassung für weitere Komponenten nur die Ergänzung oder das Auslassen von einigen Elementen umfasst und anschließend einsatzbereit ist. Die Struktur beinhaltet u. a. Daten über Hersteller, Ausmaße, Identifikation und einen produktspezifischen Teil. Für ähnliche Komponenten wie Getriebe und elektrische Antriebe, die als elektromechanische Komponenten klassifiziert werden können, ist dieser Aufbau vergleichbar. Eine Unterscheidung ergibt sich jedoch für materialbasierte Bauteile wie Dicht- und Klebstoffe, die im Konsortium gemeinsam mit Henkel untersucht werden.

Im Gegensatz zur fokussierten Branche des Maschinen- und Anlagenbaus dieser Dissertationsschrift ist die Herausforderung der Informationsrückführung im Lebenszyklus in der Automobilindustrie weniger ausgeprägt, da bereits eine umfangreiche Fahrzeugkonnektivität besteht. Sobald sich das Fahrzeug in der Nutzungsphase beim Kunden befindet, liefern aktuelle Fahrzeugmodelle über das mobile Datennetz Zustandsdaten wie Ladestatus und Reichweite, sodass Ladezyklen gezählt und in einen digitalen Produktpass übertragen werden können. Auf diese Daten kann der Kunde per App bereits zugreifen. Zudem können über Werkstattbesuche des eigenen BMW-Servicenetzes im Falle einer Reparatur oder eines Austauschs aktuelle Daten gespeichert werden. Der Fall freier Werkstätten wurde bisher nicht überprüft und wäre insbesondere für den sehr fragmentierten Markt des Maschinenbaus im Rahmen dieser Dissertationsschrift von Interesse. Auf technischer Ebene ergibt sich aus dem Status quo auch Weiterentwicklungspotenzial. Am Beispiel der Lichtmaschine lässt sich zeigen, wie eine stärkere Integration der Wertschöpfungspartner Einfluss auf die Kreislaufwirtschaft haben

kann. An Lichtmaschinen beispielsweise wird der Zustand der Kohlebürsten nicht über Sensorik erfasst und der Zulieferer kann a priori keine Aussage darüber treffen, ob ein Refurbishing, Remanufacturing oder Recycling die optimale Kreislaufstrategie darstellt. Weitere Konzepte und Analysen sind daher ausstehend, um festzustellen, welche Potenziale sich aus der Vernetzung durch einen digitalen Produktpass noch ergeben. Auf Basis der Einführung zum Status quo der Catena-X-Initiative wurde in die Vorstellung und Diskussion der Dissertationsergebnisse übergegangen.

Darstellung der Ergebnisse

Für die Diskussion der Ergebnisse wurde aufgrund des begrenzten Zeitrahmens und der Vorreiterrolle der Catena-X-Initiative kein Fokus auf ein spezifisches Modell gelegt, sodass Freiraum für konstruktive Weiterentwicklungsmöglichkeiten und alternative Vorgehensweisen gegeben wurde. Zunächst wurden die Beschreibungsmodelle und deren Herleitung präsentiert, um anschließend auf das Wirkmodell und das Informationsmodell einzugehen.

Die Herleitung der Kreislaufstrategien wurde vom Experten sehr positiv bewertet und als nachvollziehbar gelobt. Die Ergebnisse geben nach seiner Einschätzung den aktuellen Erkenntnisstand optimal wieder. Dass der Fokus auf die Kreislaufstrategien des unternehmensübergreifenden Werterhalts gelegt wurde, konnte zudem nachvollzogen werden. Darauffolgend wurde das zirkuläre Ökosystem im Maschinen- und Anlagenbau vorgestellt. Die Beschreibung des Ökosystems konnte vom Experten wie abgebildet bestätigt werden. Als Beispiel nennt er die existierende OER-Abteilung der BMW AG, die Verbrennungsmotoren aufbereitet, obwohl dieses Geschäftsmodell von der BMW AG nicht weitergeführt wird. Ebenso wie im Validierungsgespräch von Schaeffler wird die Option erwähnt, dass Komponentenlieferanten die Aufbereitung ihrer Bauteile übernehmen. Demnach werden Getriebe bspw. von ZF oder unabhängigen Remanufacturern aufbereitet und für den Sekundärmarkt zur Verfügung gestellt. Der Experte hob hervor, dass das vorgestellte Vorgehen im Automobilmarkt bereits langjährig üblich sei, allerdings bislang nicht vor dem Hintergrund der Kreislaufwirtschaft betrachtet werde. Es gebe einen funktionierenden und aktiven Gebrauchtmarkt und die Verfügbarkeit von aufbereiteten Bauteilen sei sehr hoch.

Anschließend wurde auf das dritte Beschreibungsmodell der Informationsklassifizierung eingegangen. Die Strukturierung wurde vom Experten als sehr logisch bestätigt. Er wies jedoch darauf hin, dass der Umfang enorm sei und für die Informationsentitäten noch weitere Detailebenen zu definieren seien. Auch wenn die Klassifizierung Unterschiede gegenüber der gewählten Gruppierung im Catena-X-Konsortium aufweist, sind seiner Einschätzung nach die relevanten Informationsentitäten enthalten. Einen besonderen Fokus legte er dabei auf die Informationsentität der Demontage. Eine große Herausforderung in der Automobilindustrie seien die Industrialisierung und Automatisierung des Demontageprozesses von Altfahrzeugen, da diese Prozesse derzeit manuell und erfahrungsbasiert durchgeführt würden. Für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft müsse eine Vielzahl an Fahrzeugen in kurzer Zeit verarbeitet werden. Dafür sei eine umfangreiche Informationsbasis unabdingbar. Im Gespräch hat sich

gezeigt, dass zum einen offen ist, welche Informationen einem Demonteur zur Verfügung gestellt werden, damit Roboter die korrekten Demontageschritte ausführen und die Demontage zum anderen von kleinen Familienbetrieben durchgeführt wird, die keine finanziellen Möglichkeiten zur Prozessautomatisierung besitzen. Für die Demontageprozesse und das umsetzende Ökosystem werden daher in Zukunft weitere wissenschaftliche Arbeiten benötigt. Hervorgehoben wurde darüber hinaus die Informationsentität der Bewertungsmethode. Demnach seien bisher nicht alle Berechnungsprozesse standardisiert, sodass in einem digitalen Produktpass die allgemeine Berechnungsmethodik hinterlegt werden müsse. Als Beispiel nannte der Experte den *State of Health* einer Traktionsbatterie, für den es zum Stand der Erstellung dieser Dissertationsschrift noch keine einheitliche Berechnungsvorschrift gibt, sodass sich die Berechnung zwischen den OEM noch erheblich unterscheiden. Für einen einheitlichen und vergleichbaren digitalen Produktpass sollten daher die gleichen Berechnungsmethoden angewendet werden, sodass die gespeicherten Werte stets nachvollziehbar sind. Im Rahmen dieser Dissertationsschrift wurde diese Informationsentität bisher in den Nachhaltigkeitsinformationen eingeordnet, erhält dadurch aber übergreifende Relevanz.

Im Anschluss wurde das Wirkmodell präsentiert, dessen Validierung aufgrund der Komplexität und begrenzten Zeit nicht mehr ausreichend darstellbar war, aber als Erkenntnisgewinn gelobt wurde. Zusammenfassend wurde die Arbeit aufgrund ihrer strukturierten Vorgehensweise und Nachvollziehbarkeit gelobt und als relevant für seine Tätigkeit innerhalb der BMW AG eingestuft.

6.4 Fallbeispiel der Reifenhäuser GmbH & Co. KG Maschinenfabrik

Für die Rolle des Maschinenherstellers wurde ein Validierungsgespräch mit dem *Direktor* von R-Cycle der Reifenhäuser GmbH & Co. KG Maschinenfabrik durchgeführt. R-Cycle entwickelt einen digitalen Produktpass für die Verpackungsindustrie, der Daten aus den Verarbeitungsmaschinen, z. B. Extrusions- oder Druckanlagen, integriert und über den Lebenszyklus einer Verpackung Materialdaten und weitere Informationen zur Verfügung stellt. Als promovierter Ingenieur hat der Experte den Aufbau dieser Einheit verantwortet und verfügt über einen hohen Kenntnisstand in der Entwicklung von digitalen Produktpässen. Verbunden mit der Expertise in der Entwicklung und Herstellung von Produktionsmaschinen wurden die Voraussetzungen zur Validierung der Ergebnisse dieser Dissertationsschrift vollumfänglich abgedeckt. Das Gespräch wurde im Winter 2023 in Form eines virtuellen Telefonats geführt. Zunächst wurden die Rahmenbedingungen des Validierungsgesprächs und der Dissertationsschrift erläutert und die Motivation vorgestellt. Darauffolgend wurden aktuelle Entwicklungen von R-Cycle vorgestellt und ein Transfer der Logik auf den Maschinenbau diskutiert. Anschließend wurden die Modelle des Dissertationsvorhabens präsentiert, diskutiert und validiert, sodass zum Abschluss eine Aussage zur Anwendung der Dissertationsergebnisse in der Praxis abgegeben werden konnte.

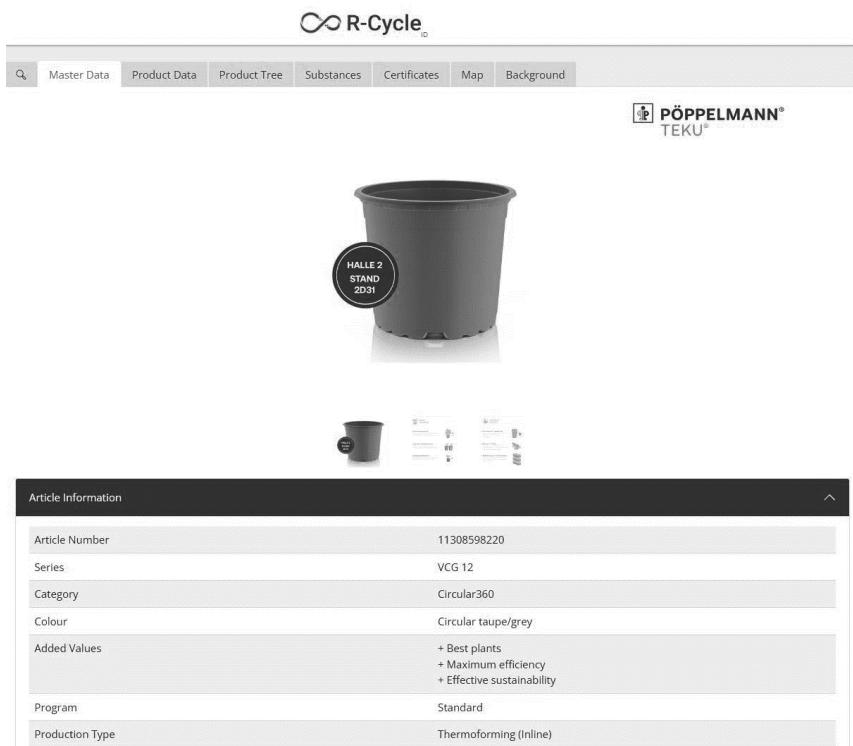
Beschreibung des Anwendungsfeldes

Die Reifenhäuser Maschinenfabrik hat bereits sehr früh erkannt, dass der Datenverlust zwischen Produktion, Nutzung und Verwertung von Kunststoffen eine Herausforderung darstellt, die es für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft in der Verpackungsindustrie zu lösen gilt. Allerdings agiert im Ökosystem der Verpackungsindustrie eine Vielzahl von Akteuren mit teilweise gegensätzlichen Interessen. Da diese Herausforderung nicht alleine gelöst werden kann, hat Reifenhäuser mit R-Cycle eine Community aus verschiedenen Technologieunternehmen aus dem gesamten Lebenszyklus von Kunststoffprodukten und Verpackungen gegründet, die gemeinsam und branchenübergreifend mit der GS1 Germany an einem offenen Standard zur Rückverfolgbarkeit von Kunststoffen arbeitet⁶. In der Weiterentwicklung des Standards wird auch mit dem FIR an der RWTH Aachen im Forschungsprojekt COPPA zusammengearbeitet, indem eine digitale Plattform für Kunststoffzyklate entwickelt wird. Das FIR an der RWTH Aachen führt im Rahmen des Projekts dazu eine umfangreiche Ökosystemanalyse in der Verpackungsindustrie durch. R-Cycle besitzt dagegen einen Prototyp des digitalen Produktpasses, auf den im Projekt aufgebaut werden kann.

In Form eines reduzierten digitalen Produktpasses werden dazu Daten aus kunststoffverarbeitenden Produktionsanlagen gespeichert, sodass Informationen im Lebenszyklus für Recyclingprozesse oder für Konsumenten nutzbar gemacht werden können. Der digitale Produktpass besteht aus drei Kernelementen: einem *Identifier*, einem *Marker* und den Daten selbst. In Kooperation mit der GS1, einer neutralen Plattform zum Austausch und zur Kollaboration von Unternehmen, wurde ein offener Standard, die Circular Plastics Traceability Guideline, entwickelt. Dieser Standard beschreibt die Datenpunkte und recycling-relevanten Attribute im Wertschöpfungsnetzwerk von Verpackungen. In Verbindung mit der etablierten GTIN (Global Trade Item Number) einem *Global Unique Identifier* (Identifikationsnummer, mit der Handelseinheiten ausgezeichnet werden) und deren Varianten, wie der LGTIN (Lot Global Trade Item Number), ist die eindeutige Zuordnung dieser Informationen zu einem Batch möglich. Dadurch lässt sich eine individuelle Verpackung einem digitalen Produktpass zuordnen, der u. a. Informationen zu Batch, Material und Herstellung bereithält. In Bezug auf das Schließen der Wertschöpfungskreisläufe stellt sich mit Blick auf die klassischen Verpackungswertstoffe eine besondere Herausforderung aufgrund schneller Verarbeitungsgeschwindigkeiten und hoher Durchsätze im Sortierprozess des Leichtverpackungsrecyclings dar: das Auslesen des *Identifiers*. Der Identifier muss über eine geeignete Markierung (*Marker*) auf dem Produkt aufgebracht werden, damit dieser im Sortierprozess erkannt werden kann. R-Cycle ist agnostisch hinsichtlich der Markierungstechnologien und arbeitet daher in mehreren Projekten mit unterschiedlichen Markierungstechnologien. So arbeitet R-Cycle u. a. eng mit der „Digital Watermarks Initiative HolyGrail 2.0“ zusammen, um deren Wasserzeichen-Technologie mit den

⁶ Informationen von der Unternehmenswebseite aus dem Absatz „Was ist die R-Cycle Community?“ und aus dem Gespräch entnommen: <https://www.r-cycle.org/> (Link zuletzt geprüft: 03.05.2024)

entsprechenden Verpackungsdaten anzureichern und dadurch eine automatisierte Sortierbarkeit zu ermöglichen. Die *Digital Watermarks* sind auf der Verpackung integrierte Wasserzeichen, die für das menschliche Auge nicht zu erkennen sind, von entsprechenden Kameras aber mühelos und in hoher Geschwindigkeit aufgelöst werden können. Inhaltlich konzentriert sich R-Cycle in ihrem digitalen Produktpass auf Materialdaten, die für Unternehmen und Konsumenten entlang des Verpackungskreislaufs erforderliche Daten zu Material, Herkunft und Qualität bereithalten, um den Inverkehrbringen die relevanten Informationen für erforderliche Reportings (z. B. Recyclingfähigkeit, EPR-Gebühren, Steuern etc.) bereitzustellen, aber auch um Kauf- und Verwertungsentscheidungen treffen zu können. Erste Prototypen wurden inzwischen entwickelt und sind u. a. in Supermärkten in Dubai zu finden. Abbildung 6-4 zeigt einen Screenshot aus der prototypischen Umsetzung des Standards mit dem Kunststoffunternehmen Pöppelmann, das den digitalen Produktpass für einen Pflanzentopf erstellt hat. Zu erkennen sind die verschiedenen Reiter zu Stammdaten, Produktdaten, aber auch Zertifikaten und einem Produktbaum. Unter den Stammdaten finden sich allgemeine Artikelinformationen zur Artikelnummer, Produktserie, Farbe sowie des Produktionsprozesses.



The screenshot shows a digital interface for a product passport. At the top, there is a navigation bar with tabs: 'Master Data' (selected), 'Product Data', 'Product Tree', 'Substances', 'Certificates', 'Map', and 'Background'. Below the navigation bar is the PÖPPELMANN TEKU logo. The main content area features a large image of a dark grey plastic pot with a circular label that reads 'HALLE 2 STAND 2D31'. Below the main image are three smaller images: a close-up of the pot, a technical drawing of the pot, and a document icon. The bottom section is a table titled 'Article Information' with the following data:

Article Information	
Article Number	11308598220
Series	VCG 12
Category	Circular360
Colour	Circular taupe/grey
Added Values	+ Best plants + Maximum efficiency + Effective sustainability
Program	Standard
Production Type	Thermoforming (Inline)

Abbildung 6-4: Screenshot des digitalen Materialpasses der R-Cycle-Initiative⁷

Auch wenn die Verfolgbarkeit von Kunststoffen politisch eine höhere Relevanz besitzt, beschäftigt sich die Reifenhäuser Maschinenfabrik darüber hinaus mit einem digitalen Produktpass ihrer Produktionsanlagen. Dazu ist ein Perspektivwechsel vom in der Maschine produzierten Produkt hin zur Maschine selbst erforderlich. Ähnlich zur Entwicklung innerhalb von R-Cycle stehen Maschinenhersteller vor der Herausforderung, einen Standard zu kreieren, um eine Anwendbarkeit entlang des Lebenszyklus zu schaffen. Dazu wurden im Validierungsgespräch zunächst zu klärende Fragen aufgebracht. Darunter fiel u. a., welche Beschreibungen genutzt werden, welches Vokabular übergreifend einsetzbar ist, welche Strukturen und Einheiten angewandt werden, wie hoch die Granularität definiert und wie das unternehmenseigene Wissen geschützt werden kann. Im Ersatzteilgeschäft sind die Herausforderungen eines digitalen Produktpasses ersichtlich. Als ertragreicher Service des Maschinenherstellers werden Komponenten von White-Label-Lieferanten verkauft, deren Herkunft für den Endkunden vielfach nicht

⁷ Abbildung aus LinkedIn entnommen: https://www.linkedin.com/posts/r-cycle_plastic-digitalproduct-passport-digitalization-activity-7155465921061351424-VhY2 (Link zuletzt geprüft: 03.05.2024)

erkenntlich ist. Eine gewisse Intransparenz ist damit vorteilhaft für den Maschinenhersteller, was der Einführung eines umfänglichen Produktpasses entgegensteht. In einer Wertschöpfungskette aus Kunden-Lieferanten-Beziehungen gilt es aufgrund der ungleichen Machtverhältnisse, ein Transparenzniveau zu erreichen, das im Sinne der Kreislaufwirtschaft Potenziale eröffnet, ohne Geschäftsgeheimnisse offenzulegen oder vorhandene Geschäftsmodelle zu kannibalisieren. Dazu kann bereits auf die Erfahrungen aus R-Cycle aufgebaut werden. In der Wertschöpfungskette ist daher ein hoher Abstimmungsbedarf mit den involvierten Akteuren erforderlich, um relevante Datenpunkte zu identifizieren, ohne zu umfangreich zu werden. So wurde im Rahmen von R-Cycle festgestellt, dass ein Kunde anhand bestimmter Datenpunkte den Herstellungspreis der vorgelagerten Kette ziemlich genau nachrechnen kann und somit eine ungleiche Transparenz geschaffen wird. Die identifizierten Datenpunkte wurden anschließend wieder ausgegliedert, allerdings gilt es in der Standardentwicklung, eine geeignete Datenbasis zu entwickeln. Aufgrund der hohen Komplexität einer Produktionsanlage im Gegensatz zu einer Kunststoffverpackung wird der Standardisierungsaufwand enorm eingeschätzt und muss aus Sicht des Experten geklärt werden, bevor ein mittelständisches Unternehmen Entwicklungsrisiken eingeht. Zudem ist für den Experten zusätzliche Forschungs- und Entwicklungsarbeit in der Ausarbeitung eines umfangreichen Anforderungskatalogs notwendig, um einfache und aufwändige Anwendungsfälle mit einem Standard abdecken zu können. Darunter fällt auch die erforderliche Datenqualität und -verfügbarkeit, die bereits ein mittelständischer Maschinenhersteller für einen digitalen Produktpass bereitstellen muss. Aus Sicht des Experten kann dies für eine Vielzahl von Unternehmen eine Herausforderung darstellen. Insbesondere im Sondermaschinenbau seien die hergestellten Produktionsmaschinen vorwiegend Unikate oder modular aufgebaut, die auch kurz vor Auslieferung noch Änderungen erfahren könnten. Eine durchgängige, digitale Akte sei daher selbst beim Maschinenhersteller nicht immer gegeben. Die Einführung eines digitalen Produktpasses wäre somit ein Digitalisierungsprojekt für kleine und mittlere Unternehmen, für das zusätzliche Ressourcen zur Verfügung stehen müsste. Neben den genannten Herausforderungen ergäbe sich im Servicegeschäft zusätzliches Potenzial durch den Einsatz eines digitalen Produktpasses. Die Möglichkeit, direkt Kontakt mit dem Hersteller aufzunehmen und Kenntnisse über die individuelle Maschine zur Verfügung zu haben, könnte auch im Ersatzteilgeschäft die Reaktionszeiten verringern und die Kundenbindung erhöhen. Dies wurde von der Reifenhäuser Maschinenfabrik erkannt und konnte im Validierungsgespräch mit der Schaeffler AG bestätigt werden.

