



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Marius Peters

**Erarbeitung von Richtlinien für eine klimagerechte
Produktentwicklung unter Berücksichtigung von
Digitalisierung und Individualisierung**

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und
Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and Pro-
duction Management*

Marius Peters

**Erarbeitung von Richtlinien für eine klimagerechte
Produktentwicklung unter Berücksichtigung von
Digitalisierung und Individualisierung**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Produktionstechnik- und management
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Udo Pulm
Zweitgutachter: Prof. Dr. Vera Schorbach

Eingereicht am: 19. Mai 2022

Marius Peters

Thema der Arbeit

Erarbeitung von Richtlinien für eine klimagerechte Produktentwicklung unter Berücksichtigung von Digitalisierung und Individualisierung

Stichworte

Klimagerechte Produktentwicklung, Digitalisierung, Produktindividualisierung, Wirkungsanalyse, Design for Climate Change, Digitale Transformation, Industrie 4.0

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit soll zum einen aus theoretischer Sicht aufzeigen, wie die Megatrends klimagerechte Produktentwicklung, Digitalisierung und Produktindividualisierung zusammenhängen und zum anderen sollen die Erkenntnisse dieser Arbeit praktischen Nutzen stiften, indem klare Handlungsempfehlungen für eine klimagerechte Produktentwicklung zum geeigneten Umgang mit den Megatrends Digitalisierung und Produktindividualisierung aufgestellt werden. Diese werden in Form von „Design for Climate Change“-Richtlinien (DfCC-Richtlinien) aufgestellt.

Marius Peters

Title of the paper

Elaboration of guidelines for climate-friendly product development, taking into account digitalization and individualization

Keywords

climate-friendly product development, digitalization, impact analysis, design for climate change, digital transformation, industry 4.0

Abstract

This master thesis is intended to show from a theoretical perspective how the megatrends of climate-friendly product development, digitization and product individualization are interrelated. The findings of this work are intended to provide practical benefits by drawing up clear recommendations for actions on climate-friendly product development to deal appropriately with the megatrends of digitization and product individualization. These will be established in the form of "Design for Climate Change" guidelines (DfCC guidelines).

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	viii
Abbildungsverzeichnis	x
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
2 Vorhandene Ansätze für klimagerechte Produktentwicklung	4
2.1 Eco Design	5
2.1.1 Minimierung des Materialverbrauchs	6
2.1.2 Minimierung des Energieverbrauchs	7
2.1.3 Steigerung der Biokompatibilität und Nutzung erneuerbarer Rohstoffe	8
2.1.4 Optimierung der Produktlebensdauer	9
2.1.5 Wiederverwendbarkeit der Materialien	11
2.1.6 Vereinfachung der Demontage	12
2.2 Design for Enviroment (DfE)	12
2.2.1 Grundlagen der Design for X-Methodik	12
2.2.2 Der DfE-Ansatz	14
2.3 Cradle to Cradle (C2C)	21
3 Klimagerechte Produktentwicklung und der Einfluss der Digitalisierung	26
3.1 Definition Digitalisierung	26
3.2 Potenziale für eine klimagerechte Produktentwicklung	28
3.2.1 Internet of Things	28
3.2.2 Big Data	30
3.2.3 Digitaler Schatten und Digitaler Zwilling	31

3.3	Herausforderungen für eine klimagerechte Produktentwicklung	33
3.3.1	Energiebedarf	33
3.3.2	Bedarf an kritischen Rohstoffen	34
3.3.3	Elektroschrott	37
3.3.4	Rebound Effekte	37
3.4	Zwischenfazit – Einfluss der Digitalisierung	38
4	Produktentwicklung und der Einfluss der Produktindividualisierung	40
4.1	Definition Produktindividualisierung	40
4.2	Herausforderungen für eine klimagerechte Produktentwicklung	42
4.2.1	Kundenintegration	42
4.2.2	Komplexität der Produktentwicklung	44
4.2.3	Modularisierung der Produkte	45
4.2.4	Flexibilität der Produktion	46
4.3	Zwischenfazit – Einfluss der Produktindividualisierung	48
5	Wirkzusammenhänge zwischen der klimagerechten Produktentwicklung, der Digitalisierung und der Produktindividualisierung	50
5.1	Methodik	50
5.2	Schlüsselfaktoren für eine klimagerechte Produktentwicklung	52
5.3	Erstellung einer Design Structure Matrix	54
5.4	Erkenntnisse aus der Design Structure Matrix	56
5.5	Darstellung der Zusammenhänge in einem Causal Loop Diagram	56
5.6	Analyse des Causal Loop Diagram	59
5.7	Bewertung der Ergebnisse	64
6	Allgemeine Richtlinien zur Umsetzung einer klimagerechten Produktentwicklung	66
6.1	Design for Manageability	67
6.1.1	Design for Customer Integration	69
6.1.2	Design for Modularization	71
6.2	Design for Digital Circular Economy	73
6.2.1	Design for Product Service Systems	74
6.2.2	Design for Electronics Recycling	76

7 Zusammenfassung und Ausblick	78
7.1 Zusammenfassung	78
7.2 Limitationen und weiterführende Forschungsansätze	79
Literaturverzeichnis	81

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
C2C	Cradle to Cradle
CLD	Causal Loop Diagram
CPS	Cyber Physische Systeme
DERA	Deutsche Rohstoffagentur
DfCC	Design for Climate Change
DfE	Design for Enviroment
DfS	Design for Sustainability
DfX	Design for X
DIN	Deutsche Industrienorm
DPM	Design Property Matrix
DSM	Design Structure Matrix
IIoT	Industrial Internet of Things
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IoT	Internet of Things
KEA	Kumulierter Energieaufwand
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LiDS Wheel	Lifecycle Design Strategies Wheel
MFD	Modular Function Deployment
MIM	Module Indicator Matrix
PSS	Produkt-Service-Systeme
u.a.	unter anderem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Tabellenverzeichnis

2.1	Ansätze der klimagerechten Produktentwicklung mit ausgewählten Literaturquellen	5
2.2	Leitlinien für die Minimierung des Materialverbrauchs	7
2.3	Leitlinien für die Minimierung des Energieverbrauchs	8
2.4	Leitlinien zur Steigerung der Biokompatibilität	9
2.5	Leitlinien zur Optimierung der Lebensdauer	10
2.6	Leitlinien zur Wiederverwendbarkeit der Materialien	11
2.7	Leitlinien zur Vereinfachung der Demontage	12
2.8	interne und externe Treiber für die Aufstellung von Umweltzielen	18
2.9	Die acht Hauptansatzpunkte des LiDS-Wheels mit möglichen Bewertungskriterien	20
5.1	Die acht Schlüsselfaktoren einer klimagerechten Produktentwicklung	53
5.2	Einflüsse der Digitalisierung und der Produktindividualisierung	54
5.3	Zuordnung der Abkürzungen für die Faktoren des CLD	57
6.1	Richtlinien für Design for Digital Circular Economy	74

Abbildungsverzeichnis

1.1	Beeinflussungsmöglichkeiten der Umweltauswirkungen während des Produktlebenswegs [FM18]	2
2.1	Problematik der umweltgerechten Produktentwicklung [AABR07]	5
2.2	Beispiele für DfX-Strategien	13
2.3	Korrelation zwischen den Konstruktionsphasen und der DfX-Hierarchie am Beispiel DfE (eigene Grafik nach [Bau03])	14
2.4	Vorgehensweise beim DfE-Ansatz nach [The14]	15
2.5	Die vier Abschnitte einer Ökobilanz (eigene Grafik nach [DIN20a])	16
2.6	Beispiel einer Entwicklung der DfE-Richtlinie	18
2.7	Beispiel für ein Ergebnis im LiDS Wheel	20
2.8	Schema des C2C-Ansatzes [EPE22]	23
3.1	Die industrielle Entwicklung im Überblick (eigene Grafik nach [Foi18])	27
3.2	Anwendungsgebiete von IoT [Sma22]	29
3.3	Einsatz der IoT-Technologie für die Effizienzoptimierung während der Nutzungsphase (eigene Grafik nach [EAS16])	30
3.4	Zusammenspiel des Digitalen Schattens mit einem Produktionsprozess [Del17]	32
3.5	Optimierungspotenziale eines digitalen Zwillings hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit	33
3.6	jährlicher, weltweiter Stromverbrauch von IKT-Technologien (eigene Grafik nach [Sei21])	34
3.7	Ressourcenbedarf von Zukunftstechnologien (eigene Grafik nach [DER21])	36
4.1	Produktindividualisierung als Leistungsbündel (in Anlehnung an [Sch03])	41
4.2	Evolution der Fertigungsparadigmen [Kor10]	41
4.3	Individualisierungskonzepte nach Zeitpunkt der Kundenintegration (eigene Grafik nach [Pi03])	43
4.4	Trichtereffekt durch eine modulare Produktstruktur (eigene Grafik nach [Wü21])	45

4.5	Anfallende Kosten in Abhängigkeit von der Flexibilität [Blu06]	48
4.6	Prozessorientierte Produktentwicklung für frei individualisierbare Produkte (eigene Grafik nach [Bog19])	49
5.1	Wie ein System in einer Design Structure Matrix abgebildet wird.	51
5.2	Aufbau eines Causal Loop Diagrams	51
5.3	Design Structure Matrix des untersuchten Systems	55
5.4	Causal Loop Diagram des untersuchten Systems	58
5.5	Wirkungskette des Industrial IoT	59
5.6	Wirkungskette des Consumer IoT	61
5.7	Wirkungskette des Digitalen Zwillings	62
5.8	Wirkungskette des Zeitpunkts der Kundenintegration	63
6.1	Richtlinien für eine DfCC-Strategie	67
6.2	Beispiel eines Baumdiagramms [Bro14]	68
6.3	Frühe bis späte Phasen des Designprozesses [BLK09]	70
6.4	Funktionsweise des Toolkits-Ansatzes (eigene Grafik nach [Hof13])	71
6.5	Aufbau des Modular Function Deployments (nach [Eri98])	72
6.6	Modell des Closed Loop Recycling nach [Kem21]	76

1 Einleitung

Der Klimawandel ist die entscheidende Herausforderung unserer Zeit, und er vollzieht sich schneller als erwartet [PSF09]. Die globale Erderwärmung, die mit dem Klimawandel einhergeht, ist der Haupttreiber für die Folgen des Klimawandels. Das globale Temperaturmittel gegenüber dem vorindustriellen Vergleichszeitraum zwischen 1850 und 1900 ist im Jahr 2020 um 1,1 Grad Celsius gestiegen und wird mit einer zwanzigprozentigen Wahrscheinlichkeit im Zeitraum bis 2024 auf 1,5 Grad Celsius ansteigen [WMO20]. Dieser Trend ist zurückzuführen auf den immer größer werdenden Anteil von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Der von Menschen gemachte anthropogene Treibhauseffekt wird hauptsächlich durch zusätzliche CO₂-Emissionen erzeugt. Alleine im Jahr 2018 wurden 36,6 Milliarden Tonnen CO₂ durch Emissionen freigesetzt [Sta21]. Die Folgen der Erderwärmung sind schon heute zu spüren. Das Eis an den Polarkappen schmilzt, die Wassertemperatur der Ozeane steigt und Extremwetterereignisse wie, Sturm, Starkregen oder Hitzewellen nehmen in ihrer Häufigkeit, Intensität und Dauer zu [Wit20]. Diese Folgen gefährden das gesamte Ökosystem der Erde. Endverbraucher und Investoren erkennen zunehmend die Notwendigkeit nachhaltiger Praktiken und Strategien und sind bereit, neue Technologien zu akzeptieren, mit denen dieses Ziel erreicht werden kann [Met08]. Die Nachfrage nach klimagerechten Produkten wird dadurch immer größer. Die Basis für ein klimafreundliches Produkt ist die Produktentwicklung. Sie hat den größten Einfluss auf die späteren Umweltauswirkungen des Produkts (Abbildung 1.1).