Zusammengefasst besitzt die Reifenhäuser Maschinenfabrik bereits weitreichende Erfahrung in der Entwicklung eines digitalen Produktpasses für die hergestellten Produkte ihrer Produktionsmaschinen. Im Transfer dieser Erkenntnisse auf ihre Extrusionsanlagen stehen sie allerdings vor den Herausforderungen der fehlenden Standardisierung, des fehlenden Digitalisierungsgrads vieler Unternehmen sowie eines fehlenden Anforderungskatalogs für die Anwendungsfälle des digitalen Produktpasses.

Darstellung der Ergebnisse

Im Anschluss wurden zur Diskussion der Dissertationserkenntnisse die Beschreibungs- und Wirkmodelle vorgestellt. Zunächst umfasste die Vorstellung die Auswahl von Kreislaufstrategien, bevor auf das zirkuläre Ökosystem und die Informationsklassifizierung eingegangen wurde. In diesem Validierungsgespräch wurde das zirkuläre Ökosystem fokussiert und ausführlich validiert, um das Erfahrungswissen aus der Perspektive eines Maschinenherstellers einfließen zu lassen.

Aufgrund der Vorerfahrungen von R-Cycle sind die Kreislaufstrategien und deren wissenschaftliche Definitionen dem Experten sehr gut bekannt. Der Trennung der Kreislaufstrategien in unternehmensinternen und unternehmensübergreifenden Werterhalt wurde vor dem Hintergrund der Forschungsfrage als sehr passend und verständlich zugestimmt. Es wurde darauf hingewiesen, dass ein Eigentümerwechsel allerdings keine Voraussetzung für einen unternehmensübergreifenden Werterhalt darstelle und ein Remanufacturing auch an vorhandenen Anlagen vor Ort durchgeführt werden können. Im Anlagenbau von immobilen Produktionsmaschinen sei dies stärker verbreitet als das Remanufacturing von Komponenten und mobilen Maschinen. In den Fallstudien hat sich jedoch gezeigt, dass für mobile Produktgruppen ein Austausch gegen bereits aufbereitete Produkte durchgeführt wird. Dieser Fall konnte vom Experten ebenso bestätigt werden.

Anschließend wurde das zirkuläre Ökosystem durch den Autor dieser Dissertationschrift präsentiert. Vom Gesprächspartner wurde zunächst erwähnt, dass die Reifenhäuser Maschinenfabrik nicht im Gebrauchsmarkt für Komponenten aktiv ist. Allerdings werden zentrale Komponenten innerbetrieblich gefertigt und auf dem Sekundärmarkt angeboten. Die Aufbereitung von Komponenten fiel bei der Reifenhäuser Maschinenfabrik als klassische Serviceleistung ursprünglich nicht in den Bereich der Kreislaufwirtschaft, wird aber angeboten. Die Rolle des OERs konnte daher im Beschreibungsmodell des zirkulären Ökosystems als relevant bestätigt werden. Für komplexe Produktionsanlagen gab es früher eine eigenständige Abteilung, die gebrauchte Anlagen aufbereitet und gehandelt hat. Aufgrund des hohen Wissensstands, der für die Aufbereitung und den Weiterverkauf der Produktionsanlagen erforderlich ist, hat sich daraus allerdings ein eigenständiger Maschinenbauer entwickelt, der ein sehr spezielles Produktsegment bedient. Das Gebrauchtmachinengeschäft wurde anschließend nicht weiter verfolgt. Daran zeigt sich, dass auch mittelständische Unternehmen in der Aufbereitung und dem Weiterverkauf von Produktionsanlagen ein valides Geschäftsmodell etablieren können, das in seiner Attraktivität dem Neuanlagengeschäft allerdings noch unterliegt. Das Gebrauchtanlagengeschäft wird inzwischen nicht mehr vom OEM selbst, sondern von externen Unternehmen bedient. In diesem Zusammenhang wurde betont, dass insbesondere eine Unterscheidung zwischen mobilen Maschinen wie Werkzeugmaschinen und komplexen Produktionsanlagen wie Extrusionsanlagen getroffen werden müsse. Während Werkzeugmaschinen mobil auf dem Gebrauchsmarkt gehandelt werden können, ist der Weiterverkauf von großen Produktionsanlagen sehr umfangreich und mit entsprechenden Kosten verbunden. Für Produktionsanlagen ist daher das Servicegeschäft der Instandhaltung und des Retrofits relevanter, die

allerdings im aufgezeigten Ökosystem nicht fokussiert werden. Speziell bei Lebensdauern über 30 Jahre wäre eine gewisse Innovations- und Upgradefähigkeit erforderlich, um aktuelle Produkte überhaupt herstellen zu können. Vor diesem Hintergrund sieht der Experte zusätzliches Potenzial zur Erstellung eines digitalen Produktpasses, um effizient die ausgelieferte und aktualisierte Anlagenkonfiguration bestimmen zu können. In der Praxis seien zwar finale Skizzen und Pläne verfügbar, allerdings würden diese oftmals kurz vor Auslieferung noch verändert und digital nicht immer nachgefasst, sodass ein nicht aktueller Informationsstand entstünde. Das digitale Abbild würde bisher nicht flächendeckend benötigt, sodass eine aufwandsoptimierte Informationssicherung gelebt wird. Neben der Rolle des OERs wird vom Experten die Rolle des Händlers und Intermediärs bekräftigt. Hauptsächlich weltweit wird mit lokalen Agenten gearbeitet, die auf Provisionsbasis das Portfolio der Reifenhäuser Maschinenfabrik kennen und anbieten. Leider konnte nicht bestimmt werden, welche Rolle sie für Gebrauchsanlagen einnehmen.

Darauffolgend wurde auf das Beschreibungsmodell der Informationsklassifizierung eingegangen. In der Vorstellung der Hauptkategorien wurde vom Gesprächspartner hervorgehoben, dass die Unterteilung in statische und dynamische Informationen eine sehr gute Entscheidung darstellt. Für den Materialpass von R-Cycle wird derzeit evaluiert, welche dynamischen Daten integriert und welche Anwendungsfälle dadurch ermöglicht würden. Es wurde bestätigt, dass aus technischer Perspektive sehr viele Datenpunkte gespeichert werden können, allerdings die Anwendungsfälle und deren Nutzen trotzdem unklar bleiben. Positiv herausgestellt wurde zudem die Integration von Informationssentitäten, die über die technischen Maschinendaten hinausgehen. Darunter fallen speziell die Informationssentitäten Listenpreise und Produktwerte. Einschränkend im Marktsegment der Reifenhäuser Maschinenfabrik wirkt sich aus, dass in der Regel keine Listenpreise zur Verfügung stünden, sondern nur Indikationen. Diese werden bspw. anhand der Konfiguration bestimmt. Vom Experten wird bestätigt, dass solche Werte im gesamten Ökosystem allerdings sehr hilfreich wären. Aus der Sicht des Experten ist zudem wichtig, die notwendige Flexibilität in der Auswahl von Informationssentitäten zu wahren. Demnach würde für R-Cycle der Inhalt des Produktpasses mit jedem Akteur des Ökosystems auf Basis des definierten Standards festgelegt, wobei sich im Wesentlichen an den gegebenen Standards orientiert wird. Dadurch werde initiales Vertrauen geschaffen und ermöglicht, sicherheitskritische Daten auszusparen sowie individualisierte Lösungen anbieten zu können. Aus Sicht des Experten fordert die Kundschaft von digitalen Produktpässen Flexibilität ein, solange noch keine finalen Regularien vom Gesetzgeber vorgegeben werden.

Aufgrund der eingeschränkten Zeit wurden nur die Herleitung und der Aufbau des Wirkmodells diskutiert. Dieses wurde als gut strukturiert und nachvollziehbar bewertet. Im umfassenden Kontext konnten die Modelle dieser Dissertationsschrift formal wie auch inhaltlich verifiziert werden und wurden vom Experten für Unternehmen als sehr hilfreich eingeschätzt, die sich neu in dem Themenfeld bewegen. Aus Sicht des Experten können insbesondere Kernfragen zum eigenen Startpunkt, zum Inhalt des digitalen Produktpasses und zu potenziellen Anwendungsfällen im Maschinenbau durch

die Ergebnisse dieses Dissertationsvorhabens beantwortet werden. In Summe wurden die Ergebnisse der Dissertationsschrift für sehr gut befunden.

6.5 Fallbeispiel der Parametric Technology GmbH

Außerhalb der identifizierten Rollen des zirkulären Ökosystems befassen sich auch Systemhäuser und industrieorientierte Softwareunternehmen mit der Entwicklung eines digitalen Produktpasses. Um diese Perspektive zu ergänzen und die Ergebnisse dieser Dissertationsschrift aus einer informationstechnischen Sicht validieren zu lassen, wurde das letzte Gespräch mit dem *Head of Industrial Experience* der Parametric Technology GmbH (PTC) geführt. Im Bereich *Customer Strategy Development* entwickelt die Einheit in Aachen kundenzentrierte Lösungen für produzierende Unternehmen und hat bereits Kunden, die ähnliche Systeme eines digitalen Produktpasses implementiert haben. Der Experte kann somit als innovativer Thementräger charakterisiert werden und gewährleistet einen hohen Kenntnisstand im Bereich der industriellen Datennutzung. Das Interview fand im Rahmen eines virtuellen Videotelefonats im Dezember 2023 statt. Vor einer Darstellung der Dissertationsergebnisse wurde zunächst eine Vorstellung der Teilnehmenden durchgeführt sowie der Entwicklungsstand des digitalen Produktpasses bei PTC diskutiert. Die Agenda des weiterführenden Terms entsprach dem Aufbau der Dissertationsschrift mit dem Fokus auf der Anwendbarkeit der Informationsklassifizierung und des Wirkmodells. Insbesondere die Umsetzbarkeit der Erkenntnisse für Softwareunternehmen wurde abgefragt und validiert.

Beschreibung des Anwendungsfeldes

PTC ist ein Technologie- und Softwareunternehmen, das Industrieunternehmen darin unterstützt, ihre Produkte, Abläufe und Mitarbeiter in der digitalen Transformation zu begleiten⁸. Das Portfolio von PTC umfasst CAD-, ALM-, PLM-, IoT-, SLM- und AR-Systeme, sodass der gesamte Produktlebenszyklus digital abdeckt werden kann⁸. Speziell PLM-Systeme gelten als Ausgangsbasis der Datengrundlage eines digitalen Produktpasses, werden in der Praxis allerdings bisher nicht dafür verwendet (vgl. Unterkapitel 2.3.2). Im Validierungsgespräch wurde zunächst die Relevanz des Themas bestätigt, da aus Sicht des Experten in Zukunft fast jedes Industrieunternehmen eine Art digitalen Produktpass benötigen wird oder bereits in anderer Form besitzt. Allerdings unterscheiden sich die Motivationen zwischen den verschiedenen Branchen. Demnach sieht ein Maschinenbauer Potenzial im After-Sales-Bereich, wohingegen ein Automobilhersteller regulatorisch dazu gezwungen wird und den Produktpass in der Kommunikation mit dem Kraftfahrtbundesamt nutzen möchte. Die Bedeutung des digitalen Produktpasses ist auch am Beispiel eines digitalen Retrofits einer Maschine in der Demonstrationsfabrik Aachen deutlich erkennbar. Zunächst hat es drei Monate Zeit in Anspruch genommen, um eine technische Zuordnung der Maschine machen zu

⁸ Informationen wurden der Webseite des Unternehmens entnommen: <https://www.ptc.com/de/about> (Link zuletzt geprüft: 03.05.2024)

können und anschließend weitere drei Monate, um die Konfiguration festzustellen. Nach sechs Monaten wurde ein sehr hohes Angebot gestellt, weil die Konfiguration nur ungenau bestimmt werden konnte. Vorsichtshalber wurde daher ein Preis zur sicheren Seite abgeschätzt. Daraus wird ersichtlich, dass ohne vorhandene Informationsbasis Kreislaufstrategien nicht effizient umgesetzt werden können.

Aus der Erfahrung des PTC-Experten wird der digitale Produktpass für das Remanufacturing in vier Branchen relevant: (1) Aerospace und Verteidigung, (2) Automobilbau, (3) Elektronik und Hightech, (4) Maschinen- und Anlagenbau. Im Aerospace- und Defense-Sektor ist der zentrale Zweck eines digitalen Produktpasses die Dokumentation des Nachweises korrekt ausgeführter Prozessschritte. Allerdings werden in der Branche jeweils eigene Standards von OEM, Zuliefern und Serviceunternehmen genutzt. Demnach dokumentiert bspw. ein Airbus die Herstellung eines Flugzeugs in einer unterschiedlichen Art und Weise als eine Lufthansa Technik, die die Instandhaltung und das Remanufacturing durchführt. Dem Experten ist zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Dissertationsschrift kein Informationsfluss zwischen den Systemen bekannt. In der zweiten Industrie des Automobilbaus sind selbstgeschriebene Systeme im Einsatz, die den Herstellungsprozess dokumentieren. In Verbindung mit kommerziellen Systemen liegt die Herausforderung darin, ausreichend Schnittstellen zu programmieren und trotzdem immer aktuelle Systeme in Betrieb zu haben. Laut dem Gesprächspartner besteht eine Hauptaufgabe der IT-Abteilungen großer OEM aus dem Automobilsektor in der Pflege und Instandhaltung der IT-Landschaft, deren Aufwand mithilfe eines standardisierten Produktpasses reduziert werden könnte. Eine Verbindung dieser Datenquellen zu Servicevorgängen im Betrieb befindlicher Fahrzeuge besteht bisher ebenso wenig, sodass ohne digitalen Produktpass zwei getrennte Systeme existieren. Als positives Beispiel wird vom Experten die Next.e.GO Mobile SE genannt, die aufgrund ihres Startup-Charakters die Möglichkeit besaß, „auf einer grünen Wiese“ zu starten und eine vollständige Vernetzung initial zu berücksichtigen. Die dritte Branche der Elektronik und Hightech besteht aus Lieferanten, die u. a. Halbleiterchips oder Platinen herstellen und an zahlreiche Industrien liefern, oder aus Herstellern von Haushaltsgeräten wie weißer Ware. In dieser Branche ist die Motivation eines digitalen Produktpasses politisch und regulatorisch induziert, da sie direkt Endkonsumenten beliefern. Obwohl die Entwicklung im Vergleich bisher nicht so fortgeschritten erscheint, wird mit einer baldigen Investitionsbereitschaft gerechnet. In der vierten Branche des Maschinenbaus ist die Motivation zur Einführung eines digitalen Produktpasses insbesondere durch das After-Sales-Geschäft getrieben. Das Potenzial, eine effektivere und schnellere Instandhaltung direkt vom Hersteller anbieten zu können, bietet noch ein Differenzierungsmerkmal zur stärkeren Kundenbindung.

In den vier Branchen gibt es allerdings die gemeinsame Herausforderung, dass eine Bestandswelt besteht, die integriert werden muss. Vornehmlich Investitionsgüter mit langer Lebensdauer von mehr als 25 Jahren stellen dabei eine zusätzliche Herausforderung dar. Obwohl ein Großteil der Informationen in den unterschiedlichen Systemen vorhanden ist, sind diese bisher kaum miteinander vernetzt. Als Beispiel wird das Zusammenspiel zwischen dem auftragsorientierten ERP-System, dem

entwicklungsisierten CAD-System und dem produktorientierten PLM-System aufgezeigt, das bisher keine automatisierte Vernetzung enthält. Demnach wurde im CAD-System entwickelt und im ERP-System daraus manuell eine Stückliste erstellt. Laut dem Gesprächspartner befinden sich derzeit allerdings viele Unternehmen im Transformationsprozess und versuchen, möglichst viele PLM-Werkzeuge einzubringen und die vorhandenen Systeme zu synchronisieren. PTC als Softwareunternehmen unterstützt in der Systemvernetzung und bietet die Systeme teilweise frei am Markt an.

Zusammengefasst wurde im Gespräch festgestellt, dass das Anwendungsfeld eines industrieorientierten Softwareunternehmens sehr stark an diese Dissertationsschrift anknüpft und darüber hinaus die Interessen verschiedener Branchen berücksichtigen muss. Zudem ist ein eindeutiger Trend zur Vernetzung und Speicherung von Produktdaten erkennbar, der aus verschiedenen Motiven resultiert und sich in unterschiedlichen Reifegraden in der Umsetzung befindet.

Darstellung der Ergebnisse

Auf die Beschreibung des Anwendungsfeldes folgend wurden die Modelle der Dissertationsschrift vorgestellt und diskutiert. Die Ableitung und Eingrenzung der Kreislaufstrategien wurde präsentiert und nicht im Detail diskutiert, um einen Fokus auf die praktische Anwendung der Informationsklassifizierung und des Wirkmodells legen zu können.

Daher wurde das Modell des zirkulären Ökosystems von werterhaltenden Kreislaufstrategien tiefergehend vorgestellt. Die Visualisierung des Modells wurde vom Experten als sehr hilfreich und detailliert bestätigt. Insbesondere die Beziehungen zwischen den Unternehmen im Kreislauf wurden gelobt. Anschließend wurde hervorgehoben, dass auch vorhandene Informationsbeziehungen in der Praxis nicht ausreichend genutzt werden. Am Beispiel der Informationsbereitstellung zwischen OEM und unabhängigen Remanufacturer wurde diskutiert, dass oftmals keine Fähigkeiten bestehen, Datensätze zu spezifischen Produkten auszuleiten und an dritte Unternehmen weiterzugeben. Viele Unternehmen würden bereits an der gebündelten Zusammenstellung aller Produktinformationen scheitern, sodass eine Weitergabe technisch nicht realisierbar sei. Überdies würden viele Datensätze geistiges Eigentum beinhalten, das eine Abstraktion erforderlich mache und eine weitere Komplexitätsstufe hinzufüge. Diese ist nach Aussage des Experten für sehr viele Unternehmen bislang nicht abbildbar. Das wirtschaftliche Potenzial einer Verfügbarkeit zentraler Produktinformationen wurde in den Gesprächen ebenso von Herstellern mit einem hohen Potenzial bewertet. Daten gegen eine Gebühr freizuschalten und verkaufen zu können, wurde auch von Schaeffler als Geschäftsmodell hinter dem digitalen Produktpass bestätigt. Zudem wurde die Einschätzung unterstützt, dass es immer unabhängige Dienstleister geben wird, die in spezialisierten Geschäftsbereichen eine Konkurrenz zum Hersteller aufrechterhalten. Mit deren Geschäften eigene Umsätze zu generieren, wird als zusätzliche Motivation genutzt. Es wurde allerdings zu bedenken gegeben, dass auf technischer Ebene die Steuerbarkeit und Nutzungseinschränkung zur Weitergabe von geschützten Informationen bisher nicht finalisiert wären, sodass dieses Geschäftsmodell

zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Dissertationsschrift technische Risiken beinhalte. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Experte das zirkuläre Ökosystem als sehr anwendungsnah und systematisch aufbereitet bestätigte, um die Verbindungen der Rollen im Produktlebenszyklus zu verstehen und darauf aufbauend Lösungen entwickeln zu können.

Darauffolgend wurde das Beschreibungsmodell der Informationsklassifizierung vorgestellt. Zunächst wurde auf die Erfahrungen zu Referenzrahmen von Produktinformationen von PTC selbst eingegangen. Auf der Detailebene der präsentierten Informationsklassifizierung war dem Experten kein Referenzrahmen bekannt. PTC nutze dagegen den Ordnungsrahmen des Internet of Production, um kundenspezifisch informationstechnische Systeme auszulegen. Grundsätzlich gäbe es zwei Philosophien, die angewandt werden: Zum einen würde die mittlere Schicht, in der alle Applikationen und Datenquellen zusammenlaufen, genutzt, um möglichst wenig Daten zu speichern und nur Relationen zwischen den erforderlichen Systemen aufzubauen. So würde eine Datendrehscheibe geschaffen, die unterschiedliche Systeme verbände, aber keine Informationen speichere und nur Ergebnisse liefere. Zum anderen gäbe es die Möglichkeit, eine umfassende Datenbank aufzubauen, in der alle verfügbaren Daten gespeichert werden. Zusätzlich würde ein eigenes Werkzeug kreiert, dass anschließend auf die relevanten Daten aus der Datenbank zugreifen könnte. Ein Trend zwischen beiden Philosophien sei nicht erkennbar, allerdings sei die Entwicklung von übergreifenden Standards zum Stand dieser Dissertationsschrift so weit fortgeschritten, dass Unternehmen anfangen, darauf zurückzugreifen. Wie in Unterkapitel 3.2.3 vorgestellt, ist die Verwaltungsschale der Industrie-4.0-Plattform eine standardisierte Option, um Daten unternehmensübergreifend zu teilen. Laut PTC wird hier zum ersten Mal weniger theoretisch entwickelt, sondern praktisch ein anwendbarer Standard geschaffen. In der Betrachtung der in dieser Dissertationsschrift entwickelten Informationsklassifizierung sieht der Experte Ähnlichkeiten zur internen, kundenspezifischen Entwicklung von Datenmodellen. Demnach wäre ein Informationsmodell spezifisch im Kundenkontext aufbereitet und um die entsprechenden Systemarchitekturen erweitert. Die Anwendbarkeit im Maschinenbau sieht der Experte damit als gegeben an. Es zeige ebenso auf, dass ähnliche Beschreibungsmodelle bereits unternehmensintern entwickelt würden. Der Experte betonte, dass dieses Beschreibungsmodell für Softwareunternehmen zudem nutzbar sei, um seine angebotenen Systeme und Fähigkeiten mit den Anforderungen des digitalen Produktpasses zu vergleichen und daraus zukünftiges Entwicklungspotenzial abzuleiten. Im nächsten Schritt wird die Informationsklassifizierung daher intern eingebbracht, um die eigenen Entwicklungen kritisch zu hinterfragen und eine wissenschaftliche Perspektive zu integrieren. Zusammenfassend wird die Anwendbarkeit der Informationsklassifizierung auch aus Perspektive von Softwareunternehmen bestätigt.