Um erfolgreich eine klimagerechte Produktentwicklung zu etablieren, sollte zuerst einmal geklärt werden, was klimagerechte Produktentwicklung überhaupt bedeutet. Während der Herstellung, Nutzung und End of Life von Produkten werden natürliche Ressourcen genutzt, die unweigerlich mit negativen Umweltauswirkungen verbunden sind. Eine klimagerechte Produktentwicklung soll daher den Fokus legen auf die Minimierung der negativen Umweltauswirkungen oder gar der positiven Beeinflussung der Umwelt von Produkten. Klimagerechte Produktentwicklung beschreibt keinen absoluten Zustand, sondern lediglich eine Innovations-tendenz, die in der heutigen Gesellschaft zunehmend an Bedeutung gewinnt [Tun16].

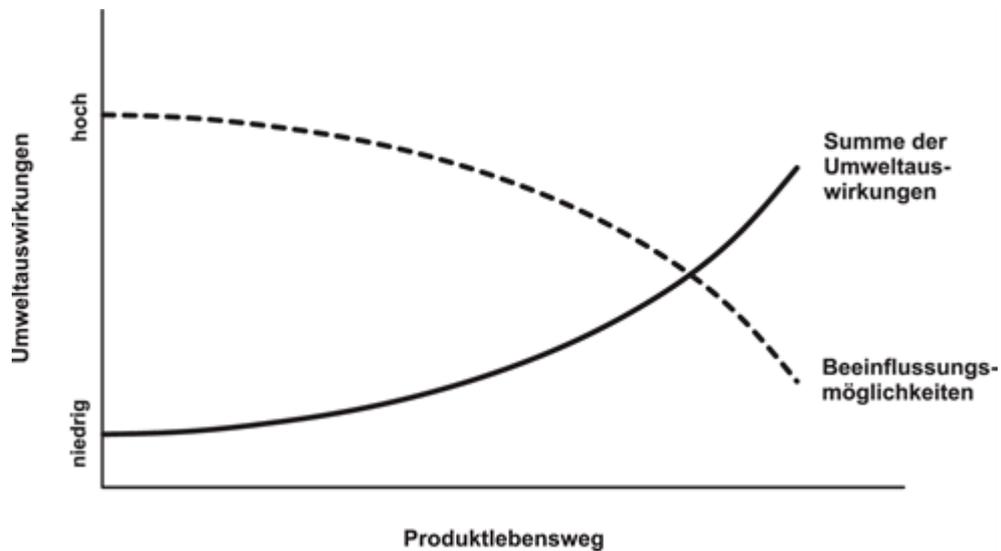


Abbildung 1.1: Beeinflussungsmöglichkeiten der Umweltauswirkungen während des Produktlebenswegs [FM18]

Neben den Nachhaltigkeitsbestrebungen gibt es weitere Trends, die die moderne Produktentwicklung beeinflussen. Einer dieser bedeutenden Trends ist die Digitalisierung. Auch wenn das Phänomen der Digitalisierung nicht neu ist, ist es in letzter Zeit immer mehr in den Fokus der Wissenschaft, der Politik und der Wirtschaft gerückt [Foi18]. Grundsätzlich implizieren aktuelle digitale Entwicklungen einen grundlegenden Umbruch in der Wertschöpfungsstruktur [HJ13]. Die neue Welle digitaler Technologien verspricht flexible, transparente und günstige Wertschöpfungsnetzwerke und treibt damit einen elementaren Strukturwandel an, der globale Märkte, Arbeits- und Wettbewerbsbedingungen, Produktionsprozesse und Konsum betrifft. Damit wirkt sich der Wandel auch maßgeblich auf die Produktentwicklung aus.

Ein weiterer Trend ist die Produktindividualisierung. Durch ihn verändern sich die Marktbedingungen über den Zeitverlauf erheblich. Der Markt wird von einem Verkäufer- zu einem Käufermarkt, der sich durch die Macht der Nachfrager auszeichnet [Bog19]. Durch die Globalisierung und die digitale Vernetzung entsteht ein Angebotsüberhang und Unternehmen müssen gezielter auf die Bedürfnisse der Kunden eingehen, um am Markt bestehen zu können. Das stellt die Produktentwicklung vor neuen Herausforderungen.

1.1 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit soll zum einen aus theoretischer Sicht aufzeigen, wie die Megatrends klimagerechte Produktentwicklung, Digitalisierung und Produktindividualisierung zusammenhängen und zum anderen sollen die Erkenntnisse dieser Arbeit praktischen Nutzen stiften, indem klare Richtlinien für eine klimagerechte Produktentwicklung zum geeigneten Umgang mit den Megatrends Digitalisierung und Produktindividualisierung aufgestellt werden. Dafür werden zu Beginn vorhandene Ansätze für klimagerechte Produktentwicklung vorgestellt, um einen Einstieg in die Thematik zu schaffen und um einen Überblick zu gewinnen. Dann werden in einer Literaturanalyse nacheinander die Einflüsse der Digitalisierung und der Produktindividualisierung auf die klimagerechte Produktentwicklung untersucht und vorgestellt. Anschließend werden die Zusammenhänge zwischen den Einflüssen analysiert, um in einem nächsten Schritt klare Handlungsempfehlungen für die klimagerechte Produktentwicklung in Form von „Design for Climate Change“-Richtlinien (DfCC-Richtlinien) zu erstellen. Abschließend werden Anregungen für weiterführende Untersuchungen gegeben.

2 Vorhandene Ansätze für klimagerechte Produktentwicklung

Für eine Produktentwicklung mit Fokus auf Umweltfreundlichkeit werden unterschiedliche Bezeichnungen verwendet wie z.B. „Design for Enviroment“, „Eco Design“ oder „Life Cycle Design“. Viele dieser Ansätze überschneiden sich und teilweise sind Sie in der Branche nicht einheitlich definiert. So wird beispielsweise im DIN-Fachbericht ISO/TR 14062 Eco Design als „...Integration von Umweltaspekten bei Produktdesign und -entwicklung...“ definiert [DIN03]. Diese Definition ist jedoch, wie die meisten anderen auch, sehr vage und ermöglicht keine eindeutige Abgrenzung dessen, was unter Eco Design verstanden werden kann. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Umweltgerechte Produkte durch optimierte Prozesse, Methoden und Instrumente in der Produktentwicklung“ an der TU Darmstadt, wird unter dem Begriff Eco Design „... die ganzheitliche ökologische, ökonomische und technische Optimierung von Produkten unter Berücksichtigung ihres gesamten Lebensweges“ verstanden [AABR07].

In **Tabelle 2.1** ist eine Liste von vorhandenen Ansätzen für klimagerechte Produktentwicklung aufgeführt. Dazu werden ausgewählte Literaturquellen angegeben, die diese Ansätze beschreiben. Für Arnette (2014) ist Design for Enviroment (DfE) eine Methode von Design of Sustainability (DfS). Dort wird DfE dem DfS Ansatz zugeordnet. DfS entspricht einem größeren Kontext, der nicht nur ökologische Aspekte mitaufnimmt [ABC14]. Cradle to Cradle (C2C) ist eng mit dem Ansatz der Circular Economy verknüpft. Daher werden hier stellvertretend für alle weiteren Ansätze Eco Design, DfE und C2C genauer vorgestellt.

Tabelle 2.1: Ansätze der klimagerechten Produktentwicklung mit ausgewählten Literaturquellen

Ansatz	Literaturquellen
Eco Design	[BH97] [PMR15]
Design for Sustainability	[CG16] [Bha16]
Design for Enviroment	[Fik96] [TSW09]
Cradle to Cradle	[BMB07] [BM14] [BWT10]
Circular Economy	[MSH17] [KNFB18]
Life Cycle Design Method	[Thi19]

2.1 Eco Design

Zentrale Problemstellung, die das Eco Design angeht, ist die bei Beginn des Produktentstehungsprozesses mangelhafte Informationsgrundlage bezüglich der ökologischen Aspekte über das zukünftige Produkt [AABR07]. So ist es schwierig, dessen Umweltwirkungen zu bewerten und ökologisch motivierte Anforderungen festzulegen. Doch gerade zu Beginn sind die Möglichkeiten zur Einflussnahme am größten (Abbildung 2.1).

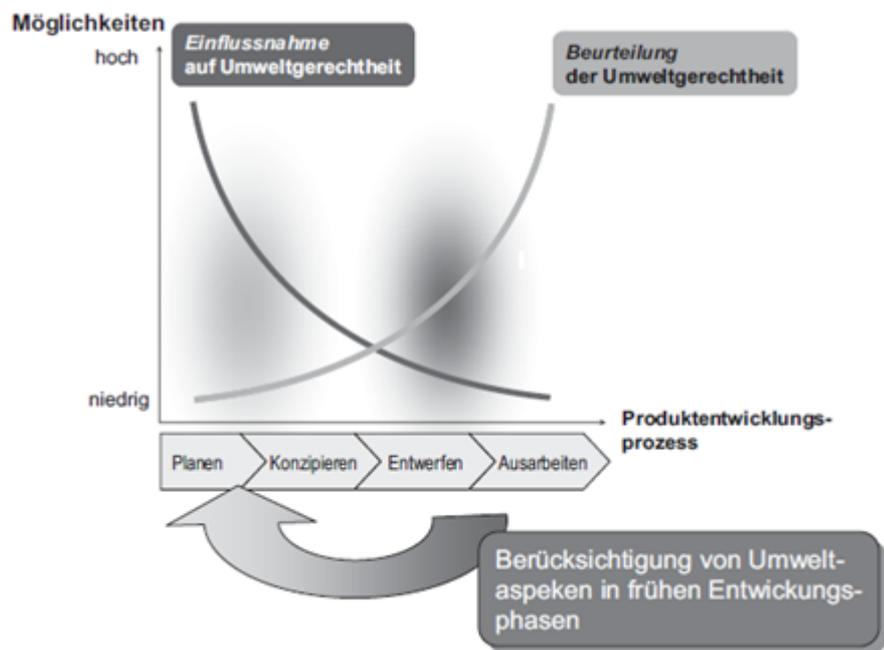


Abbildung 2.1: Problematik der umweltgerechten Produktentwicklung [AABR07]

Das Eco Design Konzept befasst sich mit dem gesamten Produktlebenszyklus. Das bedeutet, dass in allen Produktlebensphasen die Energie-, Ressourcen- und Emissionsflüsse analysiert werden. Ziel ist es, bereits in der Planungsphase ganzheitliche ökologische Optimierungspotenziale zu entdecken und umzusetzen unter Berücksichtigung aller an das Produkt gestellten Anforderungen [AABR07]. Dabei muss immer das Gesamtpaket im Auge behalten werden. Es reicht nicht die Umweltauswirkungen in einer Phase zu optimieren, wenn dadurch in anderen Bereichen diese zunehmen. Dafür wurden Richtlinien und Instrumente entwickelt, die bei der Entscheidungsfindung im Entwicklungsprozess unterstützen sollen.

Grundsätzlich ist die Umsetzung von Eco Design immer ein individuelles Konzept, das in den Entwicklungsprozess des jeweiligen Unternehmens eingearbeitet werden muss. Dabei müssen Unternehmensstrategie, Marktsituation und Kundenwünsche neben weiteren Faktoren berücksichtigt werden [VS06]. Unabhängig von dem konkreten Konzept gibt es einige allgemeine Richtlinien, die bei der Umsetzung des Eco Designs angewendet werden können:

- Minimierung des Materialverbrauchs
- Minimierung des Energieverbrauchs
- Steigerung der Biokompatibilität und Nutzung nachhaltiger Rohstoffe
- Optimierung der Produktlebensdauer
- Wiederverwendbarkeit der Materialien
- Vereinfachung der Demontage

Diese Richtlinien stehen teilweise gegenseitig im Konflikt. So können abfallvermeidende Designs zulasten der Langlebigkeit fallen. Daher gilt es bei der Erstellung des individuellen Entwicklungsprozesses eine geeignete Kompromisslösung zu finden [MP21]. Im Folgenden werden diese Richtlinien kurz erläutert und es werden Beispiele zur Umsetzung genannt.

2.1.1 Minimierung des Materialverbrauchs

Weniger Material zu verbrauchen, verringert nicht nur die Umweltauswirkungen, weil weniger Ressourcen entnommen werden, sondern auch, weil dadurch weniger Verarbeitung, Transport und Entsorgung benötigt wird. Außerdem haben Materialien nicht nur ökologische, sondern auch ökonomische Kosten. Daher ist die Minimierung ihres Verbrauchs eine allgemeine Quelle für Einsparungen [Vez18]. Dabei beschränkt sich die Optimierung des Materialverbrauchs nicht nur auf die Produktgestaltung. Vielmehr wird der gesamte Produktentstehungsprozess

untersucht. Ausschuss und Abfälle während der Produktion, Verpackungsmaterial beim Transport sowie Materialverbrauch während des Designprozesses. Die folgenden Leitlinien können aufgestellt werden. Passend dazu werden Beispiele genannt, wie sich diese umsetzen lassen (Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Leitlinien für die Minimierung des Materialverbrauchs

Leitlinie	Beispiele zur Umsetzung (u.a. aus [Vez18] [AABR07])
Minimierung des Materialgehalts des Produkts	<ul style="list-style-type: none">•Vermeidung von übergroßen Abmessungen•Minimierung der Bauteildicke
Minimierung von Abfällen und Ausschuss während der Herstellung	<ul style="list-style-type: none">•Auswahl von Verfahren, die den Ausschuss und die weggeworfenen Materialien während der Produktion reduzieren•Einsatz von Simulationssystemen zur Optimierung von Herstellungsprozessen
Minimierung oder Vermeidung von Verpackungen	<ul style="list-style-type: none">•Vermeidung von Verpackungen•Verwendung von Verpackungsmaterialien nur wenn absolut notwendig
Minimierung des Materialverbrauchs während der Nutzung	<ul style="list-style-type: none">•Effizientere Nutzung von Wartungsmaterialien•Benötigte Materialien nur während der Nutzung verbrauchen
Minimierung des Materialverbrauchs in der Produktentwicklung	<ul style="list-style-type: none">•Minimierung des Verbrauchs von Schreibwaren und deren Verpackungen•Einsatz digitaler Werkzeuge bei Entwurf, Modellierung und Prototyping

2.1.2 Minimierung des Energieverbrauchs

Eine Verringerung des Energieverbrauchs hat logischerweise zu Folge, dass weniger Energie erzeugt, transportiert und gespeichert werden muss. Dieses Kapitel veranschaulicht anhand von Beispielen die Richtlinien zur Minimierung des Energieverbrauchs, wobei sowohl die für die Herstellung eines Produkts erforderliche Energie, einschließlich der Vorproduktion, der Produktion und des Transports, als auch die vom Produkt verbrauchte Energie berücksichtigt werden (Tabelle 2.3).

Tabelle 2.3: Leitlinien für die Minimierung des Energieverbrauchs

Leitlinie	Beispiele zur Umsetzung (u.a. aus [Vez18] [AABR07])
Minimierung des Energieverbrauchs in der (Vor-)Produktion	<ul style="list-style-type: none"> •Auswahl von Materialien mit geringem Bearbeitungsaufwand •Verwendung möglichst energieeffizienter Verarbeitungstechnologien
Minimierung des Energieverbrauchs während des Transports und der Lagerung	<ul style="list-style-type: none"> •Entwicklung kompakter Produkte •Produkte mit Vor-Ort-Montage •Minimierung des Produktgewichts •Gebrauch von lokal verfügbaren Materialien und Energiequellen
Minimierung des Energieverbrauchs während der Nutzung	<ul style="list-style-type: none"> •Gestaltung von Energierückgewinnungssystemen •Design für energieeffiziente Betriebsphasen •Design für energieeffiziente Wartung •Steigerung des Wirkungsgrades
Minimierung des Energieverbrauchs während der Produktentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> •Effiziente Heizung, Beleuchtung und Belüftung am Arbeitsplatz •Einsatz digitaler Tools für die Kommunikation mit entfernten Arbeitsplätzen (Reduzierung von Geschäftsreisen)

2.1.3 Steigerung der Biokompatibilität und Nutzung erneuerbarer Rohstoffe

Bei dieser Richtlinie sollte das Design auf Ressourcen (Materialien und Energiequellen) mit geringeren Auswirkungen auf die Umwelt ausgerichtet sein, ohne dass die weiteren Ansprüche an das Produkt reduziert werden. Es ist wichtig daran zu denken, dass für einen genauen und effizienten Ansatz zur Verringerung der Umweltauswirkungen, das gesamte Produktsystem so weit wie möglich berücksichtigt werden muss. Jede Berechnung den gesamten Lebenszyklus und all seine Prozesse einbeziehen. Ebenfalls sollten Ressourcen mit geringer Erschöpfung oder hoher Erneuerbarkeit gewählt werden. Eine Ressource kann als erneuerbar bezeichnet werden, wenn die anthropogene Verbrauchsrate niedriger ist als die natürliche Regenerationsrate der Ressource selbst [Vez18]. Die Biokompatibilität der Ressourcen muss nicht nur in Bezug auf die ihrer Gewinnung (Erneuerbarkeit), sondern auch mit den Emissionen der Gewinnungsprozesse in die Umwelt erreicht werden. Die folgenden Leitlinien können aufgestellt werden (Tabelle 2.4).

Tabelle 2.4: Leitlinien zur Steigerung der Biokompatibilität

Leitlinie	Beispiele zur Umsetzung (u.a. aus [Vez18] [AABR07])
Auswahl von ungiftigen und unschädlichen Materialien	<ul style="list-style-type: none"> •Vermeidung von giftigen oder schädlichen Materialien für Produktkomponenten •Minimierung der Gefahr von giftigen und schädlichen Stoffen
Auswahl von ungiftigen und unschädlichen Energiequellen	<ul style="list-style-type: none"> •Nutzung von Energiequellen in der Produktion, die gefährliche Emissionen reduzieren •Auswahl von Energiequellen für die Nutzungsphase, die gefährliche Emissionen reduzieren •Auswahl von Energiequellen, die gefährliche Rückstände sowie giftige und schädliche Abfälle reduzieren
Auswahl von erneuerbaren Materialien	<ul style="list-style-type: none"> •Nutzung erneuerbarer Materialien •Verwendung biologisch abbaubarer Materialien •Verwendung von Reststoffen aus Produktionsprozessen •Verwendung zurückgewonnener Komponenten aus entsorgten Produkten
Auswahl von erneuerbaren Energiequellen	<ul style="list-style-type: none"> •Nutzung von erneuerbaren Energiequellen •Entwicklung eines Kaskadenansatzes

2.1.4 Optimierung der Produktlebensdauer

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) definiert die Produktlebensdauer als die Zeitspanne, die zwischen der Vermarktung eines Produktes und dessen endgültigem Ausfall liegt [VDI22]. Werden durch die Verlängerung der Lebensdauer weniger Produkte nachproduziert, sinken sowohl der Material- als auch der Energieaufwand, um den Nutzen des Produktes bereitzustellen [VDI22]. Es ist wichtig zu unterstreichen, dass die ökologische Optimierung der Lebensdauer nicht nur die physische Leistungsdimension des Produkts betrifft, sondern auch die Dienstleistungskomponente, die dem Nutzer angeboten wird [Vez18]. Das Thema Langlebigkeit von Produkten wird häufig mit dem Vorhandensein und der Schaffung von Dienstleistungen zur Wartung, Reparatur und Aufwertung verbunden. Nach Vezzoli (2018) führt die Schaffung von Produkt-Service-Systemen (PSS) zu langlebigen Produkten, die dem Unternehmen sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Vorteile bieten.

Eine Verlängerung der Produktlebensdauer ist jedoch nicht in allen Situationen sinnvoll. Insbesondere Produkte mit hohem Energieverbrauch in der Nutzungsphase durchlaufen tendenziell mehrere Innovationssprünge, um ihre Energieeffizienz schrittweise zu verbessern (z. B. Kühlschränke), was zu einer begrenzten Nutzungsdauer führt. Hier ist im Einzelfall zu prüfen, ob Ressourceneinsparungen in der Produktion durch mögliche Mehrverbräuche während der Nutzungsphase überkompensiert werden. Die Lösung dieses Zielkonflikts nennt sich „Product Lifetime Optimization“ [NC06]. Für die Optimierung der Produktlebensdauer können folgende Leitlinien aufgestellt werden (Tabelle 2.5).

Tabelle 2.5: Leitlinien zur Optimierung der Lebensdauer

Leitlinie	Beispiele zur Umsetzung (u.a. aus [Vez18] [AABR07])
Angemessene Lebensdauer verwenden	<ul style="list-style-type: none"> •Entwicklung von Komponenten mit einer langen Lebensdauer •Gleiche Nutzungsdauer für die verschiedenen Komponenten vorsehen
Steigerung der Zuverlässigkeit	<ul style="list-style-type: none"> •Verringerung der Gesamtzahl an Bauteilen •Vereinfachung des Produktdesigns •Schwachstellen beseitigen
Erleichterung von Modernisierung und Anpassungsfähigkeit	<ul style="list-style-type: none"> •Entwicklung von modularen Produkten •Entwicklung von Produkten, die vor Ort aufrüstbar und anpassbar sind
Erleichterung der Wartung	<ul style="list-style-type: none"> •Die Demontage der zu wartenden Komponenten vereinfachen •Verringerung der benötigten Arbeitsschritte
Erleichterung der Reparatur	<ul style="list-style-type: none"> •Erleichterung der Demontage von leicht zu beschädigenden Komponenten •Verwendung von genormten Komponenten
Erleichterung der Wiederverwendung	<ul style="list-style-type: none"> •Nutzung von modularen und austauschbaren Komponenten •Erstellung von Konzepten für eine anschließende sekundäre Nutzung
Erleichterung der Wiederaufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> •Einfacher Ausbau der aufzuarbeitenden Komponenten •Verwendung von reversibel und lösbaren Verbindungen

2.1.5 Wiederverwendbarkeit der Materialien

Die Wiederverwendung von Materialien kann durch zwei grundlegende Prozesse erfolgen. Die Materialien können wiederverarbeitet werden zu Sekundärrohstoffen oder sie werden verbrannt, um ihren Energiegehalt zu nutzen [Vez18]. In beiden Fällen gibt es gleich zwei positive Effekte. Zum einen werden die Umweltauswirkungen von Materialien auf einer Deponie vermieden und zum anderen werden in der Produktionsphase die Umweltauswirkungen vermieden, die bei der Herstellung einer vergleichbaren Menge an Material oder Energie aus Primärrohstoffen entstehen würden. Folgende Leitlinien können für die Wiederverwendbarkeit der Materialien aufgestellt werden (Tabelle 2.6).