Anschließend wurde im Validierungsgespräch tiefergehend auf das Wirkmodell eingegangen. Das Wirkmodell wurde zunächst als verständlich und sachlogisch sauber hergeleitet bestätigt. Daraufhin wurde im Gespräch darauf eingegangen, dass insbesondere in der Praxis eine Herausforderung in der Umsetzbarkeit dieser

Wirkungszusammenhänge besteht. Aus informationstechnischer Perspektive sei bereits die Anbindung einer industriellen Maschine an den digitalen Produktpass beim Kunden vor Ort eine Herausforderung. Vom Experten wurde dazu die teilweise unzureichende Digitalisierung kleiner Unternehmen genannt und auf das Datenrecht verwiesen. Demnach wollen einige Nutzer nicht, dass alle Produktionsdaten gespeichert werden, falls eine Maschine bspw. außerhalb ihrer, vom Hersteller freigegebenen, Produktionsparameter betrieben wird. Diese Anwendungen könnten bereits Auswirkungen auf die Garantiebedingungen und das Datenrecht besitzen, die vom Nutzer nicht beabsichtigt werden. Die divergierenden Interessen zwischen Produktions- und Prozessstabilität sowie Maschinenhaltbarkeit und -haftung müssten im Rahmen eines digitalen Produktpasses mit dynamischen Informationen noch näher untersucht werden. Im Validierungsgespräch wurde ein Beispiel aus der Prozessindustrie diskutiert, in der ein Pumpennutzer kurzfristig den erlaubten Nutzungsbereich verlässt, um die Prozessstabilität zu sichern. Darüber hinaus sei dieser Anwendungsfall komplex, da der Industrieparkbetreiber als Nutzer der Pumpe die Produktionsprozesse nicht kennte und so den Verschleiß seiner Anlagen (z.B. der Pumpe) nicht einschätzen könnte. Der Industrieparkkunde möchte seine Produktionsprozesse allerdings nicht im digitalen Produktpass freigeben, um sein geistiges Eigentum nicht zu verlieren und der Pumpenhersteller hätte letztendlich wenige Informationen über den Pumpenverschleiß verfügbar, um am Lebenszyklusende eine datengetriebene Entscheidung treffen zu können. Nachdem das Anwendungsbeispiel des Pumpennutzers konzeptionell diskutiert wurde, attestierte er die Ergebnisse des Wirkmodells als sehr gut und hilfreich. Zudem wurde darauf verwiesen, dass die spezifische Einordnung eine gute Datenbasis darstelle, aber durchaus dynamisch und kundenspezifisch angepasst werden müsse. In der Gesamtbetrachtung der Dissertationsschrift wurde zum Abschluss das Fazit gezogen, dass die Ergebnisse dieses Dissertationsvorhabens eine sehr gute Ausgangsbasis bieten, um sich zu Anfang in die Thematik einzuarbeiten. Innerhalb von PTC werden die Erkenntnisse im Weiteren genutzt, um eigene Vorarbeiten kritisch zu hinterfragen und anwendungsnahe weiterzuentwickeln. Aus Sicht eines Softwareunternehmens liefert insbesondere das zirkuläre Ökosystem eine systematische Beschreibung des Anwendungsfeldes, das zur Weiterentwicklung des Produktportfolios hilfreich ist.

6.6 Überprüfung der Anforderungen

In der summarischen Betrachtung konnten die formalen und inhaltlichen Anforderungen an diese Doktorarbeit in den Validierungsgesprächen bestätigt werden. Zunächst wird ein Überblick über die Validierung der formalen Anforderungen gegeben. Die formale Richtigkeit wurde in den vier Gesprächen implizit bestätigt. So wurde beispielsweise die Unterscheidung der Kreislaufstrategien in unternehmensinternen und unternehmensübergreifenden Werterhalt diskutiert, allerdings konnte durch die wissenschaftliche Herleitung die Unterscheidung dargelegt und verifiziert werden. Unter den formalen Anforderungen kann insbesondere die Relevanz hervorgehoben werden, die alle Gesprächspartner als gegeben angesehen haben. Im Anschluss an die Gespräche wurde von jedem Gesprächspartner Interesse an den vorgestellten Ergebnissen

geäußert, um die Modelle tiefergehend zu studieren und an interessierte Kolleginnen und Kollegen weiterzuleiten. Das Abstraktionsniveau wurde unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Anspruchsgruppen als allgemein anwendbar verifiziert. Die Experten schätzten das Abstraktionsniveau zwischen sehr generalistisch und sehr spezifisch für den Maschinen- und Anlagenbau unterschiedlich ein, woraus jedoch geschlossen werden kann, dass ein allgemeingültiges Niveau der Konzeptualisierung getroffen wurde. Wie in Unterkapitel 5.5.2 beschrieben, ist im konkreten Anwendungsfall trotzdem eine spezifische Ausarbeitung erforderlich, um die Ergebnisse in die Praxis zu überführen. Die Klarheit und Handhabbarkeit wurden von allen Experten gelobt und konnten ohne Abweichungen validiert werden. Die Wirtschaftlichkeit der Anwendung wurde in den Validierungsgesprächen ebenfalls bekräftigt. Speziell die Anwendbarkeit der Dissertationserkenntnisse für Unternehmen, die sich am Anfang des Einführungsprozesses eines digitalen Produktpasses befinden, belegt die einfache und aufwandsarme Nutzung der Ergebnisse dieser Dissertationsschrift.

Die Validierung der inhaltlichen Anforderungen wurde detailliert in den vorherigen Unterkapiteln beschrieben und kann in der Gesamtbetrachtung ebenso bestätigt werden. Die Auswahl der Kreislaufstrategien wurde für die Zielstellung dieser Dissertationsschrift als sehr wertstiftend angesehen, auch wenn von den Experten Interesse an der Erweiterung des Anwendungsfeldes auf Retrofit und Recycling geäußert wurde. Hier können zukünftig weitere Forschungsarbeiten fokussiert werden. Das Beschreibungsmodell des zirkulären Ökosystems konnte von allen Experten als nachvollziehbar und korrekte Abbildung der Realität validiert werden. Insbesondere die Übersichtlichkeit und Visualisierung des Modells wurden im Rahmen dieser Diskussionen bekräftigt. Den identifizierten Informationssentitäten und deren Klassifizierung wurde ebenfalls als praxistauglich und innovativ zugestimmt. Obwohl Abweichungen zu internen Projekten der Gesprächspartner identifiziert wurden, wurde die vorgestellte Klassifizierung als vollständig bestätigt. Die Beschreibung der Wirkungsbeziehungen des Wirkmodells konnte in der Tiefe nicht mit allen Experten validiert werden. Allerdings konnte die Herleitung der Wirkungsbeziehungen von allen Experten als verständlich bestätigt und anhand von präsentierten Beispielen nachvollzogen werden. Die darauffolgende Anforderung der inneren Konsistenz der Erkenntnisse wurde von den Experten ebenfalls gelobt und kann damit als verifiziert gelten. Die Visualisierung wurde speziell für das zirkuläre Ökosystem besonders hervorgehoben und unterstützt damit die Anwendbarkeit dieser Dissertationsergebnisse. Abschließend konnte die Adoptionsfähigkeit aus den Diskussionen bestätigt werden, da vielfach angemerkt wurde, dass diese wissenschaftliche Ausarbeitung eine hervorragende Grundlage für eigene, unternehmensinterne Anwendungsfälle bietet. Somit konnte die Adoptionsfähigkeit nicht nur im Rahmen des technologischen Wandels, sondern auch für abweichende Anwendungsfelder validiert werden. Eine ausführliche Übersicht der validierten Anforderungen ist in Abbildung 6-5 dargestellt.

Formale Anforderungen	
Richtigkeit	Sind die entwickelten Modelle formal einwandfrei und widerspruchsfrei gestaltet, sodass Aussagen reproduzierbar und nachprüfbar sind? <input checked="" type="checkbox"/>
Relevanz	Liegen dem Modellierungszweck relevante und real existierende Sachverhalte zugrunde? <input checked="" type="checkbox"/>
Abstraktion	Sind die einzelnen Modelle ausreichend konzeptualisiert und allgemein anwendbar? <input checked="" type="checkbox"/>
Klarheit & Handhabbarkeit	Sind die einzelnen Modelle benutzerfreundlich anzuwenden und die Ergebnisse leicht zu interpretieren? <input checked="" type="checkbox"/>
Wirtschaftlichkeit	Kann der Anwendungsaufwand zur Erreichung des Modellierungszweckes niedrig gehalten werden? <input checked="" type="checkbox"/>
Inhaltliche Anforderungen	
Auswahl von Kreislaufstrategien	Sind die identifizierten Kreislaufstrategien vollständig, praxistauglich und wertstiftend? <input checked="" type="checkbox"/>
Ökosystembeschreibung	Bildet die dargestellte Ökosystembeschreibung die Realität ab und ist nachvollziehbar dargestellt? <input checked="" type="checkbox"/>
Beschreibung Informationsentitäten	Sind die identifizierten Informationsentitäten vollständig, praxistauglich und überschneidungsfrei? <input checked="" type="checkbox"/>
Beschreibung Wirkungsbeziehungen	Wird die Wirkung zwischen Rollen des zirkulären Ökosystems und den klassifizierten Informationsentitäten für die Praxis verständlich erklärt? <input checked="" type="checkbox"/>
Innere Konsistenz	Weisen alle partialen Modelle eine inhaltliche Konsistenz auf? <input checked="" type="checkbox"/>
Visualisierung	Trägt die gewählte Form der Darstellung dazu bei, Sachverhalte übersichtlich und für die Praxis leicht verständlich zu transportieren? <input checked="" type="checkbox"/>
Adaptionsfähigkeit	Sind die partialen Modelle vor dem Hintergrund eines kontinuierlichen technologischen Wandels anpassungsfähig? <input checked="" type="checkbox"/>

Abbildung 6-5: Überprüfung der Anforderungen dieser Dissertationsschrift (eigene Darstellung)

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im finalen Kapitel dieser Dissertationsschrift werden die zentralen Erkenntnisse zusammengefasst, kritisch gewürdigt und ihr Beitrag für die Wissenschaft und Praxis präsentiert. Das Kapitel schließt mit einem Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder, die sich aus diesem Dissertationsvorhaben ergeben.

7.1 Zusammenfassung

Die Motivation zur Anfertigung der vorliegenden Dissertationsschrift resultiert aus der Problemstellung, die inhaltliche Ausgestaltung eines digitalen Produktpasses zu definieren und eine grundlegende Informationsverfügbarkeit in zirkulären Ökosystemen zu gewährleisten. Trotz aufkommender Forderungen aus der Politik und von wissenschaftlichen Studien, die das wirtschaftliche Potenzial der Kreislaufwirtschaft aufzeigen, beschränkte sich die Forschung bisher auf generalistische Ansätze und es fehlen weiterhin klare Definitionen für den Inhalt digitaler Produktpässe (s. REIKE ET AL. 2018, S. 249; s. BERGER ET AL. 2022, S. 1). Im Zuge ausführlicher Experteninterviews im Rahmen dieses Dissertationsvorhabens konnten diese Herausforderungen bestätigt und detailliert werden. Demnach stellt bereits die Auswahl und Verfolgung spezifischer Kreislaufstrategien Unternehmen vor Schwierigkeiten, die innerhalb dieses Dissertationsvorhabens untersucht wurden. Aus der Summe der beschriebenen Problemstellungen wurde die folgende, zentrale Forschungsfrage formuliert:

Wie lassen sich Produktinformationen mit den Rollen für die Umsetzung von Kreislaufstrategien verknüpfen und in einem Informationsmodell zusammenführen?

Zur Beantwortung wurde ein systematisches Vorgehen aus Beschreibungsmodellen und einem Erklärungsmodell gewählt, das innerhalb des rollenspezifischen Informationsmodells für eine praxistaugliche Umsetzung finalisiert wird. Um das Verständnis für das Themenfeld und den Aufbau zu erhalten, wurde im ersten Kapitel zunächst auf die Ausgangssituation und Zielsetzung dieser Dissertationsschrift eingegangen. Im darauffolgenden Kapitel wurden die begrifflichen Grundlagen beschrieben. Dazu wurde auf den Lebenszyklus von Produkten, auf die Kreislaufwirtschaft im industriellen Kontext sowie auf Informationssysteme eingegangen. Im dritten Kapitel wurden die Grundlagen um den aktuellen Stand der Forschung ergänzt. Mithilfe systematischer Literaturrecherchen wurden in den Themenfeldern der Kreislaufstrategien, der zirkulären Ökosysteme und der Informationsmodellierung die aktuellen Erkenntnisse vorgestellt und in den Kontext dieser Dissertationsschrift eingeordnet. Das Ergebnis des Kapitels mündete in der Ableitung des Forschungsbedarfs. Darin wurde die Hypothese bestätigt, dass bisher keine wissenschaftlichen Erkenntnisse zu Informationsmodellen, die Produktinformationen im zirkulären Ökosystem austauschen, identifiziert werden konnten. Im vierten Kapitel erfolgte die Herleitung des Konzeptansatzes. Zunächst wurden die formalen und inhaltlichen Anforderungen an die Modelle beschrieben, um anschließend die methodischen Grundlagen vorzustellen. In Summe wurden fünf

formale und sieben inhaltliche Anforderungen gestellt. Mit der Konkretisierung des Dissertationsvorhabens schloss das vierte Kapitel.

Das fünfte Kapitel umfasst die Detaillierung des Informationsmodells anhand der zuvor definierten Teilmodelle und Fragestellungen (s. Abbildung 7-1).

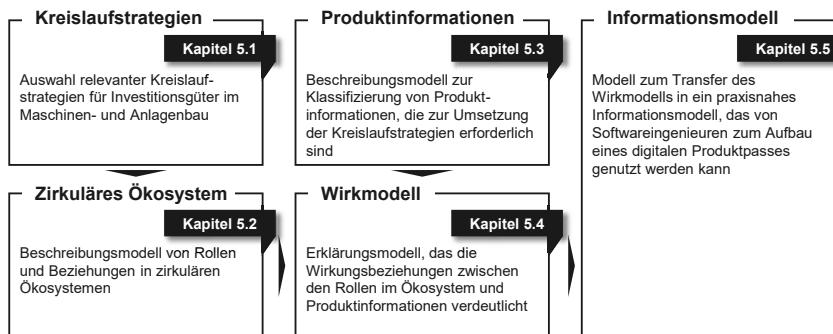


Abbildung 7-1: Systematisches Vorgehen zur Beantwortung der zentralen Forschungsfrage dieser Dissertationsschrift (eigene Darstellung)

Zunächst wurden dazu relevanten Kreislaufstrategien für den Maschinen- und Anlagenbau analysiert. Insbesondere kleinere Unternehmen hatten zum Zeitpunkt der Identifikation dieses Dissertationsvorhabens kein Verständnis über potenzielle Kreislaufstrategien ihrer Produkte, sodass die erste Forschungsfrage wie folgt gewählt wurde:

Welche Kreislaufstrategien existieren für Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus?

Mithilfe einer systematischen Literaturrecherche wurden 13 Kreislaufstrategien identifiziert, die anschließend anhand von Fallstudien validiert wurden. Unter Nutzung öffentlich verfügbarer Nachhaltigkeitsberichte von Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau wurde eine Analyse der bereits realisierten Kreislaufstrategien durchgeführt und in den Kontext dieses Dissertationsvorhabens gestellt. Als Ergebnis wurde die Kategorie des unternehmensübergreifenden Werterhalts, die die Kreislaufstrategien des Reuse, Remanufactures, Refurbish und Repurpose beinhaltet, mit der höchsten Relevanz für den Maschinen- und Anlagenbau ermittelt. Als Ausgangsbasis wurden die folgenden Beschreibungs- und Erklärungsmodelle darauf aufgebaut.

Aufgrund der Auswirkungen von Kreislaufstrategien über die Systemgrenzen des eigenen Unternehmens hinweg, folgte das zweite Beschreibungsmodell dem Ökosystemansatz, um die Implikationen der ausgewählten Kreislaufstrategien zu untersuchen und zu beschreiben. Das Beschreibungsmodell beantwortete damit die folgende Forschungsfrage:

Welche Rollen sind für die Umsetzung der Kreislaufstrategien notwendig und in welchen Beziehungen müssen diese zueinander stehen?

In Summe wurden sieben zentrale und fünf ergänzende Rollen unter Anwendung der Fallstudienforschung nach EISENHARDT aus neun Fallstudien ermittelt. Die Modellierung des zirkulären Ökosystems ermöglichte ein Verständnis über die Interaktionen der Rollen untereinander und deren zentrale Aktivitäten im Prozess der Kreislaufwirtschaft. Unter den zentralen Rollen ließen sich die Nutzer, OEM, Händler, OER, unabhängigen Remanufacturer, Repurposer und Servicedienstleister einordnen, die ergänzt wurden durch die Komponentenlieferanten, Recycler, Logistikunternehmen, die Politik und die neuen Nutzergruppen. Diese identifizierten Rollen bildeten im weiteren Verlauf der Dissertationsschrift die Grundlage des Wirkmodells und des darauffolgenden Informationsmodells.

Die Deduktion relevanter Produktinformationen für Maschinen und Anlagen in Kapitel 5.2 resultierte aus der Forschungslücke digitaler Informationsbestandteile für einen digitalen Produktpass. In Unterkapitel 3.3 hergeleitet, beschränken sich die derzeitigen Aktivitäten auf die Entwicklung einer allgemeingültigen Architektur und nicht auf anwendungsspezifische Inhalte ebendieser. Angesichts dessen folgt das dritte Beschreibungsmodell der Forschungsfrage:

Welche Produktinformationen werden für die Umsetzung der Kreislaufstrategien benötigt und wie können diese klassifiziert werden?

Abgeleitet aus einer Anforderungsanalyse, die sich aus wissenschaftlichen, wirtschaftlichen und politischen Veröffentlichungen speist, wurde in Unterkapitel 5.3 eine Klassifizierung von Produktinformationen für einen digitalen Produktpass des unternehmensübergreifenden Werterhalts im Maschinen- und Anlagenbau hergeleitet. Die Anforderungsanalyse umfasste in Summe 17 Anforderungen, die sich in die Kategorien der Produkt-, Nutzungs-, Netzwerk und Nachhaltigkeitsdaten aufteilen. Vor dem Hintergrund dieser Anforderungen wurden in einer Bestandsanalyse unternehmerische Informationssysteme analysiert, um den aktuellen Stand der Informationsverfügbarkeit zu berücksichtigen. Die entwickelte Klassifizierung umfasste vier Hauptkategorien, 20 Unterkategorien und 55 Informationsentitäten. Die vier Hauptkategorien teilten sich auf statische Produktinformationen, dynamische Zustandsinformationen, Wertschöpfungsnetzwerkinformationen und Nachhaltigkeitsinformationen auf.

Das Erklärungsmodell umfasst in Kapitel 5.4 die Wirkungsbeziehungen zwischen den Rollen im zirkulären Ökosystem und den zuvor identifizierten Informationsentitäten.

Die dazugehörige Forschungsfrage lautete wie folgt:

Wie lassen sich die Produktinformationen mit den Rollen verknüpfen und in einem Informationsmodell vereinen?

Diese Forschungsfrage wurde geteilt in den Unterkapiteln 5.4 und 5.5 beantwortet. Zur Modellierung der Wirkungsbeziehungen zwischen den Rollen des Kreislaufökosystems und den Produktinformationen wurde die Methode der Assoziationsmatrizen angewandt. Strukturiert anhand der Hauptkategorien wurden Pflichten zur Erstellung und Aktualisierung sowie Leserechte den Ökosystemrollen zugeordnet, um daraus Verantwortlichkeiten für die Pflege und Einspeisung eines digitalen Produktpasses

abzuleiten. Die Ergebnisse zeigten, dass der Maschinen- und Anlagenhersteller einen hohen Anteil der Verantwortlichkeiten zur Erstellung statischer Produktinformationen aufweist. Aufgrund seiner zentralen Rolle als Inverkehrbringer des Produkts ergeben sich ebenso Pflichten in weiteren Kategorien wie das Zur-Verfügung-Stellen von Ersatzteilinformationen und die Auswahl einer Berechnungsmethode für die Klimabilanz des Produkts. Der Nutzer erhält als Betreiber der Maschine oder Anlage darüber hinaus die Pflicht, innerhalb des Nutzungszeitraums regelmäßig die dynamischen Zustandsinformationen zu aktualisieren, um die erforderliche Datenbasis für den eigentlichen Nutzen des digitalen Produktpasses zu gewährleisten. Als OER, Remanufacturer, Servicedienstleister oder Repurposer werden die vorhandenen Informationssentitäten zumeist gelesen, um darauf basierend geschäftliche Entscheidungen treffen zu können. Bei Produktveränderungen besitzen sie allerdings auch Rechte, die entsprechenden Entitäten aktualisieren zu können. Es lässt sich festhalten, dass durch die Analyse ein umfassendes Verständnis über die datenbasierte Interaktion der Akteure in der Kreislaufwirtschaft von Investitionsgütern gewonnen werden konnte.

Der zweite Teil der Forschungsfrage wurde in Abschnitt 5.5 anhand eines Informationsmodells vorgestellt, das zum Ziel hatte, die Anwendbarkeit durch Softwareingenieure sicherzustellen und eine übersichtliche Zusammenfassung des Erklärungsmodells zu liefern. Dazu wurden die wissenschaftlichen Erkenntnisse des Wirkmodells in einen praktischen Kontext gesetzt und um eine Vorgehensweise zur Anwendung im Unternehmen ergänzt. Überdies wurde eine Vorgehensweise zur Anwendung des Informationsmodells geliefert und näher beschrieben. In diesem fünfphasigen Prozess wurde von der Kreislaufstrategie ausgehend ein individuelles Informationsmodell erstellt und bis zur Anwendung finalisiert. Eine Zusammenfassung der in dieser Dissertationsschrift entwickelten Vorgehensweise findet sich in Abbildung 5-60.

Zum Abschluss dieser Dissertationsschrift wurde in Kapitel sechs eine Validierung mit Unternehmen aus dem Interessenbereich dieses Dissertationsvorhabens durchgeführt. Dazu wurden unternehmerische Fallbeispiele betrachtet und mit Experten aus dem Sektor diskutiert. Die Fallstudien umfassen Beispiele der Schaeffler AG, der BMW AG, der Reifenhäuser Maschinenfabrik und der Parametric Technology GmbH. Ausgewählt nach den unterschiedlichen Rollen aus dem zirkulären Ökosystem wurden die Erkenntnisse aus Sicht eines Komponentenlieferanten, zwei OEMs aus dem Automobil- und dem Maschinensektor sowie einem Softwareunternehmen kritisch hinterfragt. Insgesamt konnten alle Experten die wissenschaftlichen Herleitungen und Ergebnisse sehr gut nachvollziehen. Insbesondere die Handhabbarkeit der Modelle wurde positiv hervorgehoben und bestätigt, dass Unternehmen, die sich in die Thematik einarbeiten, mit den Ergebnissen der vorliegenden Dissertationsschrift eine systematische und wissenschaftliche Blaupause erhalten. Die Gesprächspartner konnten darüber hinaus die praktische Relevanz bestätigen. In allen betrachteten Fallbeispielen wurden bereits ähnliche Vorarbeiten durchgeführt, die sich mit den Erkenntnissen dieses Dissertationsvorhabens vereinen lassen. Anschließend wurde das Ergebnis dieser Dissertationsschrift anhand der zuvor definierten formalen und inhaltlichen Anforderungen bewertet. Diese konnten von allen Experten validiert werden.

7.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Aus den Ergebnissen dieser Dissertationsschrift ergibt sich zusätzlicher Forschungsbedarf, der im Rahmen aufbauender Forschungsaktivitäten betrachtet werden kann. Auch wenn dieses Dissertationsvorhaben einen Mehrwert durch den fundierten Vorschlag einer inhaltlichen Ausgestaltung des digitalen Produktpasses liefert, konnten in der Ausarbeitung nur Informationsentitäten identifiziert werden. Dadurch konnte eine höhere Detailtiefe erreicht werden, allerdings wurden keine Attribute für ein vollständiges Datenmodell abgeleitet. Um einen digitalen Produktpass entwickeln und in eine Datenbankstruktur integrieren zu können, ist operative Definitionsarbeit erforderlich, die die identifizierten Informationsentitäten mit erreichbaren Attributen und Datenpunkten hinterlegen. Eine dahinterliegende Forschungsfrage sollte sich ebenso mit den Erbbeziehungen zwischen Komponenten, Baugruppen und montierten Maschinen befassen. Eine Informationsaggregation befindet sich zum Zeitpunkt des Erstellens dieser Dissertationsschrift in Entwicklung, allerdings sind branchenspezifische Standards erforderlich, um eine effiziente Verknüpfung zwischen verschiedenen Herstellern zu erreichen.

Ebenso wurde in der vorliegenden Arbeit der Fokus auf den Maschinen- und Anlagenbau gelegt. Die Erkenntnisse dieser Dissertationsschrift lassen sich ebenso auf industrielle Investitionsgüter anwenden, allerdings ist eine branchen- und produktsspezifische Detaillierung des Informationsmodells erforderlich. Beispielhaft kann das Validierungsbeispiel der Reifenhäuser Maschinenfabrik genannt werden (s. Unterkapitel 6.4), deren Fokus die Herstellung von Produktionsmaschinen für Kunststoffverpackungen darstellt. Deren Anforderungen an einen digitalen Produktpass erstrecken sich auf die verarbeiteten Materialien und Kunststoffe, um outputspezifische Daten liefern zu können. Dies geht über den hier betrachteten Anwendungsfall von digitalen Produktpässen hinaus. In weiteren Forschungsaktivitäten sollten die vorliegenden Modelle daher in unterschiedliche Branchen transferiert werden.

Zudem ergibt sich eine Herausforderung aus der effizienten Einspeisung des digitalen Produktpasses aus unternehmerischen Softwaresystemen. Um die Akzeptanz dieser technologischen Lösung zu erhöhen und den Aufwand so gering wie möglich zu halten, ist die Verknüpfung mit bestehenden Softwaresystemen unausweichlich. Allerdings ist die Softwarelandschaft sehr divers und erfordert eine detaillierte Analyse möglicher Schnittstellen. Ebenso müssen die vorgeschlagenen Informationsentitäten mit der vorhandenen Datengrundlage abgeglichen werden, um die Datenherkunft abilden zu können.

Auch wenn im vorgeschlagenen Informationsmodell eine Verknüpfung der erforderlichen Informationsentitäten mit den Rollen durchgeführt wird, ist darüber hinaus die Datennutzung noch nicht vollständig geklärt. In den aufgezeigten Fallstudien wurde bereits präsentiert, das vorliegende Geometriedaten aus rechtlichen Gründen nur innerhalb des Unternehmens, z. B. zwischen OEM und OER, verwendet werden dürfen. Über einen Produktlebenszyklus hinweg gestaltet sich diese Fragestellung umso

komplexer und bedarf daher einer neutralen und ausgewogenen Betrachtung durch die Wissenschaft.

Abschließend sind einige Fragestellungen des digitalen Produktpasses noch ungeklärt. Demnach wurden die technologischen Hürden zum Großteil bereits überwunden, allerdings sind weiterhin Fragen zum Betrieb und dahinterliegender Geschäftsmodelle offen. Aus europäischer Sicht wird eine Einführung des digitalen Produktpasses gefordert, ohne den langfristigen Betrieb vorzugeben. Daher besteht hier noch Abstimmungsbedarf und es ist Standardisierungsarbeit erforderlich, um aus den vorgestellten Konzepten nutzbare Anwendungen zu erstellen.

Literaturverzeichnis

- A.P. MOLLER - MAERSK (Hrsg.): 2021 Sustainability Report, Copenhagen 2022.
https://www.maersk.com/~/media_sc9/maersk/corporate/sustainability/files/resources/2021/maersk-sustainability-report_2021.pdf?la=en&hash=E9025F888347C49D5E1706B5B87BD3EC (Link zuletzt geprüft: 03.05.2024).
- AARIKKA-STENROOS, L.; RITALA, P.; D. W. THOMAS, L.: Circular economy ecosystems: a typology, definitions, and implications. In: Research Handbook of Sustainability Agency. Hrsg.: S. Teerikangas; T. Onkila; K. Koistinen; M. Mäkelä. Edward Elgar Publishing, Cheltenham [u. a.] 2021, S. 260–276.
- ABRAHAM, J.: Product information management. Theory and practice. Springer, Cham [u. a.] 2014.
- ABRAMOVICI, M.: Future Trends in Product Lifecycle Management (PLM). In: The future of product development. Proceedings of the 17th CIRP Design Conference. Hrsg.: F.-L. Krause. Springer, Berlin [u. a.] 2007, S. 665–674.
- ACHTERBERG, E.; HINFELAAR, J.; BOCKEN, N.: Master Circular Business with the Value Hill, Amsterdam, Niederlande 09.2016. <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/knowledge/master-circular-business-value-hill> (Link zuletzt geprüft: 26.03.2024).
- ACKOFF, R. L.: From Data to Wisdom. In: Journal of Applied Systems Analysis (1989) 16, S. 3–9.
- ADAMENKO, D.; KUNNEN, S.; NAGARAJAH, A.: Vergleich der Ansätze von Product Lifecycle Management und Digitalem Zwilling. In: Nachhaltige Produktentwicklung. 18. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik: 01. und 02. Oktober 2020 in Duisburg. Hrsg.: B. Corves; K. Gericke; K.-H. Grote; A. Lohrengel; M. Löwer; A. Nagarajah; F. Rieg; G. Scharr; R. H. Stelzer. Universität Duisburg-Essen, Essen 2020, S. 209–221.
- ADISORN, T.; THOLEN, L.; GOTZ, T.: Towards a Digital Product Passport Fit for Contributing to a Circular Economy. In: Energies 14 (2021) 8, S. 1–16.
- ADNER, R.: Ecosystem as Structure. In: Journal of Management 43 (2017) 1, S. 39–58.
- AHSGREN, H.: Storebro Industrier AB – Machines. Business Model Case Description. Storebro, 09.02.2016. <https://www.remanufacturing.eu/studies/5c2f9ae589dd4a712ea7.pdf> (Link zuletzt geprüft: 26.03.2024).
- AIXTRON SE (Hrsg.): Nachhaltigkeitsbericht in Ergänzung zum Geschäftsbericht 2021. Herzogenrath, Februar 2022. <https://www.aixtron.com/investoren/publikationen/2021/de/Nachhaltigkeitsbericht%202021.pdf> (Link zuletzt geprüft: 03.05.2024).

- ALAMEREW, Y. A.; BRISSAUD, D.: Circular economy assessment tool for end of life product recovery strategies. In: *Journal of Remanufacturing* 9 (2019) 3, S. 169–185.
- ALAMEREW, Y. A.; KAMBAOU, M. L.; SAKAO, T.; BRISSAUD, D.: A Multi-Criteria Evaluation Method of Product-Level Circularity Strategies. In: *Sustainability* 12 (2020) 12, S. 1–19.
- AMINOFF, A.; VALKOKARI, K.; ANTIKAINEN, M.; KETTUNEN, O.: Exploring Disruptive Business Model Innovation for the Circular Economy. In: *Sustainable Design and Manufacturing 2017*. Hrsg.: G. Campana; R. J. Howlett; R. Setchi; B. Cimatti. Smart Innovation, Systems and Technologies. Springer, Cham [u. a.] 2017, S. 525–536.
- ANASTAS, P. T.; ZIMMERMAN, J. B.: Design through the 12 principles of green engineering. In: *Environmental science & technology* 37 (2003) 5, 94A-101A.
- ANDERSEN, M. S.: An introductory note on the environmental economics of the circular economy. In: *Sustainability Science* 2 (2007) 1, S. 133–140.
- ANGGRAENI, E.; HARTIGH, E. den; ZEGVELD, M.: Business ecosystem as a perspective for studying the relations between firms and their business networks. In: *Phase Transitions in Organisations*. Hrsg.: F. M. van Eijnatten; J. Peters. TVA, Veldhoven, 2007, S. 1–28.
- ARNOLD, V.; DETTMERING, H.; ENGEL, T.; KARCHER, A.: *Product Lifecycle Management beherrschen. Ein Anwenderhandbuch für den Mittelstand*. 2., neu bearb. Auflage. Springer, Berlin [u. a.] 2011.
- AUMAYR, K. J.: *Erfolgreiches Produktmanagement. Tool-Box Für das Professionelle Produktmanagement und Produktmarketing*. 5., erw. Auflage. Springer Gabler, Wiesbaden 2019.
- BAEUMLE-COURTH, P.; NIELAND, S.; SCHRÖDER, H.: *Wirtschaftsinformatik*. Oldenbourg, München [u. a.] 2004.
- BAILEY, K. D.: *Typologies and taxonomies. An introduction to classification techniques*. SAGE Publications, Thousand Oaks (CA) 1994.
- BAILEY, K. D.: *Typology Construction, Methods and Issues*. In: *Encyclopedia of Social Measurement*. Hrsg.: K.-L. Kimberly. Elsevier, Amsterdam [u. a.] 2005, S. 889–898.
- BALZERT, H.: *Lehrbuch der Softwaretechnik: Basiskonzepte und Requirements Engineering*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2009.
- BARQUETE, S.; SHIMOZONO, A. H.; TREVISAN, A. H.; CASTRO, C. G.; GOMES, L. A. D. V.; MASCARENHAS, J.: Exploring the Dynamic of a Circular Ecosystem: A Case Study about Drivers and Barriers. In: *Sustainability* 14 (2022) 13, 22

- BAUERNHANSL, T.; KRÜGER, J.; REINHART, G.; SCHUH, G.: WGP-Standpunkt Industrie 4.0. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik Wgp e. V., Darmstadt, Juni 2016. https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Presse/Presseinformationen/2016/Juni/WGP_Standpunkt_Industrie_40.pdf (Link zuletzt geprüft: 26.03.2024).
- BECKER, J.; PROBANDT, W.; VERING, O.: Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung. Springer, Berlin [u. a.] 2012.
- BEN DROR, M.; GUPTA, A.; DELOISON, T.; SCHMIDT, A.; HOLST, A.; MACHUR, W.; LACY, P.; REERS, R.: Driving Ambitions: The Business Case for Circular Economy in the Car Industry. Insight Report. Mai 2022. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Driving_Ambitions-2022.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- BERG, H.; BENDIX, P.; JANSEN, M.; LE BLÉVENNEC, K.; BOTTERMANN, P.; POHJALAINEN, E.; WAHLSTRÖM, M.: Unlocking the potential of Industry 4.0 to reduce the environmental impact of production. Eionet Report - ETC/WMGE 2021/5, Juni 2021. <https://www.eionet.europa.eu/etc/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/unlocking-the-potential-of-industry-4-0-to-reduce-the-environmental-impact-of-production/@/download/file/Final%20for%20website.pdf> (Link zuletzt geprüft: 03.05.2024).
- BERG, H.; KULINNA, R.; GUTH-ORLOWSKI, S.; STÖCKER, C.; THIERMANN, R.; POREPP, N.: Overcoming Information Asymmetry in the Plastics Value Chain with Digital Product Passports. How decentralised identifiers and verifiable credentials can enable a circular economy for plastics Wuppertal Paper; Nr. 97, März 2022. <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7940/file/WP197.pdf> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- BERG, H.; LE BLÉVENNEC, K.; KRISTOFFERSEN, E.; STRÉE, B.; WITOMSKI, A.; STEIN, N.; BASTIN, T.; RAMESOHL, S.; VRANCKEN, K.: Digital circular economy – a cornerstone of a sustainable European industry transformation. Wuppertal, 12.10.2020. https://www.era-min.eu/sites/default/files/publications/201023_e-cera_white_paper_on_digital_circular_economy.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- BERGER, K.; SCHÖGGL, J.-P.; BAUMGARTNER, R. J.: Digital battery passports to enable circular and sustainable value chains: Conceptualization and use cases. In: Journal of Cleaner Production 353 (2022), 15
- BERNER, S.: Informationsmodellierung. Durch Verstehen zu besserer Software. vdf, Zürich 2016.
- BIANCHINI; ROSSI; PELLEGRINI: Overcoming the Main Barriers of Circular Economy Implementation through a New Visualization Tool for Circular Business Models. In: Sustainability 11 (2019) 23, 33

- BLOMSMA, F.; PIERONI, M.; KRAVCHENKO, M.; PIGOSSO, D. C.; HILDENBRAND, J.; KRISTINSDOTTIR, A. R.; KRISTOFFERSEN, E.; SHAHBAZI, S.; NIELSEN, K. D.; JÖNBRINK, A.-K.; LI, J.; WIIK, C.; MCALOONE, T. C.: Developing a circular strategies framework for manufacturing companies to support circular economy-oriented innovation. In: *Journal of Cleaner Production* 241 (2019) 241, 25
- BMW GROUP (Hrsg.): Sustainable Value Report 2019. München, 11.03.2020. https://www.bmwgroup.com/content/dam/grpw/web-sites/bmwgroup_com/responsibility/downloads/en/2020/2020-BMW-Group-SVR-2019-Englisch.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- BOCKEN, N.; SHORT, S. W.; RANA, P.; EVANS, S.: A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. In: *Journal of Cleaner Production* 65 (2014), S. 42–56.
- BOCKEN, N. M. P.; PAUW, I. de; BAKKER, C.; VAN DER Grinten, B.: Product design and business model strategies for a circular economy. In: *Journal of Industrial and Production Engineering* 33 (2016) 5, S. 308–320.
- BOLDRINI, J.-C.; ANTHEAUME, N.: Designing and testing a new sustainable business model tool for multi-actor, multi-level, circular, and collaborative contexts. In: *Journal of Cleaner Production* 309 (2021), 12
- Boos, W.; ZANCUL, E.: PPS-Systeme als Bestandteil des Product Lifecycle Management. In: *Produktionsplanung und -steuerung*; Bd. 2: Evolution der PPS. Hrsg.: G. Schuh; V. Stich. Springer, Berlin [u. a.] 2012, S. 336–364.
- BOOTSMA, M.: Hitachi Construction Machinery Europe – Pumps. Business Model Case Study Description. Amsterdam, 17.02.2016. <https://www.remanufacturing.eu/studies/086918d40243a2cd66cd.pdf> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- BOURGEOIS, H.; LELEUX, B. F.: Renault Trucks: Remanufacturing as a Strategic Activity. Lausanne, 21.07.2005. <https://store.hbr.org/product/renault-trucks-remanufacturing-as-a-strategic-activity/IMD294> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- BOURGUIGNON, D.: Closing the loop. New circular economy package. Europäisches Parlament, Brüssel, Januar 2016. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573899/EPRS_BRI%282016%29573899_EN.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- BRAMMER, A.: PSS - Power steering boxes. Business Model Case Study Description. Amsterdam [u. a.], 08.02.2016. <https://www.remanufacturing.eu/studies/b4a73eb144168dbe5c4a.pdf> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- BUCHBERGER, S.; HOFBAUER, G.; MANGOLD, L.; TRUONG, K.: Das Konzept der Circular Economy als Maxime für Beschaffung und Vertrieb in der Industrie. Arbeitsberichte – Working Papers; Nr. 46. Technische Hochschule Ingolstadt, Ingolstadt, März 2019. https://www.thi.de/fileadmin/daten/Working_Papers/thi_workingpaper_46_hofbauer.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).