Tabelle 2.6: Leitlinien zur Wiederverwendbarkeit der Materialien

Leitlinie	Beispiele zur Umsetzung (u.a. aus [Vez18] [AABR07])
Verfolgung des Kaskadenansatzes	<ul style="list-style-type: none"> • Erleichterung des Recyclings von Materialien in Komponenten mit geringeren mechanischen/ästhetischen Anforderungen
Nutzung von Materialien mit den effizientesten Recyclingtechnologien	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von Materialien, die ihre ursprünglichen Leistungsmerkmale nach dem Recycling wiedererlangen • Vermeidung von Verbundwerkstoffen
Identifizierung der Materialien	<ul style="list-style-type: none"> • Codierung verschiedener Materialien, um ihre Identifizierung zu erleichtern • Angabe von zusätzlichen Informationen über das Alter und welche Zusatzstoffe verwendet wurden
Minimierung der Anzahl an verschiedenen unverträglichen Materialien	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung der Gesamtanzahl der Bauteile • Monomaterialstrategie: nur ein Material pro Produkt oder pro Unterbaugruppe
Erleichterung der Reinigung der Materialien	<ul style="list-style-type: none"> • Vermeidung von unnötigen Beschichtungsverfahren • Vermeidung der Verwendung von Klebstoffen
Erleichterung der Abholung und des Transports von Altgeräten	<ul style="list-style-type: none"> • Minimierung des Produktgewichts • Verbesserung der Transportfähigkeit des Produkts

2.1.6 Vereinfachung der Demontage

Eine einfache Demontage der Teile erleichtert die Wartung, Reparatur, Recycling und Wiederaufbereitung von Produkten. Eine demontagerechte Konstruktion ist somit nützlich für die Verlängerung der Produktlebensdauer sowie für die Wiederverwendbarkeit von Materialien. Außerdem senkt es die Kosten für die Instandhaltung, Reparatur, Wiederaufbereitung und Wiederverwendung sowie für das Recycling. Folgende Leitlinien können für die Vereinfachung der Demontage aufgestellt werden (Tabelle 2.7).

Tabelle 2.7: Leitlinien zur Vereinfachung der Demontage

Leitlinie	Beispiele zur Umsetzung (u.a. aus [Vez18] [AABR07])
Reduzierung von Demontageschritten	<ul style="list-style-type: none">•Verwendung von modularen Strukturen•Reduzierung der Anzahl an Bauteilen
Erleichterung von Demontageschritten	<ul style="list-style-type: none">•Verwendung von reversiblen Verbindungen, die mit herkömmlichen Werkzeugen geöffnet werden können•Aufteilung des Produkts in leicht trennbare und manipulierbare Unterbaugruppen•Verwendung von leicht lösbaren dauerhaften Verbindungssystemen Verwendung von leicht ablösbaren Klebstoffen

2.2 Design for Environment (DfE)

2.2.1 Grundlagen der Design for X-Methodik

In der Industrie verbreitet sich zunehmend die Meinung, dass zukünftige Entwicklungsaufgaben nur umfassend, d. h. unter gleichzeitiger Berücksichtigung verschiedener Aspekte gelöst werden können [Bau03]. Die von diesem Denkansatz inspirierten Strategien, Methoden und Tools werden gemeinhin mit dem Begriff „Design for X“ (DfX) in Verbindung gebracht [Bau03]. Allerdings ist die Begriffswelt im Kontext von DfX derzeit noch unstrukturiert und zum Teil widersprüchlich. Nach Hubka (1984) ist DfX ein Wissenssystem, in dem Erkenntnisse darüber, wie einzelne Eigenschaften eines technischen Systems bei der Konstruktion umzusetzen sind, gesammelt und in geeigneter Form organisiert werden [Hub84]. Huang (1996) beschreibt den Begriff DfX als: „making decisions in product development related to products, processes and plants“ [Hua96]. Der Fokus liegt bei Huang auf dem Entscheidungsprozess. Daher kann DfX

bedeuten, während des Produktentwicklungsprozesses Entscheidungen auf der Grundlage einer ausreichend dimensionierten und ganzheitlichen Wissensbasis zu treffen [Bau03]. Das „X“ steht stellvertretend für die verschiedenen primären Ziele, die in der Produktentwicklung verfolgt werden. Je nachdem welche Strategie in der Produktentwicklung verfolgt wird, wird das „X“ sinngemäß ersetzt. Hier ein paar Beispiele für mögliche DfX-Strategien (Abbildung 2.2).

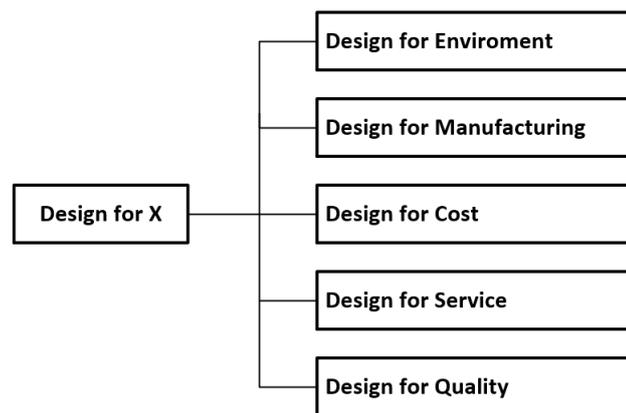


Abbildung 2.2: Beispiele für DfX-Strategien

Auf der Grundlage von DfX-Strategien können DfX-Richtlinien definiert werden, die helfen sollen, geeignete Kriterien zu formulieren und zu gewichten. Sie fungieren als Wegweiser, damit während der Produktentwicklung möglichst viele der gewünschten Produkteigenschaften erreicht werden. DfX-Richtlinien hängen von der betrachteten Phase der Produktentwicklung ab. Während strategische Entscheidungen in den frühen Phasen getroffen werden und entsprechende Leitlinien zur Unterstützung benötigen, müssen die DfX-Richtlinien in den späteren Phasen konkret und messbar formuliert sein, um die erfolgreiche Umsetzung der Richtlinie zu gewährleisten [Bau03]. Dadurch wird die Zahl potenziell relevanter Richtlinien im Laufe des Produktentwicklungsprozesses immer größer (Abbildung 2.3).

Das gezeigte Beispiel ist eine produktunabhängige Richtlinienstruktur. Aufgrund der sehr begrenzten Detailtiefe werden hier nur strategisch orientierte Aspekte betrachtet. Entscheidungen, die in den dargestellten Hierarchien getroffen werden, haben einen wesentlichen Einfluss auf den gesamten Produktentstehungsprozess und die späteren Eigenschaften des Produkts

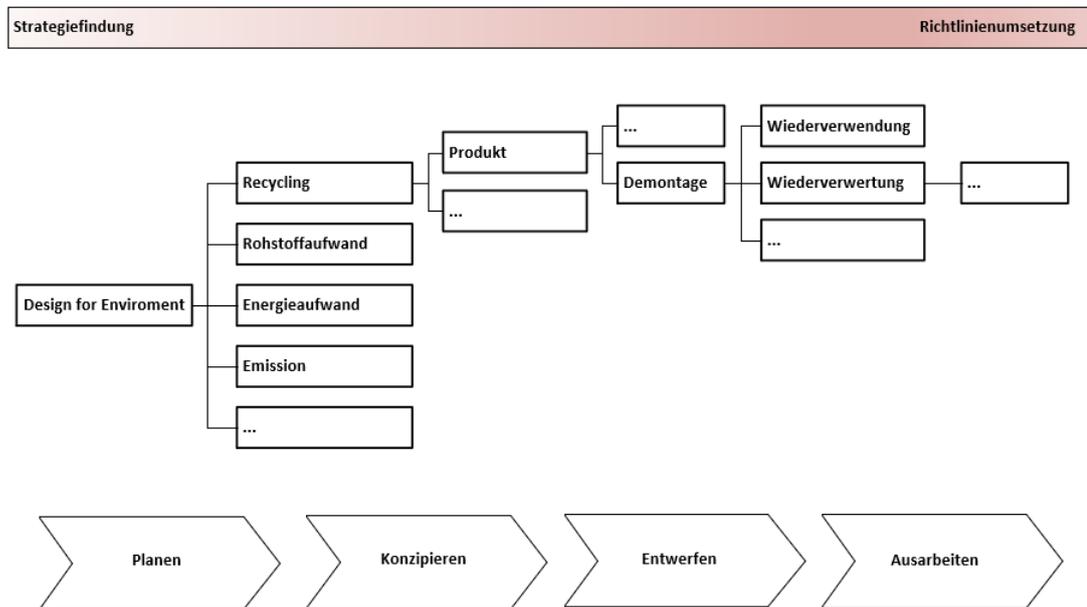


Abbildung 2.3: Korrelation zwischen den Konstruktionsphasen und der DfX-Hierarchie am Beispiel DfE (eigene Grafik nach [Bau03])

[MK05]. Ziel ist es, überprüfbare Richtlinien in Form eines gewichteten Kriterienkatalogs zu formulieren [Bau03].

2.2.2 Der DfE-Ansatz

Die Vorgehensweise bei der Umsetzung einer DfE-Strategie ist im nachstehenden Flussdiagramm skizziert (Abbildung 2.4). Obwohl es in linearer Form dargestellt ist, handelt es sich um einen iterativen Prozess. Dieser wird so lange durchlaufen, bis alle Umweltauforderungen in hinreichender Form erfüllt sind [The14]. Was hinreichend ist, muss in den Umweltzielen festgelegt werden.

Planungsphase

Als erstes müssen die möglichen Umweltauswirkungen des Produkts bestimmt werden. Dafür kann eine Ökobilanz-Studie aufgestellt werden. Die Ökobilanz (engl. LCA - Life Cycle Assessment) bezieht sich auf die Umweltaspekte und -wirkungen eines Produktsystems. Es analysiert alle In- und Output-Flüsse über den gesamten Lebensweg eines Produktes und stellt dessen potenziellen Umweltwirkungen transparent und detailliert dar [DIN20a]. Das heißt alle Stufen

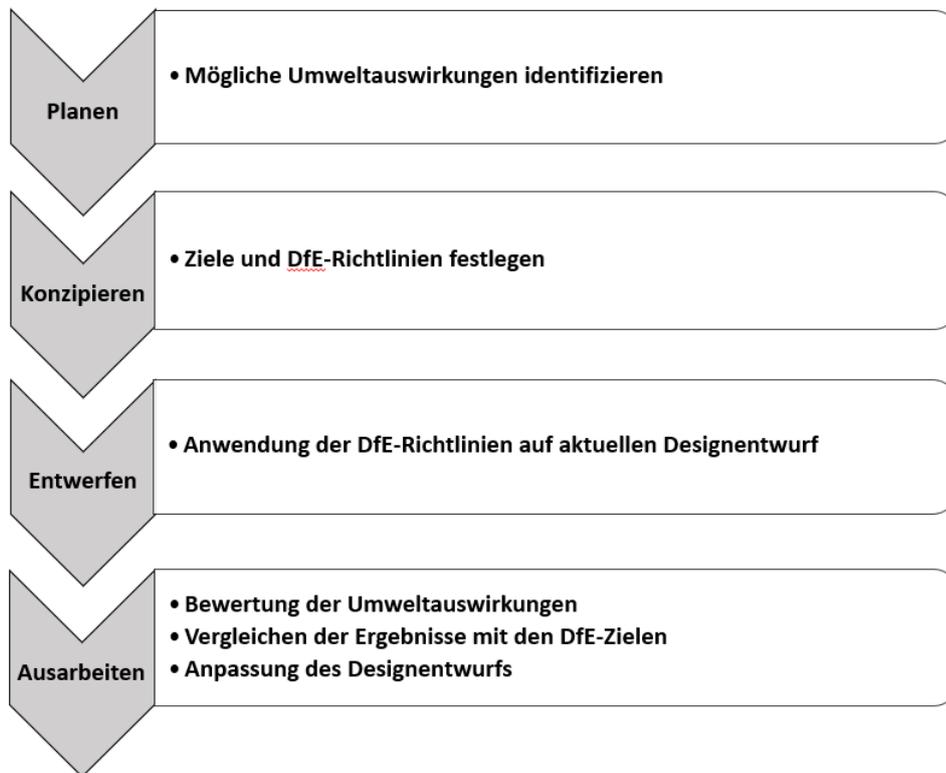


Abbildung 2.4: Vorgehensweise beim DfE-Ansatz nach [The14]

von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung – also „von der Wiege bis zur Bahre“ (engl. cradle to grave) werden berücksichtigt. Die Ökobilanz-Methode teilt sich in vier Abschnitte auf:

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

Die Ökobilanz ist eine iterative Methode. In den einzelnen Abschnitten einer Ökobilanz werden die Ergebnisse der anderen verwendet (Abbildung 2.5). Der iterative Ansatz trägt zur Ganzheitlichkeit und Konsistenz der Studie bei [IBU20].