- BÜCHELE, R.; SCHMIDT, D.; LÖWENSTERN, A. von: GreenTech made in Germany 2021. Umwelttechnik-Atlas für Deutschland, Berlin, Februar 2021. https://www.roland-berger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_greentech_atlas_2.pdf (Link zuletzt geprüft: 03.05.2024). [in Bibliothek des FIR e. V. an der RWTH Aachen verfügbar]
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) (Hrsg.): Umweltpolitische Digitalagenda. Berlin, 02.03.2020. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Digitalisierung/digitalagenda_bf.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMUV) (Hrsg.): Industrie 4.0 & Kreislaufwirtschaft. Transformationsfeld der Digitalagenda. <https://www.bmuv.de/umweltpolitische-digitalagenda/industrie-40-kreislaufwirtschaft> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWi) (Hrsg.): Fortschrittsbericht 2021. Industrie 4.0 gestalten. Wenn Vision Realität wird. Berlin, April 2021. https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/2021-fortschrittsbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- CAGNO, E.; NERI, A.; NEGRI, M.; BASSANI, C. A.; LAMPERTICO, T.: The Role of Digital Technologies in Operationalizing the Circular Economy Transition: A Systematic Literature Review. In: Applied Sciences 11 (2021) 8, S. 1–34.
- CATENA-X AUTOMOTIVE NETWORK E. V. (Hrsg.): Catena-X. The First Open and Collaborative Data Ecosystem. Last Revision; 31.07.2023. Version 3.0. https://catena-x.net/fileadmin/user_upload/Vereinsdokumente/Catena-X_general_presentation.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- CHANDRASEKHAR, R.; FRASER JOHNSON, P.: John Deere Reman: Creating Value through Reverse Logistics. 04.05.2018. <https://hbsp.harvard.edu/product/W18286-PDF-ENG> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- CHATZIDIMITRIOU, T.; GENTIMIS, T.; MICHALOPOULOS, C.; KOKOSSIS, A. C.; DALAMAGAS, T.: Intelligent Management Platform for Material Exchange Optimization and Industrial Symbiosis. In: 31st European Symposium on Computer Aided Process Engineering. ESCAPE-31. Hrsg.: M. Türkay; R. Gani. Computer Aided Chemical Engineering. Elsevier, Amsterdam [u. a.] 2021, S. 761–766.
- CHEN, P. P.-S.: The entity-relationship model – toward a unified view of data. In: ACM Transactions on Database Systems 1 (1976) 1, S. 9–36.
- COHEN, J.; GIL, J.: An entity-relationship model of the flow of waste and resources in city-regions: Improving knowledge management for the circular economy. In: Resources, Conservation & Recycling Advances 12 (2021), 23

- CONRAD, R.; HOEBORN, G.; NEUDERT, P. K.; BETZ, C.: Seizing the Potentials of Ecosystems. FIR an der RWTH Aachen, Aachen 2022. https://www.fir.rwth-aachen.de/fileadmin/publikationen/download/fir-whitepaper-seizing-the-potentials-of-ecosystems_j36sU3OFzw.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- COOPER, H. M.: Organizing knowledge syntheses: A taxonomy of literature reviews. In: Knowledge in Society 1 (1988) 1, S. 104–126.
- DABBOUS, A.; TARHINI, A.: Does sharing economy promote sustainable economic development and energy efficiency? Evidence from OECD countries. In: Journal of Innovation & Knowledge 6 (2021) 1, S. 58–68.
- DAIMLER AG (Hrsg.): Mercedes AT-Teile: Ein Tauschgeschäft, das sich lohnt? Andreas Jörg im Interview: Was steckt hinter dem Begriff “Remanufacturing”? 29.12.2019. <https://www.mercedes-fans.de/magazin/sternstunde/andreas-joerg-im-interview-was-steckt-hinter-dem-begriff-remanufacturing-remanufacturing-ein-tauschgeschaef-t-das-sich-lohnt.15371> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- DEN OUDEN, E.: Innovation Design. Creating Value for People, Organizations and Society. Springer, Dordrecht [u. a.] 2011.
- DIN 77005-1: Lebenslaufakte für technische Anlagen – Teil 1: Strukturelle und inhaltliche Festlegungen. Deutsches Institut für Normung; ICS: 01.110. Beuth, Berlin, September 2018.
- DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. Deutsches Institut für Normung e. V.; ICS: 01.040.25; 25.020. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2022.
- DIN SPEC 91345: DIN SPEC 91345:2016-04. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.; ICS: 03.100.01; 25.040.01; 35.240.50. Beuth, April 2016.
- DMG MORI AG (Hrsg.): Sustainability Report 2021. Bielefeld [u. a.] 2021. <https://en.dmgmori-ag.com/resource/blob/631334/821fbcc476cbe398a87f6023e92735cb7/dmgmorisr21e-data.pdf> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- DONETSKAYA, J. V.; GATCHIN, Y. A.: A generalization of approaches to creating a digital passport supporting the stages of the electronic product life cycle and the features of the formation of design decisions based on it. In: Industry 4.0: International Scientific Journal 5 (2020) 3, S. 101–104. [=2020a]
- DONETSKAYA, J. V.; GATCHIN, Y. A.: Development of design procedures for the synthesis of design solutions for data management, design and production procedures at the stages of the life cycle of an electronic product. In: 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WE-CONF). Hrsg.: St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUA). IEEE, Piscataway (NJ) 2020, S. 1–5. [=2020b]
- DONETSKAYA, J. V.; GATCHIN, Y. A.: Development of Requirements for The Content of a Digital Passport and Design Solutions. In: Journal of Physics: Conference Series (2021) 1828, 7 S. [=2020a]

- DONETSKAYA, J. V.; GATCHIN, Y. A.: Development of a Modular Structure for a Digital Passport of an Electronic Product at Instrument-Making Industry Enterprises. In: 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). Hrsg.: St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUA). IEEE, Piscataway (NJ) 2021, 5 S. [=2020b]
- EIGNER, M.: System Lifecycle Management. Digitalisierung des Engineering. Springer Vieweg, Berlin 2021.
- EIGNER, M.; DETZNER, A.; SCHMIDT, P. H.; THARMA, R.: Definition des Digital Twin im Produktlebenszyklus. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114 (2019) 6, S. 345–350.
- EIGNER, M.; STELZER, R.: Product-lifecycle-Management. Ein Leitfaden für Product Development und Life-cycle-Management. 2., neu bearb. Auflage. Springer, Berlin [u. a.] 2009.
- EISENHARDT, K. M.: Building Theories from Case Study Research. In: The Academy of Management Review 14 (1989) 4, S. 532–550.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (Hrsg.): Towards the circular economy; Vol. 1: An economic and business rationale for an accelerated transition. Isle of Wight 2013. <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (Hrsg.): Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition. Isle of Wight, November 2015. https://kidv.nl/media/rapportages/towards_a_circular_economy.pdf?1.2.1 (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- ENERCON GMBH (Hrsg.): Sustainability Report 2020. Aurich 2021. https://assets-global.website-files.com/64c38ca9b1a2e59bd5b7d64a/653bd448fc03fd5e-abde2a3b_ENERCON%20Sustainability%20Report%202020.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- ENSTROM, D. W.: Guideline: CRUD Matrix. http://www.unified-am.com/UAM/UAM/guidances/guidelines/uam_crud-matrix_F56BDB11.html (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- ESMAEILIAN, B.; SARKIS, J.; LEWIS, K.; BEHDAD, S.: Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0. In: Resources, Conservation and Recycling 163 (2020), 15
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (Hrsg.): Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020. Brüssel, 10.12.2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020PC0798> (Link zuletzt geprüft: 03.05.2024).

EUROPEAN COMMISSION (Hrsg.): Commission sets out the path to resource-efficient growth. Brüssel, 20.09.2011. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_11_1046 (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).

EUROPEAN COMMISSION (Hrsg.): Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and social committee and the Committee of the Regions: The European Green Deal. Brüssel, 11.12.2019. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).

EUROPEAN COMMISSION (Hrsg.): Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and social committee and the Committee of the Regions: A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe. Brüssel, 11.03.2020. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024). [=2020a]

EUROPEAN COMMISSION: Green Deal: Sustainable batteries for a circular and climate neutral economy. Brüssel, 10.12.2020. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_2312 (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024). [=2020b]

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA); INSTITUTO SUPERIORE PER LA PROTEZIONE E LA RICERCA AMBIENTALE (ISPRA); EPA NETWORK; SISTEMA NAZIONALE PER LA PROTEZIONE DEL'AMBIENTE (Hrsg.): Bellagio Declaration. Circular Economy Monitoring Principles. Kopenhagen, 4.12.2020. <https://epanet.eea.europa.eu/reports-letters/reports-and-letters/bellagio-declaration.pdf> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).

EUROPEAN UNION (Hrsg.): Product Circularity Data Sheet: a solution to access circularity data. Brüssel, o. J. <https://circularreconomy.europa.eu/platform/en/good-practices/product-circularity-data-sheet-solution-access-circularity-data> (Link zuletzt geprüft: 03.05.2024).

FÄHNRICH, K.-P.: Vorlesung Softwaretechnik. Zusammenfassung. Institut für Informatik und Betriebliche Informationssysteme Universität Leipzig, Wintersemester 2008/2009, Leipzig 2008. http://bis.informatik.uni-leipzig.de/de/Lehre/0809/WS/SWT/files?get=2008w_swv_15zf.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.04.2024)

FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.; NAGARAJAH, A.; PAHL, G.; BEITZ, W.; WARTZACK, S.: Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses. In: Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Hrsg.: J. Feldhusen; K.-H. Grote; G. Pahl; W. Beitz. 8., vollst. überarb. Auflage. Springer Vieweg, Berlin [u. a.] 2013, S. 291–409.

FORRESTER, J. W.: Grundzüge einer Systemtheorie. Gabler, Wiesbaden 1972.

- GADATSCH, A.: Datenmodellierung. Einführung in Die Entity-Relationship-Modellierung und das Relationenmodell. 2., überarb. Auflage. Springer Vieweg, Wiesbaden 2019.
- GARTNER, INC. (HRSG.): Gartner Survey Shows 70 % of Supply Chain Leaders Plan to Invest in the Circular Economy. Only a Minority Link Their Digital and Circular Economy Strategies. Stamford (CT), 26.02.2020. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2020-02-26-gartner-survey-shows-70--of-supply-chain-leaders-plan> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- GATCHIN, Y. A.; DONETSKAYA, J. V.; POLYAKOV, V. I.: Implementation of a Digital Passport for an Electronic Product at an Enterprise. In: 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). Hrsg.: St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUA). IEEE, Piscataway (NJ) 2021, 4 S. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9470562> (Link zuletzt geprüft: 27.04.2024)
- GEA GROUP AG (HRSG.): Nachhaltigkeitsbericht 2021. Düsseldorf 2022. https://www.gea.com/de/binaries/nachhaltigkeitsbericht-2021_tcm24-103140.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- GENERAL ELECTRIC COMPANY (HRSG.): Sustainability Report. Building a World That Works for Tomorrow. Boston (MA) 2022. https://www.ge.com/sites/default/files/ge2021_sustainability_report.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- GEP (HRSG.): What is Product Master Data Management? Glossary. o. J. <https://www.gep.com/knowledge-bank/glossary/what-is-product-master-data-management> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- GLASER, B. G.; STRAUSS, A. L.: The discovery of grounded theory. Strategies for qualitative research. 5. Auflage. Aldine Transaction, New Brunswick [u. a.] 2006.
- GLIGORIC, N.; KRCO, S.; HAKOLA, L.; VEHMAS, K.; DE, S.; MOESSNER, K.; JANSSON, K.; POLENZ, I.; VAN KRANENBURG, R.: Smarttags: IoT product passport for circular economy based on printed sensors and unique item-level identifiers. In: Sensors (Switzerland) 19 (2019) 3, S. 1–26.
- GÖTZ, T.; ADISORN, T.; THOLEN, L.: Der Digitale Produktpass als Politik-Konzept. Kurzstudie im Rahmen der Umweltpolitischen Digitalagenda des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Wuppertal, März 2021. <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7694/file/WR20.pdf> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- GRESCHNER, J.; ZAHN, E.: Strategischer Erfolgsfaktor Information. In: Rechnergestützte Werkzeuge für das Management. Grundlagen, Methoden, Anwendungen. Hrsg.: H. Krallmann. Erich Schmidt Verlag, Berlin 1992, S. 9–29.

- GRIEVES, M.: Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. 2014. <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DEL-MIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- HABERFELLNER, R.; WECK, O. L. de; FRICKE, E.; VÖSSNER, S. (Hrsg.): Systems Engineering. Grundlagen und Anwendung. 14., überarb. Auflage. Orell Füssli, Zürich 2018.
- HAZARD, M.; ANDERSSON, O.: Siemens – Gas Turbines. Business Model Case Study Description. 29.01.2016. <https://www.remanufacturing.eu/studies/b94ff3f294ce337ec7bd.pdf> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- HAZEN, B. T.; RUSSO, I.; CONFENTE, I.; PELLATHY, D.: Supply chain management for circular economy: conceptual framework and research agenda. In: The International Journal of Logistics Management 32 (2021) 2, S. 510–537.
- HEISING, W.; PIDUN, U.; KRÜGER, T.; KÜPPER, D.; SCHÜSSLER, M.: Additive Manufacturing Needs a Business Ecosystem. In: Business Ecosystems. Inspiring the Next Game: Strategy Ideas for Forward Looking Leaders. Hrsg.: M. Reeves; U. Pidun. De Gruyter, Berlin 2022, S. 221–236.
- HINZEN, H.: Basiswissen Maschinenelemente. 3., überarb. u. erw. Auflage. De Gruyter, München Ju. a.] 2020.
- HONIC, M.; KOVACIC, I.; RECHBERGER, H.: Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP): An Austrian case study. In: Journal of Cleaner Production 217 (2019) 20.04.2019, S. 787–797. [=2019a]
- HONIC, M.; KOVACIC, I.; SIBENIK, G.; RECHBERGER, H.: Data- and stakeholder management framework for the implementation of BIM-based Material Passports. In: Journal of Building Engineering 23 (2019) 5, S. 341–350. [=2019b]
- HUXLEY, R. (Hrsg.): The great naturalists. Thames & Hudson, London 2007.
- IEEE COMPUTER SOCIETY (HRSG.): SWEBOK v3.0. Guide to the Software Engineering Body of Knowledge. IEEE, Piscataway (NJ) 2014.
- IJOMAH, W. L.: Addressing decision making for remanufacturing operations and design-for-remanufacture. In: International Journal of Sustainable Engineering 2 (2009) 2, S. 91–102.
- INNOVATIEZUID (Hrsg.): Hightech systemen & materialen. Remanufacturing. Oktober 2013. [in Bibliothek des FIR e. V. an der RWTH Aachen verfügbar]
- INTERNATIONAL DATA CORPORATION (HRSG.): IDC Forecasts Worldwide Market for Used Smartphones to Reach 351.6 Million Units with a Market Value of \$65 Billion in 2024. businesswire, 07.01.2021. <https://www.businesswire.com/news/home/20210107005837/en/IDC-Forecasts-Worldwide-Market-for-Used-Smartphones-to-Reach-351.6-Million-Units-with-a-Market-Value-of-65-Billion-in-2024-According-to-IDC> (Link zuletzt geprüft: 03.05.2024).

- JACOBIDES, M. G.; CENNAMO, C.; GAWER, A.: Towards a theory of ecosystems. In: *Strategic Management Journal* 39 (2018) 8, S. 2255–2276.
- JARILLO, C. T.: On Strategic Networks. In: *Strategic Management Journal* 9 (1988) 1, S. 31–41.
- JOSEFSSON, E.: ES Power AB – Wind Turbines. Business Model Case Study Description. 09.02.2016. <https://www.remanufacturing.eu/studies/294f1faee32e35eff0ee.pdf> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- JUNG, H.; SONG, S.; AHN, Y.-H.; HWANG, H.; SONG, C.-K.: Effects of emission trading schemes on corporate carbon productivity and implications for firm-level responses. In: *Scientific reports* 11 (2021) 1, 10
- JUNGHEINRICH AG (HRSG.): Pioniere der Intralogistik. Geschäftsbericht 2021. Hamburg, 25.03.2022. https://geschaeftsbericht2021.jungheinrich.de/downloads/Jungheinrich_Geschaeftsbericht_2021.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- KALMYKOVA, Y.; SADAGOPAN, M.; ROSADO, L.: Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools. In: *Resources, Conservation and Recycling* 135 (2018) 8, S. 190–201.
- KAMPKER, A.; SCHUH, G.; SCHITTY, B.: Unternehmensstruktur. In: *Strategie und Management produzierender Unternehmen. Handbuch Produktion und Management*; Bd 1. Hrsg.: G. Schuh; A. Kampker. Springer, Berlin [u. a.] 2011, S. 133–230.
- KANDA, W.; GEISSDOERFER, M.; HJELM, O.: From circular business models to circular business ecosystems. In: *Business Strategy and the Environment* 30 (2021) 6, S. 2814–2829.
- KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M.: Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In: *Resources, Conservation and Recycling* 127 (2017) 12, S. 221–232.
- KLENK, F.; GLEICH, K.; MEISTER, F.; HÄFNER, B.; LANZA, G.: Approach for developing implementation strategies for circular economy in global production networks. In: *Procedia CIRP* 90 (2020), S. 127–132.
- KLENK, F.; HÄFNER, B.; LANZA, G.; WAGNER, M.: Kreislaufwirtschaft in globalen Wertschöpfungsnetzwerken. In: *Industrie 4.0 Management* 5 (2019) 6, S. 29–32.
- KLEUKER, S.: Grundkurs Datenbankentwicklung: von der Anforderungsanalyse zur komplexen Datenbankanfrage. 4., aktualis. u. überarb. Auflage. Springer Vie- weg, Wiesbaden 2016.
- KONIETZKO, J.; BOCKEN, N.; HULTINK, E. J.: Circular ecosystem innovation: An initial set of principles. In: *Journal of Cleaner Production* 253 (2020) 20.04.2020, S. 1–28.

- KORTZ, O.; BUTZER, S.: Case Study: Herrenknecht AG. 01.04.2016.
<https://www.remanufacturing.eu/studies/c23028c4f9471ce7175c.pdf> (Link zu-
letzt geprüft: 27.03.2024).
- KRAMER, F.: Innovative Produktpolitik. Strategie – Planung – Entwicklung – Durchset-
zung. Springer, Berlin [u. a.] 1987.
- KRCMAR, H.: Informationsmanagement. 6., überarb. Auflage. Springer Gabler, Berlin
[u. a.] 2015.
- KRISTOFFERSEN, E.; BLOMSMA, F.; MIKALEF, P.; LI, J.: The smart circular economy: A
digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies. In: Journal of Business Research 120 (2020) 4, S. 241–261.
- KRONENBERG, P.; WIECK, F.; WEBER, S.; LÖWER, M.: Intelligentes Nesting in der Kreis-
laufwirtschaft zur Steigerung der Ressourceneffizienz. In: Entwerfen Entwickeln
Erleben in Produktentwicklung und Design 2021. Hrsg.: R. H. Stelzer; J.
Krzywinski. TUDpress, Dresden 2021, S. 673–680.
- KRONES AG (HRSG.): Nichtfinanzieller Bericht 2021. Neutraubling, 16.03.2022.
https://www.krones.com/media/downloads/KRONES_NFB2021_d.pdf (Link zu-
letzt geprüft: 27.03.2024).
- KUBICEK, H.: Heuristische Bezugsrahmen der heuristisch angelegte Forschungsdes-
igns als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung. In: Em-
pirische und handlungstheoretische Forschungskonzeptionen in der Betriebs-
wirtschaftslehre. Bericht über d. Tagung in Aachen, März 1976. Hrsg.: R. Köh-
ler. Poeschel, Stuttgart 1977, S. 3–36.
- LAMBERT, S.: The Importance of Classification to Business Model Research. In: Jour-
nal of Business Models 3 (2015) 1, S. 49–61.
- LAMPSON, B. W.: Protection. In: ACM SIGOPS Operating Systems Review 8 (1974) 1,
S. 18–24.
- LEHNER, F.; MAIER, R.; HILDEBRAND, K.: Wirtschaftsinformatik. Theoretische Grundla-
gen. Hanser, München [u. a.] 1995.
- LEWRICK, M.: Business Ökosystem Design. Ein Paradigmenwechsel in der Gestaltung
von Geschäftsmodellen und Wachstum. Vahlen, München 2021.
- LIEBHERR-INTERNATIONAL AG (HRSG.): Geschäftsbericht 2020. Bulle, 01.04.2021.
https://www.liebherr.com/shared/media/annual-report/annual-report-2020/pdf/liebherr_gesch%C3%A4ftsbericht_2020_de.pdf (Link zuletzt geprüft:
27.03.2024).
- LIEDER, M.; ASIF, F. M. A.; RASHID, A.; MIHELIĆ, A.; KOTNIK, S.: Towards circular econ-
omy implementation in manufacturing systems using a multi-method simulation
approach to link design and business strategy. In: The International Journal of
Advanced Manufacturing Technology 93 (2017) 5-8, S. 1953–1970.

- LINTON, J. D.; JAYARAMAN, V.: A framework for identifying differences and similarities in the managerial competencies associated with different modes of product life extension. In: International Journal of Production Research 43 (2005) 9, S. 1807–1829.
- LUND, R. T.: Remanufacturing. The experience of the United States and implications for developing countries. World Bank, Washington, DC 1984.
- LUSCUERE, L. M.: Materials Passports: Optimising value recovery from materials. In: Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management 170 (2017) 1, S. 25–28.
- LUTTROPP, C.; LAGERSTEDT, J.: EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. In: Journal of Cleaner Production 14 (2006) 15-16, S. 1396–1408.
- LYNCH, P.: How a Transportable Student Village Could Alleviate Copenhagen's Housing Shortage. archdaily, 08.02.2016. <https://www.archdaily.com/781575/cph-containers-designs-transportable-student-village-to-solve-copenhagens-housing-shortage> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- MACIEJ, M.: Refurbished: Was bedeutet das? Giga online, 09.05.2019. <https://www.giga.de/ratgeber/tipps/refurbished-pcs-iphones-und-macs-genevalueberholt-wie-geht-das/> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- MECHLINSKI, T.: Produktdatenmanagement – Anforderungen und Lösungen. Konzeption, Auswahl, Installation und Administration von PDM-Systemen. Springer Vie- weg, Berlin [u. a.] 2021.
- MERCEDES-BENZ GROUP AG (HRSG.): Nachhaltigkeitsbericht 2021. Stuttgart 2022. <https://group.mercedes-benz.com/dokumente/nachhaltigkeit/berichte/mercedes-benz-nachhaltigkeitsbericht-2021.pdf> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- MESTRE, A.; COOPER, T.: Circular Product Design. A Multiple Loops Life Cycle Design Approach for the Circular Economy. In: The Design Journal 20 (2017) sup1, S1620 –S1635.
- MINISTRY OF THE ECONOMY OF LUXEMBOURG (HRSG.): Product Circularity Data Sheet (PCDS) v 3.2s. Circularity Dataset Standardization. 14.02.2020. https://pcds.lu/wp-content/uploads/2020/11/20200214_Light_PCDs_v3.2s_FORM.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- MINISTRY OF THE ECONOMY OF LUXEMBOURG (HRSG.): What is the PCDS? o. J. <https://pcds.lu/pcds-system/#pcds> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G.: Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. In: British Medi- cal Journal 339 (2009), b2535.