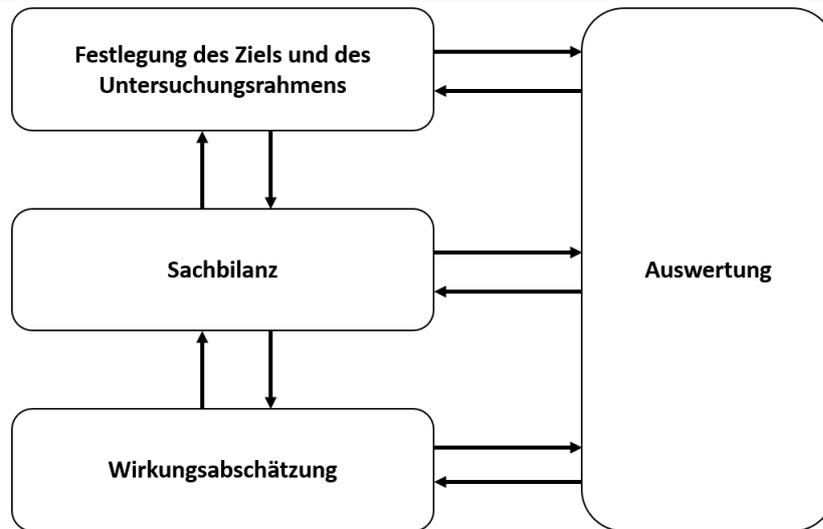


Abbildung 2.5: Die vier Abschnitte einer Ökobilanz (eigene Grafik nach [DIN20a])

Im ersten Abschnitt müssen das Ziel und der Untersuchungsrahmen eindeutig festgelegt und auf die beabsichtigte Anwendung abgestimmt werden. Es werden u.a. die zu nutzenden Methoden definiert, Einschränkungen formuliert und benötigte Annahmen getroffen. Eine ausführliche Beschreibung zum Vorgehen bei einer Ökobilanzierung wird in der DIN ISO 14044 vorgestellt. Im zweiten Abschnitt, der sog. Sachbilanz, werden für jedes Prozessmodul, das innerhalb der Systemgrenze liegt, sowohl qualitative als auch quantitative Daten gesammelt. Die entweder durch Messung, Berechnung oder Schätzung gesammelten Daten werden dazu verwendet, die Inputs und Outputs eines Prozessmoduls quantitativ zu bestimmen [DIN20b]. Für die Produktionsphase sollte vor allem mit diesen Primärdaten gearbeitet werden. Allerdings sind umweltbezogene Daten, insbesondere für vor- und nachgelagerte Prozesse, nur sehr schwer zu erheben. Daher gibt es die Möglichkeit auf bereits angelegte Datenbanken zurückzugreifen [iPo22]:

- **LCI-Datenbank (Life Cycle Inventory):** enthält Sachbilanzdaten eines Produktes oder Komponente und den darin enthaltenen Material-, Energie- und Emissionsflüsse.
- **LCA-Datenbank:** enthält (Umwelt-) Daten und Methoden zur Bewertung der ökologischen Auswirkung eines Produktes.

Diese Daten ermöglichen die Schließung der Datenlücken in der Bestandsaufnahme. Gerade für Forschungsprojekte ohne Beteiligung von Unternehmen ist der Zugang zu Primärdaten

begrenzt. Die Datenbanken ermöglichen den Forschern, ihre Modelle mit den benötigten Daten zu versorgen [iPo16]. Der nächste Abschnitt ist die Wirkungsabschätzung. Die Ergebnisse der Sachbilanz werden hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen bewertet. Die Herausforderung besteht hier vor allem darin, die verschiedenen Umweltwirkungen (z. B. Treibhauseffekt oder Eutrophierung) zu bewerten. Es gibt verschiedene Ansätze, diese zu bewerten. Sie unterscheiden sich im Vorgehen, beispielsweise bei der Gewichtung einzelner Elemente. Einige Methoden betrachten nur ausgewählte Bereiche der Umwelt, wie z. B. der kumulierte Energieaufwand (KEA) oder den CO₂-Fußabdruck, andere umfassende Methoden, wie z. B. der Eco-Indicator 99, kombinieren verschiedene Umweltauswirkungen in einer einzigen Kennzahl [iPo22]. Ausschlaggebend für die Auswahl der geeigneten Bewertungsmethode sind immer das zu prüfende Produkt und die jeweilige Situation.

Im letzten Abschnitt, die Auswertung, werden die Ergebnisse entsprechend dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Studie ausgewertet. Die Datenqualität, die Schlussfolgerungen sowie alle Empfehlungen auf Grundlage der Sachbilanz- und Wirkungsabschätzungsergebnisse müssen überprüft und dokumentiert werden [DIN20b]. Es wird eine Beurteilung über die Sicherheit der Ergebnisse abgegeben. Es sollte beachtet werden, dass es keine wissenschaftliche Grundlage gibt, Ergebnisse von Ökobilanzen übergreifend zu einer numerischen Rangfolge oder zu einem Einzelwert zusammenzufassen [DIN20b].

Konzeptionsphase

Zu Beginn der Konzeptionsphase müssen die Umweltziele für das zukünftige Produkt definiert werden. Als Grundlage können dabei die ermittelten Werte der Ökobilanz dienen. So lassen sich beispielsweise Optimierungsziele ableiten. Um eine ganzheitliche umweltgerechte Lösung zu erreichen, müssen für jede Produktlebensphase Umweltziele definiert werden [The14]. Damit die Ziele erreicht werden können, werden grundlegende DfE-Richtlinien für den Designprozess aufgestellt. Sie dienen der Strategiebestimmung und helfen bei der Lösungsfindung. Eine sinnvolle Auswahl von DfE-Richtlinien erfordert die Kenntnis aller Anforderungen an das Produkt. Außerdem sollten alle internen und externen Treiber für das Projekt bekannt sein, um die erfolgreiche Umsetzung der Anforderungen zu gewährleisten [Wag17]. Die Treiber sind die Hauptmotivation für das Unternehmen, sich mit den Umweltauswirkungen seiner Produkte zu befassen, und müssen während des Designprozesses berücksichtigt werden. Mögliche Treiber sind in [Tabelle 2.8](#) aufgelistet.

Tabelle 2.8: interne und externe Treiber für die Aufstellung von Umweltzielen

Interne Treiber	Externe Treiber
Außendarstellung	Umweltvorschriften
Kostensenkung	Kundenpräferenzen
Betriebssicherheit	Wettbewerb
Ethische Verantwortung	Klimawandel
	Verknappung der Ressourcen

Entwurfsphase

Im Laufe des Entwicklungsprozesses werden die DfE-Richtlinien immer weiter präzisiert. Zwangsläufig entstehen dadurch immer neue Richtlinien, die es zu berücksichtigen gilt. Die grundlegenden DfE-Richtlinien, die zu Beginn der Konzeptionsphase aufgestellt wurden, wirken sich maßgeblich auf die Entscheidungsmöglichkeiten im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses aus (siehe Kap. 2.2.1). Um die DfE-Richtlinien umsetzen zu können, müssen diese bis zu konkreten Kriterien detailliert werden. Der Erfüllungsgrad einer Richtlinie muss feststellbar sein. Im nachfolgenden Beispiel wird gezeigt, wie der Detaillierungsgrad der DfE-Richtlinien steigt und diese letztendlich als konkrete Kriterien formuliert werden (Abbildung 2.6).

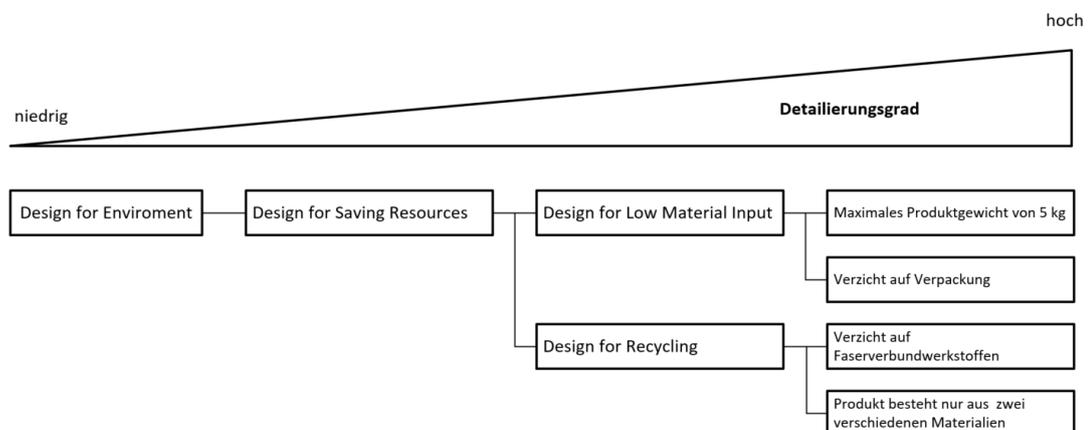


Abbildung 2.6: Beispiel einer Entwicklung der DfE-Richtlinie

An diesem Beispiel lässt sich erkennen, dass verschiedene Richtlinien und die daraus abgeleiteten Kriterien in Beziehungen zueinanderstehen können. Entscheidet man sich für den Verzicht von Faserverbundwerkstoffen, so kann dies unter Umständen im Konflikt mit der Einhaltung

des maximalen Gewichts von 5 kg stehen, da die Alternativen voraussichtlich das geforderte Maximalgewicht überschreiten werden. DfE-Richtlinien und die daraus abgeleiteten Kriterien können sich prinzipiell fördern (komplementär), behindern (konkurrierend) oder nicht beeinflussen (indifferent). In einzelnen Fällen sind auch widersprüchliche Kriterien denkbar, die sich gegenseitig ausschließen [Bau03]. Daher müssen die aus den DfE-Richtlinien entstandenen Kriterien gewichtet werden, um Zielkonflikte eindeutig lösen zu können.