- MOHSENI, A.; BUTZER, S.: Case Study: Continental AG. 15.03.2016. <https://www.re-manufacturing.eu/studies/2dbb500acf58f2a116.pdf> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- MOORE, J. F.: Predators and Prey: A New Ecology of Competition. In: Harvard Business Review 71 (1993) 6–7, S. 75–86.
- MOORE, J. F.: The Death of Competition. Leadership and Strategy in the Age of Business Ecosystems. John Wiley & Sons, New York 1996.
- MORRIS, M.: ATP – Automatic dual clutch transmissions. Business Model Case Study Description. Amsterdam, 08.02.2016. <https://www.remanufacturing.eu/studies/bd016c9500524b684ca1.pdf> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- MULHALL, D.; AYED, A.-C.; SCHROEDER, J.; HANSEN, K.; WAUTELET, T.: The Product Circularity Data Sheet – A Standardized Digital Fingerprint for Circular Economy Data about Products. In: Energies 15 (2022) 9, 19 S.
- MÜLLER, F.; KOHLMAYER, R.; KRÜGER, F.; KOSMOL, J.; KRAUSE, S.; DORER, C.; RÖHREICH, M.: Leitsätze einer Kreislaufwirtschaft. Dessau-Roßlau, Februar 2020. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020_04_27_leitlinie_kreislaufwirtschaft_bf.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- MULOT, P.: Linde – Forklift trucks. Business Model Case Study Description, 29.01.2016. <https://www.remanufacturing.eu/studies/a3de0ef53fbba9caac85.pdf> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- MURA, M.; LONGO, M.; ZANNI, S.: Circular economy in Italian SMEs: A multi-method study. In: Journal of Cleaner Production 245 (2020) 2, 16
- NIELSEN, A.: Toyota Material Handling Sweden – Forklift trucks. Business Model Description. Amsterdam, 10.02.2016. <https://www.remanufacturing.eu/studies/c81d0b10b2e16aff607d.pdf> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- NIPPRASCHK, M.; GOLDMANN, D.: Recycling 4.0 – System Dynamics as a Control Tool for Raw Material and Information Flows in the Circular Economy. In: Recycling und Sekundärrohstoffe. Hrsg.: O. Holm; E. Thomé-Kozmiensky; D. Goldmann; B. Friedrich. Recycling und Rohstoffe; Bd. 13. Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2020, S. 610–623.
- O'CONNOR, M. P.; ZIMMERMAN, J. B.; ANASTAS, P. T.; PLATA, D. L.: A Strategy for Material Supply Chain Sustainability: Enabling a Circular Economy in the Electronics Industry through Green Engineering. In: ACS Sustainable Chemistry & Engineering 4 (2016) 11, S. 5879–5888.
- ORMAZABAL, M.; SARRIEGI, J. M.; VILES, E.: Environmental management maturity model for industrial companies. In: Management of Environmental Quality: An International Journal 28 (2017) 5, S. 632–650.

- PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; SHAMSEER, L.; TETZLAFF, J. M.; AKL, E. A.; BRENNAN, S. E.; CHOU, R.; GLANVILLE, J.; GRIMSHAW, J. M.; HRÓBJARTSSON, A.; LALU, M. M.; LI, T.; LODER, E. W.; MAYO-WILSON, E.; McDONALD, S.; MCGUINNESS, L. A.; STEWART, L. A.; THOMAS, J.; TRICCO, A. C.; WELCH, V. A.; WHITING, P.; MOHER, D.: The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. In: *British Medical Journal* 372 (2021), n71, 9
- PARIDA, V.; BURSTRÖM, T.; VISNJIC, I.; WINCENT, J.: Orchestrating industrial ecosystem in circular economy: A two-stage transformation model for large manufacturing companies. In: *Journal of Business Research* 101 (2019) 8, S. 715–725.
- PATZAK, G.: Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken. Springer, Berlin [u. a.] 1982.
- PEARCE, D. W.; TURNER, R. K.: Economics of natural resources and the environment. The Johns Hopkins University Press, Baltimore 1989.
- PELTONIEMI, M.: Cluster, Value Network and Business Ecosystem: Knowledge and Innovation Approach. In: [Proceedings] Organisations, Innovation and Complexity: New Perspectives on the Knowledge Economy. Hrsg.: NEXUS; The Complexity Society; CRIC Centre for Research on Innovation and Competition. University of Manchester, Manchester, 9.9.2004, 9
- PFÄFFLIN, H.: Sind kleine Unternehmen innovativer als große? Ziel der Expertise und Kurzfassung der Ergebnisse, Frankfurt am Main, November 2007.
https://www.igmetall.de/download/0029007_KMU_kom-pakt_11_07_0f44f9e052d1f94765d23b0ad9f9697682bff02f.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 (HRSG.): Die Verwaltungsschale im Detail. Von der Idee zum implementierbaren Konzept. Berlin, 01.07.2019. https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/verwaltungsschale-im-detail-pr%C3%A4sentation.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 (HRSG.): The Asset Administration Shell: Implementing digital twins for use in Industrie 4.0. Berlin, o. J. https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/VWSiD%20V2.0.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (Link zuletzt geprüft: 03.05.2024).
- PLOCIENNIK, C.; POURJAFARIAN, M.; NAZERI, A.; WINDHOLZ, W.; KNETSCH, S.; RICKERT, J.; CIROTH, A.; PRECCI LOPES, A. D. C.; HAGEDORN, T.; VOGELGESANG, M.; BENNER, W.; GASSMANN, A.; BERGWEILER, S.; RUSKOWSKI, M.; SCHEBEK, L.; WEIDENKAFF, A.: Towards a Digital Lifecycle Passport for the Circular Economy. In: *Procedia CIRP* 105 (2022), S. 122–127.

- PORTER, M. E.: Wettbewerbsvorteile (Competitive Advantage). Spitzenleistungen erreichen und behaupten. 8., durchges. Auflage. Campus, Frankfurt am Main [u. a.] 2014.
- PORTILLO-BARCO, C.; CHARNLEY, F.: Data requirements and assessment of technologies enabling a product passport within products exposed to harsh environments: A case study of a high pressure nozzle guide vane. In: International Journal of Product Lifecycle Management 8 (2015) 3, S. 253–282.
- POTTING, J.; HEKKERT, M.; WORRELL, E.; HANEMAAIJER, A.: Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain. Policy Report. Den Haag, Januar 2017. <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- PRAS, A.; SCHOENWAELDER, J.: On the Difference between Information Models and Data Models. Januar 2003. <https://www.rfc-editor.org/info/rfc3444> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- PRICEWATERHOUSECOOPERS (HRSG.): European Chemicals Agency. First ex-post Evaluation of SCIP. Mai 2022. https://echa.europa.eu/documents/10162/6205986/scip_evaluation_report_en.pdf/2c677149-e876-f2b1-0ba7-3daca0a419ef?t=1665556373094 (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- PRIETO-SANDOVAL, V.; JACA, C.; SANTOS, J.; BAUMGARTNER, R. J.; ORMAZABAL, M.: Key strategies, resources, and capabilities for implementing circular economy in industrial small and medium enterprises. In: Corporate Social Responsibility and Environmental Management 26 (2019) 6, S. 1473–1484.
- PROALPHA BUSINESS SOLUTIONS GMBH (HRSG.): Transportinformationen. 27.03.2024. https://docs.proalpha.com/bundle/ApplicationGuide_71/page/topic/s__p_transportinformationen_konzept.html (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- PROALPHA BUSINESS SOLUTIONS GMBH (HRSG.): Produktkonfigurator Quick Guide – Neuerungen IDE. 27.03.2024. https://docs.proalpha.com/bundle/ApplicationGuide_71/page/topic/p__p_produktkonfigurator_quick_guide.html (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- PROALPHA BUSINESS SOLUTIONS GMBH (HRSG.): Allgemeine Baugruppen. 27.03.2024. https://docs.proalpha.com/bundle/ApplicationGuide_71/page/topic/s__p_allgemeine_baugruppen_konzept.html (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- PROALPHA BUSINESS SOLUTIONS GMBH (HRSG.): Stücklisten in der Produktion. 27.03.2024. https://docs.proalpha.com/bundle/ApplicationGuide_71/page/topic/p__p_stuecklisten_konzept.html (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- RANK, O. N.: Unternehmensnetzwerke. Erfassung, Analyse und erfolgreiche Nutzung. Springer Gabler, Wiesbaden 2015.

- RAT FÜR DEUTSCHE RECHTSCHREIBUNG (Hrsg.): [Pressemitteilung] Geschlechtergerechte Schreibung: Empfehlungen vom 26.03.2021. <https://www.rechtschreibrat.com/geschlechtergerechte-schreibung-empfehlungen-vom-26-03-2021/> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- REIKE, D.; VERMEULEN, W. J.; WITJES, S.: The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. In: *Resources, Conservation and Recycling* 135 (2018) 8, S. 246–264.
- RENAULT TRUCKS SASU (Hrsg.): [Pressemitteilung] Circular Economy: Renault Trucks announces the Creation of its Disassembly Plant, the Use Parts Factory. 31.08.2022. <https://www.renault-trucks.com/en/newsroom/press-releases/circular-economy-renault-trucks-announces-creation-its-disassembly-plant> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- RIDDER, D.: Autodesk Fusion 360. Praxiswissen für Konstruktion, 3D-Druck und CNC. 4. Auflage. mitp Verlag, Frechen 2022.
- RIDLEY, S. J.; IJOMAH, W. L.; CORNEY, J. R.: Improving the efficiency of remanufacture through enhanced pre-processing inspection – a comprehensive study of over 2000 engines at Caterpillar remanufacturing, U.K. In: *Production Planning & Control* 30 (2019) 4, S. 259–270.
- RIESENER, M.; KUHN, M.; KEUPER, A.; HELLWIG, F.; SCHUH, G.: Concept for Product Modularization in the Context of Circular Economy. In: *Proceedings. Managing Technology, Engineering and Manufacturing for a Sustainable World*. Hrsg.: D. F. Kocaoglu. IEEE, Piscataway (NJ) 2023, S. 1–9.
- RIESENER, M.; SCHUH, G.; DÖLLE, C.; TÖNNES, C.: The Digital Shadow as Enabler for Data Analytics in Product Life Cycle Management. In: *Procedia CIRP* 84 (2019), S. 729–734.
- RÖNKKÖ, P.; AYATI, S. M.; MAJAVA, J.: Remanufacturing in the Heavy Vehicle Industry—Case Study of a Finnish Machine Manufacturer. In: *Sustainability* 13 (2021) 19, S. 1–15.
- ROSEMANN, M.: Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung: Intention, Entwicklung, Architektur und Multiperspektivität. In: *Informationsmodellierung. Referenzmodelle und Werkzeuge*. Hrsg.: M. Maicher; H.-J. Scheruhn. Springer Gabler, Wiesbaden 1998, S. 1–22.
- SAAD, K. N.; ROUSSEL, P. A.; TIBY, C.: Management der F&E-Strategie. 2. Auflage. Gabler, Wiesbaden 1993.
- Schaeffler AG (Hrsg.): Sustainability Report 2023. <https://www.schaeffler-sustainability-report.com/2023/strategy-and-management/sustainability-strategy> (Link zuletzt geprüft: 06.05.2024)

- SAIDANI, M.; YANNOU, B.; LEROY, Y.; CLUZEL, F.: How to Assess Product Performance in the Circular Economy? Proposed Requirements for the Design of a Circularity Measurement Framework. In: *Recycling* 2 (2017) 1, 6
- SAIDANI, M.; YANNOU, B.; LEROY, Y.; CLUZEL, F.; KENDALL, A.: A taxonomy of circular economy indicators. In: *Journal of Cleaner Production* 207 (2019) 10.01.2019, S. 542–559.
- SCHENCK, D. A.; WILSON, P. R.: *Information modeling. The EXPRESS way*. Oxford University Press, Oxford 1994.
- SCHMIDT, S.; PAMMINGER, R.; WIMMER, W.: Der Circular Economy Analyst. Ein Tool zur Quantifizierung des Umweltnutzens von Kreislaufstrategien. In: *Industrial Life Cycle Management. Innovationen durch Lebenszyklusdenken*. Hrsg.: H. Biedermann; S. Vorbach; W. Posch. *Sustainability Management for Industries*; Bd. 8. Hampp, Augsburg 2019, S. 145–153.
- SCHUH, G.; ANDERL, R.; DUMITRESCU, R.; KRÜGER, A.; HOMPEL, M. ten: *Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies*. München 2020. <https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/download-pdf?lang=en> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- SCHUH, G.; SCHMITZ, S.; LUKAS, G.; NIWAR, L.; WELSING, M.; CALCHERA, R.: Ordnungsrahmen für eine zirkuläre Produktionswirtschaft. In: *Empower Green Production*. Hrsg.: R. Schmitt; T. Bergs; C. Brecher; G. Schuh. Fraunhofer Publica, Aachen 2023, S. 304–334.
- SCHULZ-MÖNNINGHOFF, M.; EVANS, S.: Key tasks for ensuring economic viability of circular projects: Learnings from a real-world project on repurposing electric vehicle batteries. In: *Sustainable Production and Consumption* 35 (2023) 1, S. 559–575.
- SCHUMANN, C.-A.: *Hardware*. In: *Wirtschaftsinformatik. Anwendungsorientierte Einführung*. Hrsg.: W. O. Riemann. 3., völlig neu bearb. u. stark erw. Auflage. Oldenbourg, München [u. a.] 2000, S. 6–47.
- SCHUMANN, H.; MÜLLER, W.: Anforderungen an eine Visualisierung. In: *Visualisierung. Grundlagen und allgemeine Methoden*. Hrsg.: H. Schumann; W. Müller. Springer, Berlin [u. a.] 2000, S. 5–13.
- SELLIEN, R.; SELLIEN, H.: *Gabler Wirtschafts Lexikon*. 12., vollst. neu bearb. u. erw. Auflage. Springer Gabler, Wiesbaden 1988.
- SIEGERS, J.: Gestaltung der intraorganisationalen Zusammenarbeit mithilfe von Social Software. Schriftenreihe Rationalisierung; Bd. 141. RHrsg.: G. Schuh. Apprimus, Aachen 2016. – Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2016.
- SIEMENS AG (HRSG.): SINUMERIK 840D sl, SINAMICS S120 Maschinendaten und Parameter. Listenhandbuch. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/410/74488410/att_50865/v1/LIS1sl_0313_de.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).

- SIEMENS AG (HRSG.): Nachhaltigkeitsbericht 2021. Berlin, 30.11.2021. https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:9972c7d3-52bc-4498-b896-5cdea51a71fb/nachhaltigkeit2021-de.pdf?ste_sid=733881287eba99eb1ccf416c7caf4dd8 (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- SIHVONEN, S.; RITOLA, T.: Conceptualizing ReX for Aggregating End-of-life Strategies in Product Development. In: *Procedia CIRP* 29 (2015), S. 639–644.
- SONG, B.; JIANG, X.; WANG, S.; LIU, Q.; YU, T.: The promotion and application of green remanufacturing: a case study in a machine tool plant. In: *Environmental science and pollution research international* 30 (2023) 3, S. 40870–40885.
- STACHOWIAK, H.: *Allgemeine Modelltheorie*. Springer, Wien [u. a.] 1973.
- STARK, J.: *Product Lifecycle Management; Vol. 1: 21st Century Paradigm for Product Realisation*. 4. Auflage. Springer, Cham [u. a.] 2020.
- STOREY, V. C.: Relational database design based on the entity-relationship model. In: *Data & Knowledge Engineering* 7 (1991) 1, S. 47–83.
- STRATMANN, L.; HOEBORN, G.; PAHL, C.; SCHUH, G.: Classification of Product Data for a Digital Product Passport in the Manufacturing Industry. In: *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics. CPSL 2023*. Hrsg.: D. Herberger; M. Hübner; V. Stich. publish-Ing, Hannover 2023, S. 448–458. https://e-pub.fir.de/frontdoor/deliver/index/docId/2532/file/fir_Stratmann_et_al_Classification_of_product_data_2023_CPSL.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.04.2024)
- SYDOW, J.: *Strategische Netzwerke. Evolution und Organisation*. Gabler, Wiesbaden 1992, Nachdruck 2005.
- TAKACS, F.; STECHOW, R.; FRANKENBERGER, K.: Circular Ecosystems. Business Model Innovation for the Circular Economy. St. Gallen 2020. <https://www.alexandria.unisg.ch/server/api/core/bitstreams/80845b25-a08c-4633-b118-3d2ae0682714/content> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- TEECE, D. J.: Explicating Dynamic Capabilities: the Nature and Microfoundations of (sustainable) Enterprise Performance. In: *Strategic Management Journal* 28 (2007) 13, S. 1319–1350.
- THIERRY, M.; SALOMON, M.; VAN NUNEN, J.; VAN WASSENHOVE, L.: Strategic Issues in Product Recovery Management. In: *California Management Review* 37 (1995) 2, S. 114–136.
- THOMAS, O.; SCHEER, A.-W.: Verfahren und Werkzeuge zur Informationsmodellierung. In: *Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung*. Hrsg.: D. Spath; E. Westkämper. 4., bearb. u. erg. Auflage. Springer, Berlin [u. a.] 2016, S. 1–30.

- TOFT-JENSEN, S.: Borg Automotive – Steering racks. Business Model Case Study Description. 08.02.2016. <https://www.remanufacturing.eu/studies/f3e847489b9b55d92c82.pdf> (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- TOLIO, T.; BERNARD, A.; COLLEDANI, M.; KARA, S.; SELIGER, G.; DUFLOU, J.; BATTIAIA, O.; TAKATA, S.: Design, management and control of demanufacturing and remanufacturing systems. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology 66 (2017) 2, S. 585–609.
- TOMCZAK, T.: Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft: Ein Plädoyer für den qualitativen Forschungsansatz. In: Marketing ZFP 14 (1992) 2, S. 77–86.
- TORRACO, R. J.: Writing Integrative Literature Reviews: Guidelines and Examples. In: Human Resource Development Review 4 (2005) 3, S. 356–367.
- TRANSPORT CANADA (HRSG.): Standard 625 Appendix C: Out of Phase Tasks and Equipment Maintenance Requirements – Canadian Aviation Regulations (CARs). SOR/96-433. Canada Aviation Regulations (SOR/96-433), 01.08.2019.
- TREVISAN, A. H.; CASTRO, C. G.; GOMES, L.; MASCARENHAS, J.: Unlocking the circular ecosystem concept: Evolution, current research, and future directions. In: Sustainable Production and Consumption 29 (2022) 98, S. 286–298.
- TRUMPF GMBH + Co. KG (HRSG.): draußen. Geschäftsbericht 2020/21. Ditzingen, 07.09.2021. https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Corporate/Annual_report/Archive/TRUMPF-Geschaeftsbericht-2020-2021.pdf (Link zuletzt geprüft: 28.03.2024).
- TUKKER, A.: Eight types of product–service system: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet. In: Business Strategy and the Environment 13 (2004) 4, S. 246–260.
- TURNER, R. K.; PEARCE, D. W.; BATEMAN, I.: Environmental economics. An elementary introduction. Johns Hopkins University Press, Baltimore 1993.
- ULRICH, H.: Die Unternehmung als produktives soziales System. Grundlagen der allgemeinen Unternehmungslehre. 2., überarb. Auflage. Haupt, Bern [u. a.] 1970.
- ULRICH, H.: Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. In: Die Führung des Betriebes. Curt Sandig zu seinem 80. Geburtstag gewidmet. Hrsg.: M. N. Geist; R. Köhler. Poeschel, Stuttgart 1981, S. 1–25.
- ULRICH, P.; HILL, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). In: WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium 5 (1976) 7, S. 304–309. <https://www.alexandria.unisg.ch/bitstreams/4bc15391-1767-4cc5-94c4-2cf222e37024/download> (Link zuletzt geprüft: 27.04.2024)
- VAN RANDEN, H. J.; BERCKER, C.; FIELM, J.: Anwenderrolle und Zugriffsrecht. In: Einführung in UML. Analyse und Entwurf von Software. Hrsg.: H. J. van Randen; C. Bercker; J. Fieml. Springer Vieweg, Wiesbaden 2016, S. 45–51.

- VANEGAS, P.; PEETERS, J. R.; CATTRYSSE, D.; TECCHIO, P.; ARDENTE, F.; MATHIEUX, F.; DEWULF, W.; DUFLOU, J. R.: Ease of disassembly of products to support circular economy strategies. In: *Resources, Conservation and Recycling* 135 (2018) 8, S. 323–334.
- VDI-RICHTLINIE 2219: *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung*. Verein Deutscher Ingenieure; ICS: 03.100.40, 35.240.10, 35.240.50. Verein Deutscher Ingenieure e. V., Düsseldorf, September 2016.
- VESSEY, I.; RAMESH, V.; GLASS, R. L.: A unified classification system for research in the computing disciplines. In: *Information and Software Technology* 47 (2005) 4, S. 245–255.
- VESTAS WIND SYSTEMS A/S (HRSG.): *Leading the energy transition. Sustainability Report 2021*. Aarhus 2022. <https://www.vestas.de/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/sustainability-reports/Sustainability%20Report%202021.pdf.coredownload.inline.pdf> (Link zuletzt geprüft: 28.03.2024).
- VOLKSWAGEN AG (HRSG.): *Nachhaltigkeitsbericht 2021*. Wolfsburg, März 2022. https://www.volkswagenag.com/presence/nachhaltigkeit/documents/sustainability-report/2021/Nichtfinanzialer_Bericht_2021_d.pdf (Link zuletzt geprüft: 27.03.2024).
- VOM BROCKE, J.: *Referenzmodellierung. Gestaltung und Verteilung von Konstruktionsprozessen*. Logos, Berlin 2003.
- VOM BROCKE, J.; SIMONS, A.; NIEHAVES, B.; RIEMER, K.; PLATTFAUT, R.; CLEVEN, A.: Reconstructing the Giant: On the Importance of Rigour in Documenting the Literature Search Process. In: *Proceedings of the 17th European Conference on Information Systems, ECIS 2009*, Verona, Italy, 8–10 June 2009. Hrsg.: S. Newell; E. A. Whitley; N. Pouloudi; J. Wareham; L. Mathiassen. AISeL, New York, 2009, S. 2206–2217.
- WAGNER, L.: *Grundbegriffe*. In: *Wirtschaftsinformatik. Anwendungsorientierte Einführung*. Hrsg.: W. O. Riemann. 3., völlig neu bearb. u. stark erw. Auflage. Oldenbourg, München [u. a.] 2000, S. 1–5.
- WALDEN, J.; STEINBRECHER, A.; MARINKOVIC, M.: Digital Product Passports as Enabler of the Circular Economy. In: *Chemie Ingenieur Technik* 93 (2021) 11, S. 1717–1727.
- WALKER, S.; COLEMAN, N.; HODGSON, P.; COLLINS, N.; BRIMACOMBE, L.: Evaluating the Environmental Dimension of Material Efficiency Strategies Relating to the Circular Economy. In: *Sustainability* 10 (2018) 3, S. 1–14.
- WEBSTER, J.; WATSON, R.: Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. In: *MIS Quarterly* 26 (2002), xiii–xxiii.
- WELTER, M.: Die Forschungsmethode der Typisierung. In: *WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 35 (2006) 2, S. 113–116.