Ausarbeitungsphase

Sobald ein Entwurf erstellt wurde, besteht der nächste Schritt in der Bewertung der Umweltauswirkungen über die Produktlebensdauer des ausgewählten Designs. Diese kann mit der Adaption des Lifecycle Design Strategies Wheel (LiDS Wheel) durchgeführt werden. Das LiDS-Wheel hilft dabei den erforderlichen Rahmen zu schaffen, um wichtige Umweltkriterien bewerten zu können [The14]. Die Methode umfasst acht Hauptansatzpunkte. Jeder Ansatzpunkt beinhaltet Kriterien auf Grundlage des Verständnisses der wichtigsten Umweltauswirkungen, die mit jeder Lebenszyklusphase verbunden sind. **Tabelle 2.9** zeigt die Ansatzpunkte des LiDS Wheel mit möglichen Bewertungskriterien. Für die Anwendung dieser Methode müssen zuerst die Bewertungskriterien anhand der zu Beginn aufgestellten Umweltziele und eine angemessene Bewertungsskala festgelegt werden [BH97]. Die Bewertung sollte, wenn möglich, in einem Team aus Fachexperten mit unterschiedlichen Fachbereichen durchgeführt werden. Denn die Bewertung ist subjektiv. Die unterschiedlichen Sichtweisen sorgen für die Berücksichtigung aller Aspekte und Lebensphasen des Produkts.

Sind die Bewertungskriterien und die Skala festgelegt, kann das LiDS Wheel erstellt werden (**Abbildung 2.7**). Es veranschaulicht die Bewertungsergebnisse und zeigt, wie Nahe der jeweilige Designentwurf den Zielvorgaben gekommen ist bzw. sie bereits erreicht hat. Sobald die jeweilige Zielvorgabe erreicht ist, bekommt der Designentwurf volle Punktzahl. Ist die Zielvorgabe noch nicht erreicht, wird eine weitere Iterationsschleife angeregt. Können keine nennenswerten Verbesserungen mehr erzielt werden, ohne dass alle Umweltziele hinreichend erfüllt sind, müssen Änderungen an den bestehenden Design- und Materialspezifikationen in Betracht gezogen werden. Dabei können entweder die Gewichtungen der Kriterien geändert werden, oder bestehende DfE-Richtlinien müssen umformuliert werden.

Tabelle 2.9: Die acht Hauptansatzpunkte des LiDS-Wheels mit möglichen Bewertungskriterien

Ansatzpunkt	mögliche Bewertungskriterien
Entwicklung neuer Konzepte	<ul style="list-style-type: none"> •Dematerialisierung •Sharing Konzepte
Nachhaltige Materialien	<ul style="list-style-type: none"> •für die Umwelt unbedenkliche Materialien •recycelte Materialien
Reduzierung des Materialverbrauchs	<ul style="list-style-type: none"> •Gewicht des Produkts •Verpackungsmaterialien
Optimierung der Produktion	<ul style="list-style-type: none"> •Herstellungsverfahren •Anzahl der Prozessschritte
Optimierung der Vertriebsstruktur	<ul style="list-style-type: none"> •Umweltauswirkungen des Transportnetzes •interne Transportwege
Optimierung im Gebrauchszustand	<ul style="list-style-type: none"> •Energieverbrauch •Energiequellen
Optimierung der Lebensdauer	<ul style="list-style-type: none"> •Verlässlichkeit •einfache Wartung
Optimierung des End-of-Life Zustands	<ul style="list-style-type: none"> •Wiederverwendbarkeit •Recyclingfähigkeit

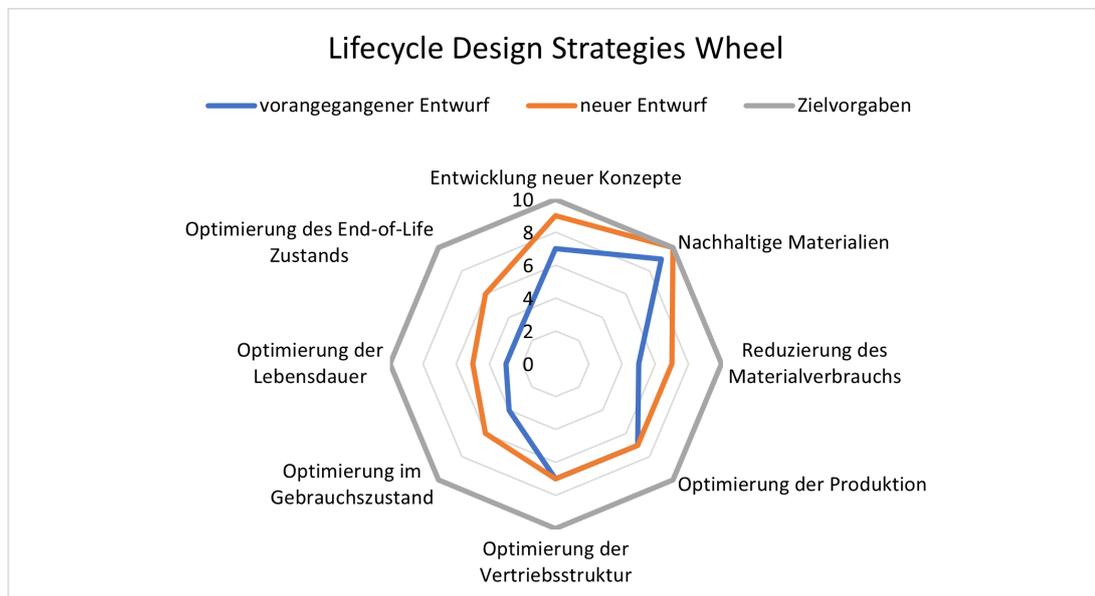


Abbildung 2.7: Beispiel für ein Ergebnis im LiDS Wheel

2.3 Cradle to Cradle (C2C)

Grundsätzlich gibt es zwei Strategien, auf denen die Ansätze zur umweltgerechten Produktentwicklung beruhen. Zum einen die Ökoeffizienz, bei der es darum geht, den ökologischen Fußabdruck über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts möglichst effizient zu reduzieren. Und zum anderen die Ökoeffektivität, bei der sich die Produkte stetig in einem Kreislauf befinden. Ökoeffektiv sind nach Braungart und McDonough Produkte, die entweder als biologische Nährstoffe in biologische Kreisläufe zurückgeführt werden können oder als „technische Nährstoffe“ kontinuierlich in technischen Kreisläufen gehalten werden [BM14]. Die beiden bereits vorgestellten Ansätze Eco Design (siehe Kap. 2.1) und Design for Environment (siehe Kap. 2.2) beruhen auf der Strategie der Ökoeffizienz. Das Hauptaugenmerk liegt dort auf die Reduzierung der Umweltauswirkungen. Mit dem von Michael Braungart und William McDonough vorgestellten Cradle to Cradle (C2C)-Ansatz sollen hingegen „ökoeffektive Produkte“ entwickelt werden [BM14].

Der C2C-Ansatz ist eng mit der Circular Economy verknüpft. Circular Economy setzt auf die Minimierung des Ressourceneinsatzes sowie die Minimierung der Abfallproduktion, indem Materialkreisläufe optimiert werden [Doh21]. C2C bedeutet wörtlich „von der Wiege zur Wiege“ und geht noch einen Schritt weiter. Dieser strebt einen nahezu perfekten Kreislauf an [Sto20]. Das heißt, bereits genutzte Rohstoffe sollen nach Gebrauch wieder in den Kreislauf zurückgeführt und wiederverwendet werden. Daher wird gemäß einer optimal funktionierenden Kreislaufwirtschaft Abfall vollständig vermieden [Doh21]. C2C betrachtet vier unterschiedliche Bereiche, die so genannten „Vier goldenen Regeln“ [BM14]:

- Der Abfall ist unsere Nahrung
- Die Sonne ist unser Einkommen
- Die Ressourcen Luft, Wasser und Boden müssen geschützt werden
- Die Vielfalt ist in jeder Hinsicht zu achten und zu schützen

Der Abfall ist unsere Nahrung

Vorbild für den C2C-Ansatz ist dabei die Natur, in der jeder Abfall wieder zur Nahrung oder zu Nährstoffen für etwas anderes wird und dadurch ein ständiger Kreislauf entsteht. Ausgehend von den Idealen der Natur lässt sich der Ansatz von Nährstoffkreisläufen in Form von biologischen und technischen Rohstoffkreisläufen auch auf die industrielle Güterproduktion übertragen [WK18] (Abbildung 2.8). Der biologische Kreislauf umfasst alle gesundheitlich unbedenklichen und kompostierbaren Teile und ermöglicht so am Ende der Nutzungsdauer neues organisches Wachstum ohne Schadstoffablagerung. Im technischen Kreislauf hingegen zirkulieren jene Stoffe, die von der Natur nicht ständig neu geschaffen werden, wie beispielsweise Metalle, Kunststoffe oder aus mineralischen Rohstoffen erzeugte Materialien. Gebrauchsgüter, die aus diesen technischen Nährstoffen hergestellt werden, sollen wertbeständig zirkulieren [WK18]. Beispielsweise können durch Komponentenverwertung gleichwertige oder höherwertiger Produkte aus gebrauchten Bauteilen erstellt werden. So kann Kupfer aus alten Stromleitungen gewonnen und in hochtechnischen Geräten der Medizinindustrie „upgecyclt“ werden. Zukünftig soll nur noch Re- oder Up-Cycling (gleich- oder höherwertige Wiederverwertung) durchgeführt werden. Auf Down-Cycling (minderwertige Verwertung, zum Beispiel in Form der Müllverbrennung) soll vermieden werden [BM14]. Dafür müssen die Materialien sortenrein trennbar sein. Technische Produkte gelten als Materialbanken, da ihre Ressourcen ihren Wert erhalten und immer wieder verwendet werden können [SPB⁺18].

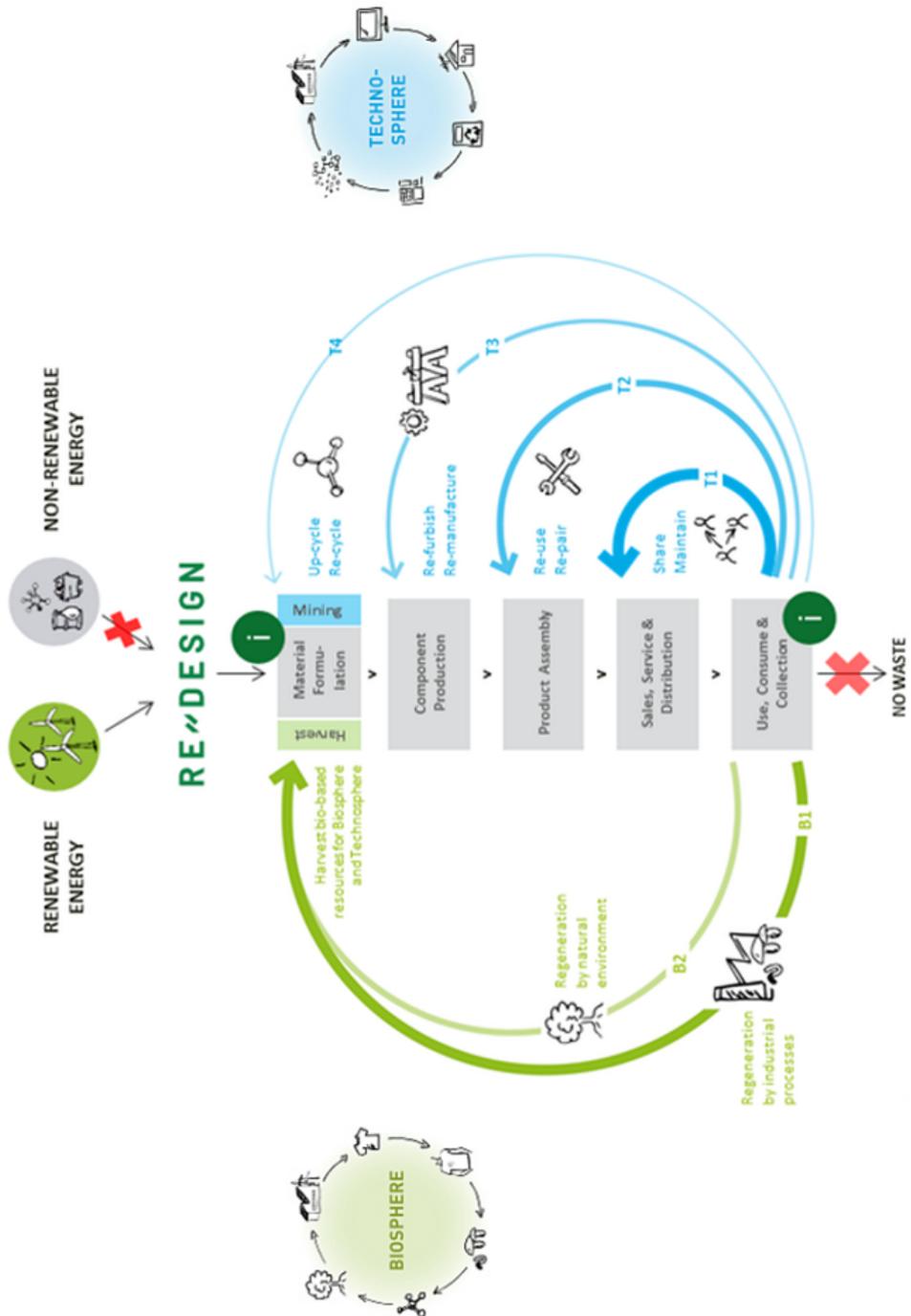


Abbildung 2.8: Schema des C2C-Ansatzes [EPE22]

Die Sonne ist unser Einkommen

Eine weitere Regel des C2C-Ansatzes ist die Nutzung erneuerbarer Energien (Wagner et al. 2018). Derzeit werden hauptsächlich die auf der Erde gespeicherten Energiereserven in Form von Öl und Erdgas genutzt. Die eingesetzte Energie sollte jedoch möglichst erneuerbar sein. Braungart schlägt vor, sich stärker auf die Sonne als unerschöpfliche Energiequelle zu konzentrieren. Dazu gehört neben der Solarenergie (Photovoltaik) auch Wind- und Biomasseenergie [BM14]. Allerdings darf diese Art von Energie nicht durch den Einsatz von Schwermetallen bei der Erzeugung „erkauft“ werden. Alle Produkte müssen vollständig mit erneuerbaren Energien aus kreislauffähigen Anlagen hergestellt werden [SPB⁺18]. Denn die Energie der Sonne ist reichlich vorhanden, doch die Rohstoffe, die für ihre Umwandlung in Strom benötigt werden, sind es nicht. Auch Wasser ist eine wertvolle und knappe Ressource, weshalb es Fabriken in mindestens der gleichen Qualität wieder verlassen muss [NGO21]. Ein Ziel für die Zukunft sollte die direkte Nutzung der natürlichen Energiequellen sein [BM14]. Diese Energieumstellung sollte nach dem C2C-Ansatz in den nächsten Jahren im Mittelpunkt der Bemühungen liegen, da sie eine Dezentralisierung der Energieerzeugung fördert und die Umstellung auf kleinräumige Stoffkreisläufe und erneuerbare Rohstoffe erleichtert [SPB⁺18].

Die Ressourcen Luft, Wasser und Boden müssen geschützt werden

Unter dieser Anforderung sollen und dürfen Unternehmen keine Rohstoffe oder Produktionstechniken verwenden, die Boden-, Wasser- oder Luftverschmutzung verursachen. Ziel ist es, den ökologischen Fußabdruck in allen Bereichen des Unternehmens zu verringern [BM14]. Es beginnt mit der Auswahl der Rohstoffe und der Energieressourcen, die im Wertschöpfungsprozess eingesetzt werden sollen. Um die Umweltverträglichkeit der Materialien zu bestimmen, kann die ABC-X-Materialklassifikation (X = nicht akzeptierbar, da gesundheits- oder umweltschädlich, C = tolerierbar, B = verbesserbar und A = optimal) verwendet werden [Wal17]. Weiterführend umfasst diese Anforderung auch die Produktion sowie alle logistischen Tätigkeiten wie die Entsorgung von Restabfällen. Die Menschheit muss ihren Verbrauch natürlicher Ressourcen wie Boden, Wasser und Luft unterhalb einer kritischen Grenze zum Stillstand bringen bzw. schnellstens in den unkritischen Bereich zurückführen [WK18]. Wenn nicht kann der unkontrollierte Abbau der natürlichen Ressourcen in den betroffenen Regionen zu erheblichen Schäden der allgemeinen Gesundheit führen [Wal17].

Die Achtung der Vielfalt

Aus Sicht von Braungart und McDonough (2014) ist es wichtig, Vielfalt in jeder Hinsicht zu achten. Dazu gehört die Achtung vor Flora und Fauna sowie der kulturellen Vielfalt [BM14]. Denn Vielfalt ist Vorteil. Die Natur zeigt: Vielfältige Ökosysteme sind oft widerstandsfähiger und flexibler. Vereinheitlichung, wie sie auch durch die industriellen Revolutionen entstand, ist aus Sicht der C2C Befürworter eine Sackgasse. Das C2C-Designkonzept fordert die Einbeziehung der Vielfalt an Ideen, Konzepten, Meinungen, Gewohnheiten und Kulturen [Int22]. Auch eine Materialvielfalt ist wichtig. Sie führt dazu, dass die Belastung der Ressourcen auf alle Materialien verteilt.

3 Klimagerechte Produktentwicklung und der Einfluss der Digitalisierung

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Digitalisierung auf die klimagerechte Produktentwicklung untersucht. Mithilfe einer Literaturanalyse werden Einflüsse identifiziert und vorgestellt, um später eine Systemanalyse durchzuführen.

3.1 Definition Digitalisierung

Im ursprünglichen Sinne bezeichnet Schallmo (2018) die Digitalisierung als die Umwandlung analoger Signale in digitale Formate, um diese auf digitalen Systemen weiterverarbeiten zu können [SRK18]. Demnach liegt der Beginn der Digitalisierung schon Jahrzehnte zurück. Die gängigsten Beispiele für die Digitalisierung sind Fotos oder Musikdateien, wobei analoge Inhalte in digitale Einheiten abgespeichert werden. Geht es um die Digitalisierung im industriellen Umfeld, so beschreibt Sauter (2020) sie als das Abbilden des Betriebs mit seinen Produkten, Prozessen und Abläufen mithilfe von digitalen Mitteln [Sau20]. Die Digitalisierung kann dabei einen bedeutenden Beitrag leisten, die Prozesse zu optimieren und zu automatisieren und neue Technologien zu entwickeln. Doch aktuell erleben die Industrie und die Gesellschaft einen viel weitreichenderen digitalen Wandel, der durch neue Technologien ermöglicht wird. Dieser Trend wird in der Literatur häufig als digitale Transformation bezeichnet. Sauter (2020) beschreibt die digitale Transformation wie folgt:

„Die Digitale Transformation wird als die exponentielle und dauerhafte Veränderung von Gesellschaft und Unternehmen auf Basis von Technologie verstanden.“ [Sau20]

Riesige Datenmengen werden miteinander verknüpft, wodurch neue Produkte, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle entstehen. Eine vernetzte Produktion kann Wertschöpfungsketten neu gestalten [Obe19]. Privat können digitale Dienste oder Produkte überall genutzt werden. Mit Hilfe von Apps ist der Mensch zu jeder Zeit digital vernetzt. Im medizinischen Bereich kann eine gezielte Datenvernetzung Behandlung und Diagnose verbessern. Die digitale Trans-

formation kann in drei verschiedene Stufen unterteilt werden, in welchen sie aus Sicht eines Unternehmens wirkt [Sau20]. In der ersten Stufe findet die Digitalisierung der Wertschöpfungskette statt. Es entstehen Smart Factories. Durch die Digitalisierung von Produkten entstehen in der zweiten Stufe Smart Products. In der dritten Stufe werden neue Geschäftsmodelle auf Basis von Datenmehrwertdiensten eingeführt [Obe19]. Im industriellen Kontext der digitalen Transformation wird auch von der Industrie 4.0 gesprochen. Sie die „industrielle Nutzung des Internet of Things (IoT), um über Unternehmensgrenzen hinweg vernetzte, automatisiert arbeitende Fabriken und Wertschöpfungsketten zu erstellen“ [BMW20]. Ein weiteres Kernelement sind die Cyber-Physischen Systeme (CPS)(Abbildung 3.1). In CPS werden digitale Prozesse mit physikalischen Prozessen kombiniert. Eingebettete Computer und die nutzbaren Netzwerke überwachen und steuern die physikalischen Prozesse. In der Regel werden mit Rückkopplungsschleifen die physikalischen Prozesse ausgewertet [Lee08].

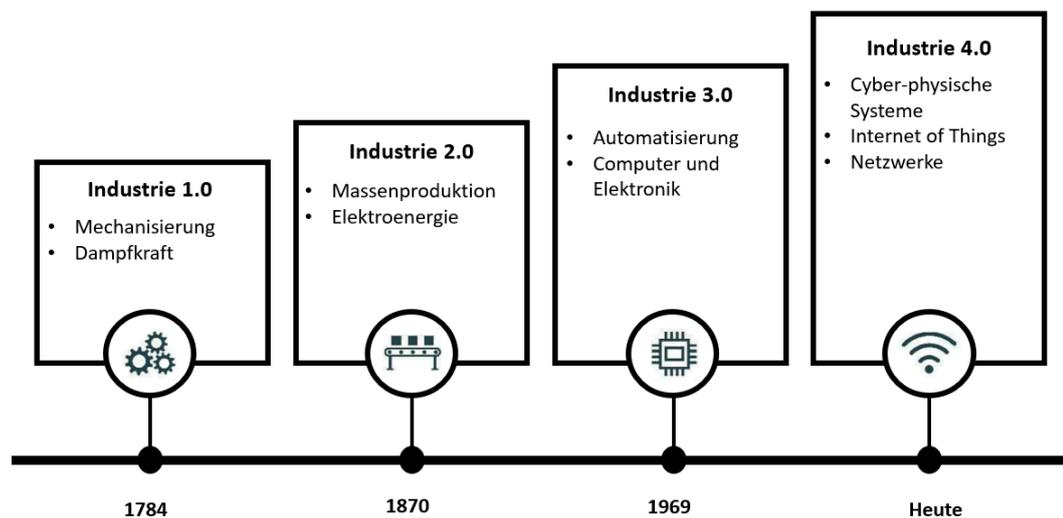


Abbildung 3.1: Die industrielle Entwicklung im Überblick (eigene Grafik nach [Foi18])

Die digitale Transformation ist ein Phänomen, welches Einfluss auf nahezu alle Lebens- und Arbeitsbereiche hat [Foi18]. Digitalisierung sollte somit eher als ganzheitlicher Umbruchprozess verstanden werden, der zu vielen grundsätzlichen Themen, wie z.B. Datenschutz, Cyberkriminalität oder Rechtsfragen führt [SFR18]. Und dieser Prozess ist gleichzeitig ein enormer Effizienz-, Expansions- und Innovationstreiber. Das sorgt auch auf Ebene der klimagerechten Produktentwicklung für große Potenziale. Allerdings entstehen auch Herausforderungen. Diese

müssen bekannt sein und strategisch gehandelt werden, um die Potenziale effektiv nutzen zu können.