- WHEATON, G. R.: Development of a Taxonomy of Human Performance: A Review of Classificatory Systems Relating to Tasks and Performance. Washington, DC, 01.12.1968. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0689411> (Link zuletzt geprüft: 28.03.2024).
- WIENINGER, S.; GÖTZEN, R.; GUDERGAN, G.; WENNING, K. M.: The strategic analysis of business ecosystems. New conception and practical application of a research approach. In: Co-creating our Future: Scaling-up Innovation Capacities through the Design and Engineering of Immersive, Collaborative, Empathic and Cognitive Systems. Conference Proceedings ICE/IEEE ITMC 2019 #47383. Hrsg.: IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway (NJ) 2019, 8
- WIENINGER, S. S.: Vertrauen in Unternehmensnetzwerken durch Blockchain-Technologie. Schriftenreihe Rationalisierung; Bd. 174. RHrsg.: G. Schuh. Apprimus, Aachen 2020. – Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2020. <https://publications.rwth-aachen.de/record/795822> (Link zuletzt geprüft: 28.03.2024).
- WILDE, T.; HESS, T.: Forschungsmethoden der Wirtschaftsinformatik. Eine empirische Untersuchung. In: Wirtschaftsinformatik 49 (2007) 4, S. 280–287.
- WINZER, P.: Generic Systems Engineering. Ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung. 2. Auflage. Springer Vieweg, Berlin [u. a.] 2016.
- WOLL, A. (Hrsg.): Wirtschaftslexikon. 10., vollst. neu bearb. Auflage. Oldenbourg, München [u. a.] 2008.
- WOLLMANN, R.: Warenkennzeichnung. In: Masing Handbuch Qualitätsmanagement. Hrsg.: T. Pfeifer; R. Schmitt. 6., überarb. Auflage. Hanser, München [u. a.] 2014, S. 769–786.
- WORRELL, E.; REUTER, M. A.: Definitions and Terminology. In: Handbook of Recycling. State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists. Hrsg.: E. Worrell; M. A. Reuter. Elsevier, Amsterdam [u. a.] 2014, S. 9–16.
- YIN, R. K.: Case Study Research. Design and Methods. 3. Auflage. SAGE Publications, Thousand Oaks (CA) [u. a.] 2003.
- ZELEWSKI, S.: Grundlagen. In: Betriebswirtschaftslehre. Grundlagen, Internes Rechnungswesen, Externes Rechnungswesen, Beschaffung, Produktion und Logistik, Marketing, Investition und Finanzierung. Hrsg.: H. Corsten; M. Reiß. 4., vollst. überarb. u. wes. erw. Edition. Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre; Bd. 1. Oldenbourg, München [u. a.] 2008, S. 3–97.

Anhang

A1 Literatur zur Anforderungsanalyse aus Kapitel 5.3

Tabelle A1-1: Liste der untersuchten Literatur im Rahmen der Anforderungsanalyse

Titel	Kurzverweis
Towards a Digital Lifecycle Passport for the Circular Economy	PLOCIENNIK ET AL. 2022
A generalization of approaches to creating a digital passport supporting the stages of the electronic product life cycle and the features of the formation of design decisions based on it	DONETSKAYA U. GATCHIN 2020a
Umweltpolitische Digitalagenda	BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) 2020
Leitsätze einer Kreislaufwirtschaft	MÜLLER ET AL. 2020
Materials Passports: Optimising value recovery from materials	LUSCUERE 2017
The European Green Deal	EUROPEAN COMMISSION 2019
Recycling 4.0 – System Dynamics as a Control Tool for Raw Material and Information Flows in the Circular Economy	NIPPRASCHK U. GOLDMANN 2020
Data requirements and assessment of technologies enabling a product passport within products exposed to harsh environments: A case study of a high pressure	PORTILLO-BARCO U. CHARNLEY 2015
Digital battery passports to enable circular and sustainable value chains: Conceptualization and use cases	BERGER ET AL. 2022
Digital Product Passports as Enabler of the Circular Economy	WALDEN ET AL. 2021
Overcoming Information Asymmetry in the Plastics Value Chain with Digital Product Passports	BERG ET AL. 2022
Der Digitale Produktpass als Politik-Konzept	GÖTZ ET AL. 2021
Towards a Digital Product Passport Fit for Contributing to a Circular Economy	ADISORN ET AL. 2021
Development of Requirements for The Content of a Digital Passport and Design Solutions	DONETSKAYA U. GATCHIN 2021a
Development of design procedures for the synthesis of design solutions for data management, design and production procedures at the stages of the life cycle of an electronic product	DONETSKAYA U. GATCHIN 2020b

Development of a Modular Structure for a Digital Passport of an Electronic Product at Instrument-Making Industry Enterprises	DONETSKAYA U. GATCHIN 2021b
Implementation of a Digital Passport for an Electronic Product at an Enterprise	GATCHIN ET AL. 2021
How to Assess Product Performance in the Circular Economy? Proposed Requirements for the Design of a Circularity Measurement Framework	SAIDANI ET AL. 2017
A taxonomy of circular economy indicators	SAIDANI ET AL. 2019
Industrie 4.0 & Kreislaufwirtschaft	BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMUV) 2023

A2 Definitionen der Informationseinheiten aus Kapitel 5.3

Unter-kategorie	Informations-einheiten	Definition und Relevanz	Literatur
Geometrische Informationen		Beschreibung einer dreidimensionalen Produktmodellierung als Grundlage des Produktdesigns	EIGNER U. STELZER 2009, MECHLINSKI 2021
	CAD-Modelle	Mehrdimensionale digitale Rekonstruktionen von Maschinen und Komponenten	SCHUH U. KAMPER 2011, STARK 2020
	Simulationsdaten	Modellierung von Produkteigenschaften und Verringerung des Aufwands von Neuprogrammierungen zur Wiederverwendung von Komponenten und Produkten	STARK 2020
	Baugruppen	Detaillierung des Zusammenwirkens mehrerer Einzelteile, die in ihrer Gesamtheit eine Einheit bilden	PROALPHA BUSINESS SOLUTIONS GMBH 2023c
Material-informationen	Komponenten-verbindungen	Schnittstellen und Verbindungselemente, die zum Zusammenfügen der Einzelteile zu Baugruppen sowie der Baugruppen zum Gesamtprodukt erforderlich sind	HINZEN 2020
	Zusammenfassung von Informationen zu Materialzusammensetzungen und Oberflächenbeschaffenheiten		
	Materialzusam-mensetzungen	Bestandteile und Inhaltsstoffe eines Produkts, das als zentrale politische Anforderung vor dem Hintergrund des Recyclings gestellt wird	BMU 2020
Identifikations-informationen	Oberflächen-beschaffenheiten	Beschreibung der Eigenschaften der äußeren Schicht von Bauteilen und Komponenten zur Instandsetzung technischer Oberflächen	EIGNER U. STELZER 2009, SCHUH U. KAMPER 2011
	Eindeutige Zuordnungsfähigkeit und Beschreibung eines Ausgangsprodukts		
	Identifikations-nummern	Zuordnungsfähigkeit einer Nummer zur individuellen Maschine und elementarer Bestandteil für die Erstellung eines digitalen Produktpasses	EIGNER ET AL. 2019
Herstellungs-informationen	Konfigurations-daten	Versionierung und auftragsabhängige Maschinen-ausstattung	PROALPHA BUSINESS SOLUTIONS GMBH 2023d, STARK 2020
	Produktkategorien	Beschreibung des Maschinentyps und der Granularität (Komponente, Einzelteil oder Endprodukt)	DONETSKAYA U. GATCHIN 2020b
	Informationsumfang zur Montage, Demontage und Herstellung		
	Montage-informationen	Anwendungsfreundliche Informationen zum Produktdesign zur Realisierung einer einfachen Demontage, Instandsetzung und Montage	ADISORN ET AL. 2021, GÖTZ ET AL. 2021, NIPPRASCHK U. GOLDMANN 2020
Herstellungs-informationen	Demontage-informationen	Darstellung der mengenmäßigen und strukturellen Zusammensetzung einer Maschine durch erforderliche Baugruppen, Einzelteile und Rohstoffe	PROALPHA BUSINESS SOLUTIONS GMBH 2023a
	Stücklisten	„Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern, einschließlich der Verfahren zur Gewinnung erster Formen aus dem formlosen Zustand, zur Veränderung dieser Form sowie zur Veränderung der Stoffeigenschaften.“	DIN 8580, S. 4
Abbildung A2-1: Beschreibung der Informationseinheiten aus der Unterkategorie <i>Statische Produktinformationen</i> (1/2)			

Unter-kategorie	Informations-entitäten	Definition	Literatur
System-informationen		Beschreibung von digitalen und softwarebasierten Informationsentitäten	EIGNER U. STELZER 2009
	Software-informationen	Beschreibung angewandter Computersprachen und Programme zur Steuerung und Analyse von Maschinen	RIEMANN 2000
	Digitale Schnittstellen	Bereitstellung von Datenverbindungen zwischen Recheneinheit und externen Geräten	RIEMANN 2000
	Funktions-erweiterungen	Eigenständige oder frei verfügbare Softwarepakete zur Anbindung bestehender Schnittstellen	BAEUMLE-COURTH ET AL. 2004
Anwendungs-informationen		Lieferung von Informationen an den Nutzer zur Sicherstellung einer effizienten und ordnungsgemäßen Maschinen Nutzung	LUSCUERE 2017, EIGNER U. STELZER 2009
	Produkt-beschreibungen	Präsentation von Produkteigenschaften, z. B. in Form von Datenblättern	ADISORN ET AL. 2021
	Produkt-kennzeichnungen	Offenlegung von öffentlich standardisierten Eigenschaften und Beschaffenheiten eines Produkts für den Nutzer	WOLLMANN 2014
	Betriebs-anweisungen	Informationen zur Konfiguration des optimalen Betriebspunkts einer Maschine oder Anlage	HAZARD U. ANDERSSON 2016
	Anwendungs-bereiche	Informationen zur Eignungsprüfung einer Maschine oder Anlage für bestimmte Anwendungsfälle	BERGER ET AL. 2022
Logistik-informationen		Lagerung und zum Transport von Maschinen und Anlagen	NIPPRASCHK U. GOLDMANN 2020
	Lager-informationen	Vorgaben zur maschinengerechten Verwahrung und langfristigen Aufbewahrung von Investitionsgütern	KORTZ U. BUTZER 2016
	Transport-informationen	Vorgaben zu Transportmittelarten und erforderlichen Packmitteln zum Transport	PROALPHA BUSINESS SOLUTIONS GMBH 2023b
Qualitäts-informationen		Einhaltende und verwendete Normen, Regularien und Standards	
	Qualitäts-anforderungen	Anforderungen zur Sicherstellung der vorgeschriebenen Produktcharakteristika	STARK 2020
	Prüfvorschriften	Vorgaben zur originalgetreuen Einhaltung eines Betriebs über mehrere Nutzungszyklen.	STARK 2020
	Patent-informationen	Beschreibung von geistigem Eigentum an einem Produkt	STARK 2020
	Normen und Standards	Offenlegung von angewandten Standards und Normen zur verbesserten Interaktion der Akteure der Kreislaufwirtschaft	GÖTZ ET AL. 2021, PLOCIENNIK ET AL. 2022, DIN 77005-1

Abbildung A2-2: Beschreibung der Informationsentitäten aus der Unterkategorie *Statische Produktinformationen* (2/2)

Unter-kategorie	Informations-entitäten	Definition	Literatur
Produktwert		Beschreibung des betriebswirtschaftlichen und monetären Gegenwerts einer Maschine zum Zugriffszeitpunkts des digitalen Produktpasses	WALDEN ET AL. 2021
	Marktbewertungen	Nutzung vorhandener Marktdaten für eine aktuelle, maschinenspezifische Marktbewertung über die reine Restwertkalkulation hinaus	
	Listenpreise	Ursprungspreis vom Hersteller zur Transparenz über den monetären Werterhalt oder -verfall	
Zustands-informationen		Bewertung des Status und der Kondition einer Maschine im Lebenszyklus	
	Fertigungszustand	Beschreibung des Maschinenstatus in Kriterien wie <i>in Produktion, in Auslieferung, im operativen Betrieb oder in Aufbereitung</i>	DONETSKAYA U. GATCHIN 2020b
	Produktzustände	Realisierung von Transparenz über den Zustand und den technischen Status eines Produkts	BERG ET AL. 2022, BERGER ET AL. 2022, WALDEN ET AL. 2021
	Störungshistorie	Freigabe von Rückschlüssen auf Auslastung und Abnutzung einer Maschine	STARK 2020
Service-informationen		Informationen zur ordnungsgemäßen Instandhaltung von Maschinen und Anlagen	
	Servicehistorie	Bereitstellung von Informationen zu durchgeführten Instandhaltungs-, Wartungs- und Servicearbeiten sowie des durchführenden Unternehmens	BERGER ET AL. 2022
	Instandhaltungs-daten	Dokumente wie Servicehandbücher und Wartungspläne zur vorschriftsgemäßen Durchführung von Service- und Instandhaltungsarbeiten	STARK 2020
	Serviceprozesse	Bereitstellung von Ablaufplänen und Prozessen zur Initiierung und Durchführung von Services	STARK 2020
	Ersatzteil-informationen	Informationen zur Beschaffung erforderlicher Ersatzteile	STARK 2020
Prozess-informationen		Beschreibung von Produktionsprozessen auf den betrachteten Maschinen zur Analyse des Nutzungerverhaltens	
	Nutzungs-umgebungen	Informationsbereitstellung über das Einsatzumfeld einer Maschine zur Weitergabe von Kontext für Aufbereitungsprozesse	PORTILLO-BARCO U. CHARNLEY 2015
	Verfügbarkeits-daten	Beschreibung der Betriebsbereitschaft und Auslastung einer Maschine im operativen Geschäft	HAZARD U. ANDERSSON 2016
	Prozessparameter	Dynamische Daten operativer Variablen wie Betriebsmodi und eingesetzte Kraftstoffe zur Analyse im digitalen Produktpass	HAZARD U. ANDERSSON 2016
Leistungs-informationen		Eingesetzte Energie(-träger) und gelieferte Leistung einer Maschine über den Lebenszyklus	
	Energieverbräuche	Informationen zu Energiekonsum aus dem operativen Betrieb zur Integration in den digitalen Produktpass	PLOCIENNIK ET AL. 2022
	Leistungshistorie	Historische Leistungsdaten aus dem operativen Betrieb zur Einschätzung des Maschinenzustands und Lieferung relevanter Haltbarkeitsinformationen	BERGER ET AL. 2022, STARK 2020

Abbildung A2-3: Beschreibung der Informationsentitäten aus der Unterkategorie *Dynamische Zustandsinformationen*

Unter-kategorie	Informations-entitäten	Definition	Literatur
Nutzer-informationen		Informationen über vorherige Nutzer einer Maschine und individueller Spezifikationen für das vorherige Einsatzgebiet	ADISORN ET AL. 2021, PORTILLO-BARCO U. CHARNLEY 2015, WALDEN ET AL. 2021
	Nutzer-anforderungen	Individuelle Produktanforderungen aus der Auftragsvergabe zur Lieferung von Kontext-informationen der Maschinenkonfiguration	KORTZ U. BUTZER 2016
	Kontakt-informationen	Transparenzschaffung durch Freigabe von Kontaktinformationen zu vorherigen Maschinennutzern	BERGER ET AL. 2022
Herkunfts-informationen		Realisierung einer Rückverfolgbarkeit von Maschinen durch Informationen über Hersteller, Komponentenlieferanten und Wertschöpfungsorte	ADISORN ET AL. 2021, PORTILLO-BARCO U. CHARNLEY 2015, WALDEN ET AL. 2021
	Hersteller-informationen	Informationen zu Produzenten, vorgelagerten Lieferanten und Instandhaltern zur Realisierung einer vollständigen Nachverfolgbarkeit und der Abgrenzung von Verantwortungsbereichen	BERGER ET AL. 2022
	Lieferanten-informationen		
Lokalisations-daten	Produktionsorte	Bereitstellung der Orte der einzelnen Herstellungs-schritte einer Maschine und seiner Komponenten	BERGER ET AL. 2022
		Speicherung von Informationen zum aktuellen Ort einer Maschine oder Anlage	
	Lokalisationsdaten	Maschinenindividuelle Ortsnachverfolgung zum Einstieg von Maschinen- und Komponenten-herstellern in die Kreislaufwirtschaft bestehender Investitionsgüter	WALDEN ET AL. 2021, PORTILLO-BARCO U. CHARNLEY 2015
Konformitäts-daten		Gewährleistung der Richtigkeit des Inhalts des digitalen Produktpasses und Beschreibung von Datenschnittstellen für überprüfende Behörden	GÖTZ ET AL. 2021
	Dokumentation	Bereitstellung von Informationen der verpflichtenden Berichterstattung und Konformitätsregularien	GÖTZ ET AL. 2021, BMU 2020
	Informations-zertifikate	Informationen über Informationssicherheit und Datenschutz bspw. in Form von Sicherheitszertifikaten	GÖTZ ET AL. 2021

Abbildung A2-4: Beschreibung der Informationsentitäten aus der Unterkategorie Wert-schöpfungsnetzwerkinformationen

Unter-kategorie	Informations-entitäten	Definition	Literatur
Ökologische Informationen		Informationen über die Umweltauswirkungen einer Maschine	BERGER ET AL. 2022, GÖTZ ET AL. 2021
	Bewertungs-methoden	Beschreibung der Vorgehensweise zur Kalkulation von Umweltauswirkungen	BERGER ET AL. 2022
	Umwelt-kennzeichnungen	Speicherung erworbenen Umweltstandards und -zertifikat eines Produkts	GÖTZ ET AL. 2021
	Umwelt-auswirkungen	Berechnung des ökologischen Einflusses einer Maschine anhand der ausgewählten Bewertungs-methode	BERGER ET AL. 2022
Soziale Informationen		Dokumentation sozialer Auswirkungen entlang des Produktlebenszyklus und Herstellungsprozesses zur Sicherstellung sozialer Standards	GÖTZ ET AL. 2021, BMU 2020
	Produktions-bedingungen	Bereitstellung von Informationen zu sozialen Bedingungen am Herstellungsort der Investitionsgüter	BERGER ET AL. 2022
	Lieferketten-informationen	Bereitstellung von Informationen zu sozialen Bedingungen entlang der Lieferkette der Zulieferer	BERGER ET AL. 2022
Kreislauf-informationen		Beschreibung der zirkulären Eigenschaften eines Produkts zur Ableitung von Handlungsoptionen am Ende des Produktlebenszyklus	ADISORN ET AL. 2021
	End-of-Life-Management	Informationen zur Ableitung von Optionen zur Weiterverwendung einer Maschine oder Anlage am Produktlebenszyklusende	BERGER ET AL. 2022, ADISORN ET AL. 2021
	Haltbarkeitsdaten	Beschreibung der Herstellerauslegung der Produktlebensdauer zur Einschätzung einer Restlebensdauer zu jeglichen Zeitpunkten im Lebenszyklus	BERGER ET AL. 2022

Abbildung A2-5: Beschreibung der Informationsentitäten aus der Unterkategorie *Nachhaltigkeitsinformationen*

A3 Beschreibung der Fallstudien zirkulärer Ökosysteme

Anhang A3 liefert eine ausführliche Beschreibung der ausgewählten Fallstudien aus Unterkapitel 5.2. Die aufgeführten Fallstudien werden betrachtet, um das zirkuläre Ökosystem von Investitionsgütern zu beschreiben.

Hitachi Construction Machinery Europe | BOOTSMA 2016

Diese Fallstudie beschreibt das Vorgehen des Remanufacturings von Hydraulikpumpen bei Hitachi Construction Machinery Europe (HCME) in Amsterdam. Die Unternehmenssparte beschäftigt dazu 600 Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen in Europa. Bei intensiver Nutzung können die Hydraulikpumpen im Laufe des Lebenszyklus der Maschinen ihre Leistung nicht mehr konstant abrufen und fallen aus. HCME ermöglicht seiner Kundschaft, neben einem Neukauf, in Form der Rücksendung der Pumpe vom Händler zu einem Aufbereitungsort in den Niederlanden, einen Remanufacturing-Prozess zu initiieren. Daneben begegnet HCME der Herausforderung der unstetigen Produktionsplanung über eine webbasierte Nachverfolgungslösung, die einen Überblick über eingehende und ausgehende Komponenten bietet. Im Aufbereitungsort werden die Pumpen zunächst von speziell geschulten Mitarbeitern evaluiert, zerlegt und gruppiert. Laut HCME sind von allen Komponenten 15 % in kritischem Zustand, sodass sie

ersetzt werden müssen. Die verbleibenden 85 % werden gereinigt und erneut evaluiert. Dabei müssen sie technische Spezifikationen erfüllen, die im japanischen Hauptsitz vorab festgelegt wurden und sowohl für gebrauchte als auch für neue Komponenten gelten. Komponenten, die die Anforderungen nicht erfüllen, werden durch neue ersetzt. Nach der anschließenden Endmontage werden die vollständigen Hydraulikpumpen einer abschließenden Prüfung unterzogen, bevor sie wieder auf den Markt gebracht werden. Der Prozess kann mehrmals wiederholt werden, bis ein Bauteil den Spezifikationen nicht mehr gerecht werden kann, sodass es recycelt werden muss.

Diese Fallstudie betrachtet insbesondere den unternehmenseigenen Remanufacturing-Prozess, der sich von Händler bis erneuter Marktreife erstreckt. Darin zeigt sich, dass Hitachi Schwierigkeiten in der Produktionsplanung und Nachverfolgung seiner Produkte hat und diese mithilfe digitaler Entwicklungen zu lösen versucht.

ATP Industries Group | MORRIS 2016

ATP Industries Group Ltd. ist ein weltweit tätiges Unternehmen, das sich auf die Wiederaufbereitung von Autoteilen konzentriert hat. Die Fallstudie handelt von Automatik- und Doppelkupplungsgetrieben bekannter internationaler Automobilhersteller. Wird das Wertschöpfungsnetzwerk betrachtet, das für die Durchführung der Wiederaufbereitung zuständig ist, so besteht es im Kern aus vier Akteuren: dem Automobilhersteller, lokalen Händlern, der Kundschaft sowie ATP als Remanufacturer. In dem beschriebenen Prozess erhält ATP gebrauchte Getriebe von den Herstellern und Händlern aus Kundenbesitz zurück. Die Hersteller und Händler nutzen dazu monetäre Incentivierungsmaßnahmen, um einen kontinuierlichen Rückfluss der Getriebe zu gewährleisten. Im Rahmen des Fallstudiendokuments wird zudem der Prozessplan des Remanufacturing dargelegt: Sobald die Getriebe ausgewiesen ATP-Einrichtungen erreichen, werden sie einer Inspektion unterzogen und einem spezifischen Arbeitsplan zugeordnet. Gemäß vordefinierten Anweisungen werden die Produkte anschließend zerlegt und die einzelnen Komponenten entweder verschrottet und ersetzt oder behandelt, um in den Wiederaufbereitungsprozess zu gelangen. Ebendieser beginnt mit der Reinigung der Teile und der Bewertung ihres Zustands. Abhängig vom Ergebnis dieser Bewertung wird entschieden, ob der Wiederaufbereitungsprozess fortgesetzt, der gesamte Prozess neu gestartet oder das Bauteil verschrottet wird. Der Prozess wird mehrmals durchlaufen, bis alle Teile ihren vorgesehenen Spezifikationen entsprechen. Anschließend werden die Getriebe gemäß den ursprünglichen Produktplänen wieder zusammengebaut und durchlaufen mehrere Qualitätskontrollen. Wenn Produkte den abschließenden Test bestehen, werden sie in einer Datenbank erfasst, verpackt und an den Hersteller oder Händler zurückgeschickt und mit einer einjährigen Garantie verkauft.

Die Fallstudie von ATP zeigt vereinfacht das Ökosystem eines Remanufacturers auf, dessen Kontaktpunkte sich auf den Hersteller und in einigen Fällen Händler beschränken. Weitere Schnittstellen zu Ersatzteillieferanten oder digitalen Marktplätzen finden nicht statt oder werden nicht betrachtet.

PSS – Steering & Hydraulics Division | BRAMMER 2016

PSS – Steering & Hydraulics Division ist ein in Großbritannien ansässiger Hersteller und Wiederaufbereiter von Servolenkungen und Hydraulikprodukten für Lastkraftwagen und Busse. Hervorzuheben an dieser Fallstudie sind zwei sich unterscheidende Kreisläufe, die PSS in seinem Ökosystem aufgebaut hat: Zum einen hat sich ein klassischer Kreislauf etabliert, in dem PSS gebrauchte Produkte direkt vom Hersteller erhält, diese aufbereitet und zurücksendet. Zum anderen hat PSS einen Service- und Aufbereitungskreislauf errichtet, der über den Aftermarket direkt mit der Kundschaft interagiert. Der Kreislauf über den Aftermarket birgt die Besonderheit, dass PSS über eine zusätzliche Zahlung vom Kunden, die höher ist als das aufbereite Produkt selbst, garantiert, dass ebendieser im Gegenzug ein gebrauchtes Produkt zurückgibt. Dies soll sicherstellen, dass PSS einen stetigen Strom von gebrauchten Produkten in gleicher Anzahl aufrechterhalten kann. Der interne Aufbereitungsprozess von PSS beginnt mit der Identifikation der konkreten Produkteigenschaften. Im Anschluss durchläuft es die üblichen Aufbereitungsschritte der Reinigung, Demontage und Komponentenprüfung, deren Ausgang über die weitere Verwendung einzelner Komponenten entscheidet. Die Komponenten werden anschließend gemäß den vorgegebenen Montageprozessen von PSS im Reinraum montiert und nach der finalen Qualitätsüberprüfung neu lackiert und transportfertig gemacht.

Die Fallstudie von PSS beschreibt eine mehrdimensionale Positionierung im Ökosystem der Hydraulikprodukte. Hervorzuheben ist bspw. das monetäre Anreizsystem zur Gewährleistung eines stetigen Aufbereitungsflusses.

Toyota Material Handling Sweden | NIELSEN 2016

Toyota Material Handling Sweden ist ein OER, der als lokale Vertretung Flurförderfahrzeuge von Toyota aufbereitet. Die Wiederaufbereitungswerke sind in Europa verteilt und befinden sich in jedem Land mit einer Vertriebsabteilung. Die betrachtete Fallstudie beschreibt den Remanufacturing-Prozess am Beispiel des schwedischen Werks.

Im Gegensatz zu den vorherigen Fallstudien ist der Rücklauf von Gebrauchtmaschinen auf das Geschäftsmodell von Toyota zurückzuführen. So werden die Flurförderfahrzeuge in der Regel über einen gewissen Zeitraum vermietet oder zum Leasing angeboten, sodass ein Prozess für die Rückläufer entwickelt werden musste. Der Aufbereitungsprozess enthält bei Toyota fünf Schritte: (1) Bei Wareneingang werden die Flurförderfahrzeuge zunächst inspiziert und auf einer Skala von eins bis fünf eingestuft je nach Alter, offensichtlichem Verschleiß und erwarteten Wiederverkaufschancen. (2) Anschließend werden die Fahrzeuge gereinigt und (3) repariert. Die demontierten Komponenten werden in die Kategorien *Verschleißteile*, die unabhängig von ihrem Zustand ausgetauscht werden, und *Funktionale Komponenten*, die anhand definierter Spezifikationen geprüft werden, eingeteilt. Sind davon Bauteile defekt oder nicht funktionsfähig, werden sie repariert oder ersetzt. Ist der Austausch- und Reparaturprozess abgeschlossen, werden die Flurförderfahrzeuge (4) neu lackiert und nach einer abschließenden (5) Qualitätsprüfung in den Vertrieb gegeben. Hier kann betont werden,

dass die wiederaufbereiteten Fahrzeuge über dieselben gleichen Vertriebskanäle wie Neufahrzeuge vertrieben werden. Dies führt zum einen zu einer erhöhten Menge an Rückfragen für aufbereitete Produkte sowie zum Zielkonflikt, dass der Vertrieb traditionell am Verkauf von Neuware bewertet wird.

Diese Fallstudie beschreibt die Wiederaufbereitung in einem B2B-Geschäft, das sehr stark vom eigenen Vertrieb und über eine gute Kundenbindung abhängig ist. Das Ökosystem beschränkt sich daher fast ausschließlich auf die Akteure des OEMs, des OERs und des Kunden.

Remanufacturing von Schwerfahrzeugen in Finnland | RÖNKKÖ ET AL. 2021

Das betrachtete Unternehmen in ein Unternehmen mittlerer Größe, das in einem kleinen, hochspezialisierten Produktsegment für schwere Fahrzeuge agiert. Alle Maschinen werden am Hauptstandort in Finnland montiert. Daneben betreibt das Unternehmen mehrere Tochtergesellschaften weltweit, die Wartungs- und Kundendienstleistungen überwachen. Das Unternehmen setzt dabei neben dem Remanufacturing noch die Kreislaufstrategien des Refurbishings und Recyclings um. Der Remanufacturing-Prozess findet derzeit ausschließlich in Finnland statt. Wenn das Produkt die Fabrik erreicht, wird es in Komponentengruppen zerlegt, die auf Basis des Nutzungsgrads eine Zustandsabschätzung durchführen. Die betrachteten Komponentengruppen umfassen dabei das Schaltgetriebe, die Differenzial- und Planetengetriebe, die Achsen, den Motor sowie hydraulische Bauteile. Die Komponenten werden nach Mindestspezifikationsstandards bewertet, die von der Qualitätsengineering-Abteilung festgelegt wurden. Komponenten, die nicht repariert werden können, werden an das Recyclingzentrum geschickt, um dort die Materialien zurückzugewinnen. Nach der Requalifizierung des Produkts wird es verpackt und an einen neuen Kunden versandt.

Hervorzuheben ist in dieser Fallstudie der Wettbewerb des OERs mit Drittanbietern, die auch Remanufacturing-Services anbieten. Daher untersucht das Unternehmen, inwiefern eine dezentrale Struktur zu Kosteneinsparungen führen kann, um wettbewerbsfähiger zu werden. Zudem steht der Hersteller vor der Herausforderung, ausreichend Anreize zu setzen, um die Gebrauchtfahrzeuge als Grundgerüst zurückzufordern, sodass die Remanufacturing-Abteilung eine ausreichende Auslastung erfährt.

Renault Trucks | BOURGEOIS U. LELEUX 2005

Renault Trucks ist ein europäischer Lastkraftwagen-Hersteller, der in seiner Remanufacturing-Zentrale in Limoges in Frankreich das Remanufacturing von Fahrzeugkomponenten durchführt. Der Remanufacturing-Prozess basiert dazu auf einem Austauschsystem, das dem Kunden eine aufbereitete Komponente anbietet und im Gegenzug eine gebrauchte Komponente erhält. Als vermittelnder Akteur ist zudem ein Renault-Trucks-Händler involviert, der aufgrund abweichender Margen zwischen Neu- und aufbereitetem Bauteil im Normalfall Neuteile favorisiert hat. Die Fallstudie betrachtet des Weiteren den Remanufacturing-Prozess im Detail. Dieser beginnt mit der vollständigen Demontage des Produkts in mehrere Komponentengruppen. Nachfolgend werden die Komponenten gründlich gereinigt und einer Qualitätskontrolle unterzogen,

wobei stark verschlissene Teile ausgesondert und durch neue, originale Komponenten ersetzt werden. Technisch weiterentwickelte Komponenten werden zudem im Rahmen des Remanufacturing-Prozesses verbaut. Nach der Endmontage werden alle Komponenten getestet, lackiert sowie mit einem eindeutigen Kennzeichen versehen. Zum Zeitpunkt der Fallstudie hat Renault Trucks die Entwicklung einer neuen Anlage für das Remanufacturing von kompletten Lastkraftwagen am Ende ihres Lebenszyklus geprüft. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Dissertationsschrift im Jahr 2022 wurde eine Fertigungsstätte zur Demontage von Lastkraftwagen von Renault Trucks in Vénissieux in Frankreich eröffnet (s. RENAULT TRUCKS SASU 2022).

Repurpose von Electric-Vehicle-Batteries | SCHULZ-MÖNNINGHOFF U. EVANS 2023

Diese Fallstudie betrachtet den Reuse- und Repurpose-Prozess von Batterien aus Elektrofahrzeugen des deutschen Premiumherstellers Mercedes-Benz. Das Ziel der Fallstudie ist die Identifikation der wesentlichen Aufgaben und Aktivitäten, die zur wirtschaftlichen Machbarkeit des Repurpose von Fahrzeugbatterien als stationäre Speicher beitragen. SCHULZ-MÖNNINGHOFF U. EVANS beschreiben, dass für den Prozess des Repurpose ein eigenständiger Akteur die Systemintegration übernimmt und dieser im Normalfall nicht mit dem OEM übereinstimmt. Dadurch ergibt sich ein abweichendes Aufgabenprofil für diesen Akteur. Zunächst werden geeignete Fahrzeugbatterien aus dem Gesamtfahrzeugrecyclingprozess ausgewählt und ihre technischen, ökonomischen und ökologischen Eigenschaften geprüft, um ihre Qualität und Eignung für die Weiterverwendung festzustellen. Anschließend werden die Batterien vom Systemintegrator entsprechend modifiziert, sodass sie für ihre neue Verwendung geeignet sind, z. B. als Energiespeicher für erneuerbare Energiesysteme oder als Stromquelle für Elektrofahrzeuge.

Innerhalb dieses Prozesses erhält der Systemintegrator als umsetzende Rolle der Repurpose-Strategie allerdings weitergehende, strategische Aufgaben. So muss zunächst eine Charakterisierung von potenziellen Anwendungsgebieten und passenden Kundengruppen für das Produkt geschaffen werden. Auf dieser Basis lassen sich erst geeignete Architekturen ableiten, die den Repurpose-Prozess wirtschaftlich effizient gestalten. Das veränderte Anwendungsgebiet erfordert darüber hinaus die eigenständige Definition von Qualitätsstandards für aufbereitete Maschinen und Produkte, die dementsprechend neue Lebensdauerabschätzungen erhalten. Aufgrund der wissenschaftlichen Tiefe durch die Autoren beschreibt diese Fallstudie bereits abstrahierte Aufgaben und Aktivitäten, die sich zur Erarbeitung des zirkulären Ökosystems und Rollenprofil im Rahmen dieser Dissertation eignen.

Remanufacturing von Werkzeugmaschinen in China | SONG ET AL. 2023

Die Fallstudie von SONG ET AL. handelt von Werkzeugmaschinenherstellern in China, die Remanufacturing als Geschäftspotenzial aufgrund des alternden Werkzeugmaschinenbestands in China sehen. Die Autoren legen ihren Fokus auf die technologischen Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung des Remanufacturing-Prozesses. So wird aus technologischer Sicht betrachtet, wie defekte Komponenten nicht nur analysiert

und ausgetauscht, sondern mithilfe von Laserauftragsverfahren auch repariert werden können. SONG ET AL. konzentrieren sich dabei auf die Hauptkomponenten mit dem höchsten Aufbereitungspotenzial: Spindeln, Führungsschienen bzw. Schlitten und Getriebe. Hervorzuheben ist die Überarbeitung des Remanufacturing-Prozesses durch die Autoren, die nach der Demontage, Reinigung und ersten Inspektion einen Zwischenschritt der Einschätzung der zu erwartenden Restlebensdauer für Komponenten eingeführt haben. Über mathematische Ermüdungssimulationen soll eine Aussage über die Ausfallwahrscheinlichkeit und den entsprechenden Nutzen der Komponenten für das Remanufacturing getroffen werden. Zudem ist der gesamte Prozess umfangreicher als bisher in den Fallstudien dargestellt, da das Unternehmen ganze Komponenten mithilfe additiver Fertigungsverfahren aufbereitet und somit nicht alle Originaltoleranzen einhaltbar sind.

Obwohl diese Fallstudie keine Einblicke in das zirkuläre Ökosystem des Remanufacturing zulässt, werden viele Details des Aufbereitungsprozesses betrachtet. Somit kann das Aufgabenprofil der entsprechenden Rolle detailliert beschrieben werden.

John Deere Remanufacturing | CHANDRASEKHAR U. FRASER JOHNSON 2018

Diese Fallstudie betrachtet die Umsetzung der Remanufacturing-Strategie von John Deere, einem Landwirtschaftsmaschinenhersteller aus den Vereinigten Staaten von Amerika. Die dafür gegründete Sparte John Deere Reman entstand aus einem Joint-Venture, das mit der Springfield Remanufacturing Corporation 1996 eingegangen wurde. Im Rahmen der Fallstudie wird sich auf das Werk in Edmonton, Alberta konzentriert, das über sieben Funktionsbereiche verfügt: Ein- und Ausgangslogistik, Glasperlenstrahlen, Demontage, Mechanische Fertigung und Wiederaufbereitung, Montage, Qualitätsprüfung und Lackierung und Transport. Aufgrund der kleinen Größe und starken Spezialisierung ist John Deere auf die Entwicklungsleistung seiner Lieferanten angewiesen, weshalb ein Teil des geistigen Eigentums bei den Lieferanten selbst liegt. Dies verhindert bspw. ein umfangreiches Aufbereiten für bestimmte Bereiche der Achsen, da nicht alle Prozessinformationen bekannt sind.

Die Wiederaufbereitung umfasst dabei alle wichtigen Komponenten vom Verbrennungsmotor bis zu elektronischen Komponenten wie Displays. Der eigentliche Remanufacturing-Prozess beginnt mit dem Erwerb von Cores (gebrauchten Produktkernen) aus verschiedenen Quellen, insbesondere Händlern, Reparaturwerkstätten und Lieferanten. Die Verfügbarkeit von Cores ist eine strategische Herausforderung, da Timing und Volumen oft unsicher sind. Die Wiederherstellung der Cores durch verschiedene Technologien, um sie auf das Originalniveau zu bringen, reduziert Materialkosten und ermöglicht es John Deere, sie als überholte Komponenten zu einem geringeren Preis anzubieten. Dazu nutzt auch John Deere ein Anreizsystem über den Preis, der sich aus dem Wert des Ersatzteils und einer Zusatzgebühr für das Zurücksenden der ausgefallenen Komponente zusammensetzt. Diese Zusatzgebühr wird nur bei Rückgabe erstattet. Aufgrund der fehlenden Informationslage bei Produkteingang kann vor der initialen Prüfung kaum abgeschätzt werden, welchen Aufwand und welche Kosten die Aufbereitung der Komponente erforderlich sind. Zwischen einer undichten

Gummidichtung, die schnell ersetzt werden kann, und einem Getriebeschaden, der weitere Bauteile betrifft und einen kompletten Ersatz erfordert, unterscheidet sich der Aufwand enorm.

SparePartsNow | Persönliches Interview

Die SparePartsNow GmbH ist ein Startup aus Aachen, das eine digitale Plattform zum Handel von Ersatzteilen im Werkzeugbau entwickelt hat.⁹ Mit der Plattform verfolgt SparePartsNow das Ziel, den industriellen Austausch von Leistungen zu fairen und transparenten Preisen anbieten zu können.⁹ Dazu werden auf der Plattform neue, gebrauchte und aufbereitete Komponenten von Werkzeugmaschinen angeboten. Die Komponenten umfassen insbesondere stark nachgefragte Ersatzteile wie Dichtungen und Spindeln, aber auch spezialisierte Elektronikkomponenten. Für die Instandhaltung und Aufbereitung von Gebrauchtmaschinen ist das Ersatzteilgeschäft mit gebrauchten und aufbereiteten Komponenten sehr aktiv, da für ältere Modelle oftmals keine neuen Ersatzteile zur Verfügung stehen. Die Nachfrage wird von Servicedienstleistern, die für eine Aufbereitung oder Instandhaltung beauftragt werden, und von unternehmensinternen Instandhaltungsabteilungen bestimmt. Insbesondere kleine Servicedienstleister unterstützen den effizienten Abwicklungsprozess einer digitalen Plattform und bestellen komplett, auftragsspezifische Warenkörbe. Unternehmensinterne Instandhaltungsabteilungen von größeren Unternehmen unterliegen in der Regel Einkaufsbestimmungen, die eine Bestellung über die SparePartsNow-Plattform erschweren.

Auf der Lieferantenseite können drei Rollen unterschieden werden. Spezialisierte Händler (z. B. von Elektronikkomponenten) bieten über SparePartsNow ihre reguläre Ware im Werkzeugmaschinenbereich an. Komponentenlieferanten bieten ihren Ersatzteilkatalog auf der Plattform an und profitieren vom direkten Verkauf ohne Zwischenstation des OEMs. Die dritte Rolle haben Händler inne, die auch einfache Aufbereitungstätigkeiten übernehmen und insbesondere gebrauchte Komponenten anbieten. Insbesondere bei Elektronikkomponenten werden Funktionstests durchgeführt und die neueste Firmware aufgespielt, bevor diese Komponenten vertrieben werden. Zusammenfassend vermittelt die SparePartsNow-Plattform zwischen den Akteuren des zirkulären Ökosystems und deckt damit verschiedene Kreislaufstrategien ab.

⁹ Informationen der Unternehmenswebseite entnommen: <https://www.sparepartsnow.de/business/our-story> (Link zuletzt geprüft: 03.05.2024)