3.2 Potenziale für eine klimagerechte Produktentwicklung

Die gesellschaftliche Verantwortung hinsichtlich der Entwicklung nachhaltiger Produkte gewinnt bei produzierenden Unternehmen immer mehr an Bedeutung [BT19]. Zusätzlich verändert sich das Umfeld von Unternehmen. Auf der Makroebene haben der Klimawandel und die Verknappung einzelner Ressourcen immer mehr Einfluss auf Unternehmen. Parallel dazu haben die steigenden Energie- und Rohstoffpreise sowie mögliche Kosteneinsparungen (z. B. durch Abfallreduzierung und effektives Ressourcenmanagement) auf der Mikroebene ebenfalls immer stärkeren Einfluss auf Unternehmen [BT19]. Daraus ergeben sich für die Unternehmen Chancen aber auch immer mehr Einschränkungen für die Gestaltung ihrer Wertschöpfungsprozesse [BT19].

Um am Markt langfristig erfolgreich zu sein sind innovative, umweltschonende Produkte gefragt. Ein Hauptansatzpunkt zur Entwicklung umweltschonender Produkte ist die Steigerung der Ressourceneffizienz in allen Produktlebensphasen. Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) fasst unter dem Begriff der natürlichen Ressourcen folgende Bestandteile zusammen: Energie, Rohstoffe, Wasser, Luft, Boden/Fläche, Ökosystemdienstleistungen und Biodiversität [VDI16]. Vor diesem Hintergrund lässt sich Ressourceneffizienz als das Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Ressourceneinsatz definieren [VDI16]. Durch die digitale Transformation kann diese nachhaltig verbessert werden und so einen positiven Beitrag zur Reduktion der Umweltauswirkungen leisten [TT18]. Die Gründe dafür werden in den folgenden Abschnitten aufgeführt.

3.2.1 Internet of Things

Eine wichtige Entwicklung der Digitalisierung ist das Internet of Things (IoT). Es gibt keine einheitliche Definition für das IoT. Madakam (2015) beschreibt es in seiner Arbeit als ein offenes und umfassendes Netz intelligenter Objekte, die in der Lage sind, sich selbst zu organisieren, Informationen, Daten und Ressourcen auszutauschen und angesichts von Situationen und Veränderungen in der Umgebung zu reagieren und zu handeln [MRT15]. Eine andere Definition für das IoT liefert Goumagias (2021):

„IoT is an ecosystem of technological innovations that changes the way we engage with devices and the internet.“ [GWDC21]

Die intelligente Vernetzung von realen und digitalen Objekten im IoT ermöglichen die Umsetzung von Maßnahmen und Lösungen, die positiven Einfluss auf die Ressourceneffizienz nehmen können [VDI17]. Die möglichen Einsatzfelder sind vielfältig und reichen von Haushalts- und Heimgeräten (z.B. Smartwatches, Fernseher oder Heizung) über Objekte in der Industrie (z.B. Fertigungsmaschinen oder Logistiksysteme) bis hin zur gesamten öffentlichen Infrastruktur (z. B. vernetzter Autoverkehr, intelligente Stromnetze oder Gebäude). In der Industrie genutzte IoT-Anwendungen werden auch als Industrial Internet of Things (IIoT) genannt [HN18] (Abbildung 3.2).

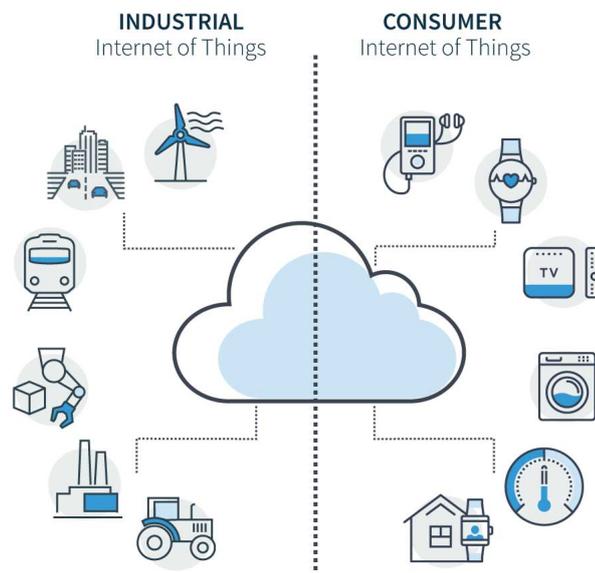


Abbildung 3.2: Anwendungsgebiete von IoT [Sma22]

Mit dem IIoT werden Maschinen zu Produktionssystemen verknüpft. Das gesamte Produktionsumfeld wandelt sich in ein großes Informationsnetzwerk. Softwareanwendungen sind dabei das zentrale Bindeglied, vernetzt über das Internet in der Cloud [HN18]. Es entsteht die sog. „Smart Factory“. Das Ziel ist es, intelligente Wertschöpfungsnetzwerke aufzubauen [VDI17]. Maschinen, Anlagen, Logistik und Produkte kommunizieren und kooperieren direkt miteinander und mit dem Menschen. Unternehmensübergreifende Produktions- und Logistikprozesse werden intelligent miteinander gekoppelt [VDI17]. Damit kann die Produktion flexibler und,

gerade für eine klimagerechte Produktentwicklung wesentlich, effizienter gestaltet werden. Auch in der Nutzungsphase eines Produktes bieten IoT-Anwendungen Chancen zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Die Vernetzung ermöglicht eine Erfassung der Betriebs- und Einsatzinformationen in Echtzeit [HN18]. Durch Nutzung dieser Daten mithilfe von geeigneter Software können die Produktionsprozesse gesteuert werden. In einem nächsten Schritt können die erfassten Arbeits- bzw. Produktdaten aus der Nutzungsphase für eine Echtzeitanalyse und ein Monitoring verwendet werden [HN18] (Abbildung 3.3). Mittels der ausgewerteten Daten lassen sich entsprechende Algorithmen einspielen, die den Betrieb des Produkts optimieren [EAS16]. Im Kontext der Steigerung der Klimafreundlichkeit kann die Nutzungsphase so energie- und ressourceneffizienter gestaltet werden. Gleichzeitig lassen sich Muster und Probleme vorhersehen und so wird Predictive Maintenance ermöglicht.

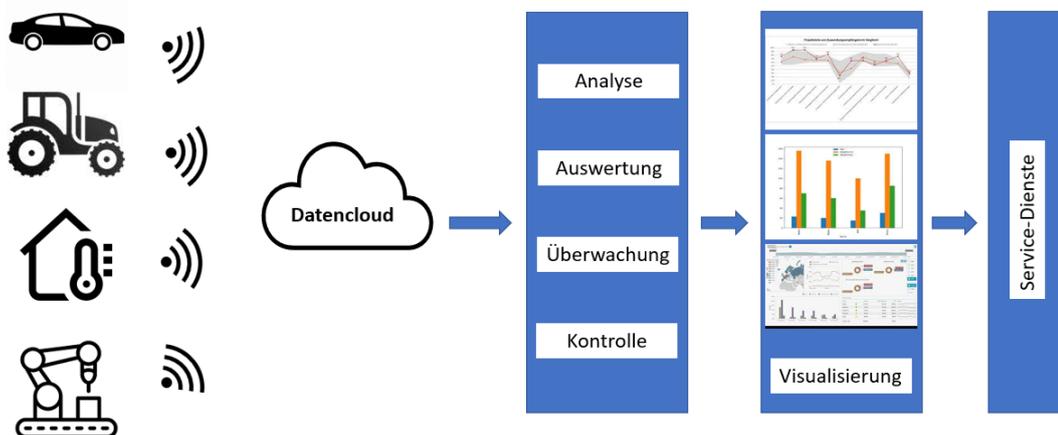


Abbildung 3.3: Einsatz der IoT-Technologie für die Effizienzoptimierung während der Nutzungsphase (eigene Grafik nach [EAS16])

3.2.2 Big Data

Der Begriff „Big Data“ wird in der Literatur unterschiedlich definiert. Für Russom (2011) umfasst Big Data die Datenspeicherung, -verwaltung, -analyse und -visualisierung von sehr großen und komplexen Datensätzen [Rus11]. Andere Quellen definieren Big Data über die 4Vs /5Vs [ASC16] [AWGD16] [SSS⁺12]. Hauff (2018) ist überzeugt davon, dass Daten neben dem Faktor Mensch, monetären Ressourcen und materiellen Rohstoffen zur vierten und für viele Bereiche zu der entscheidenden Ressource werden [HN18]. Daraus ergeben sich gute Chancen Ressourcen entlang des Produktlebenszyklus einzusparen. Gerade in der Produktion,

wo steigende Qualitätsanforderungen, eine erhöhte Komplexität und ein hoher Kostendruck konkurrieren, sind die Erfassung und Analyse von Prozessdaten von großem Nutzen [VDI17]. Die Sammlung, Auswertung und Darstellung von Daten in elektronischer Form wird auch als Business Intelligence (BI) bezeichnet. Es ist ein Sammelbegriff für die Technologie, die die Datenaufbereitung, das Data-Mining, also die Datenbeschaffung, das Datenmanagement und die Datenvisualisierung ermöglicht. Eine moderne BI zeichnet sich in der Praxis dadurch aus, dass sie dem Anwender eine vollständige Sicht auf die Unternehmensdaten gewährt [Lit16]. So lassen sich diese Daten zur Beseitigung von Ineffizienzen sowie zur schnellen Reaktion auf Markt- und Lieferänderungen verwenden.

Einen Schritt weiter geht Advanced Analytics. Dies ist ein Bereich der Datenverarbeitung, der sich nicht nur auf deskriptive, retrospektive Datenanalyse konzentriert, sondern auch versucht, Vorhersagen über die Zukunft zu treffen [Sem22]. Der Einsatz von BI und Advanced Analytics kann ein Wachstum des Produktionsvolumens bis zu 25% bewirken und kann zu einer Reduktion von Stillstandzeiten um bis zu 45% führen [Fra15]. Das senkt die Stand-by-Verluste und somit die Energie für die Bedienung der Anlagen. Mit diesen Datenmengen kann die Produktentwicklung bessere Entscheidungen für das Produkt treffen. Betriebsdaten von aktuellen Produktversionen helfen den Entwicklern, die neue nachhaltigere Produktversion von morgen zu erschaffen.

3.2.3 Digitaler Schatten und Digitaler Zwilling

Werden die zuvor genannten Technologien miteinander verknüpft, kann ein hinreichend genaues digitales Abbild der Prozesse in der Produktion, der Entwicklung und angrenzender Bereiche erstellt werden. Die Erstellung einer echtzeitfähigen Auswertungsbasis wird laut VDI (2017) als digitaler Schatten bezeichnet [VDI17]. Die virtuelle Kopie ermöglicht die Analyse von Daten und die Überwachung von Objekten, um bereits im Vorfeld Probleme zu erkennen, Stillstandzeiten zu vermeiden, neue Potenziale zu erschließen und Simulationen durchzuführen. Sensoren, die über den gesamten Fertigungsprozess verteilt sind, erzeugen Signale, die es dem Digitalen Schatten ermöglichen, Betriebs- und Umgebungsdaten zu erfassen, die sich auf den physischen Prozess in der realen Welt beziehen. Diese erfassten Daten werden mit Daten aus dem Unternehmen kombiniert, z. B. die Stückliste, Unternehmenssysteme und Konstruktionspezifikationen. Die Daten können auch andere Elemente wie technische Zeichnungen, Verbindungen zu externen Datenfeeds und Protokolle von Kundenbeschwerden enthalten. Analysetechniken werden eingesetzt, um die Daten durch algorithmische Simulationen und Visualisierungsroutinen zu analysieren, die dann von dem digitalen Schatten verwendet werden

können, um Erkenntnisse zu gewinnen. Das Ziel eines digitalen Schattens ist die Identifizierung von Optimierungspotenzialen (Abbildung 3.4).

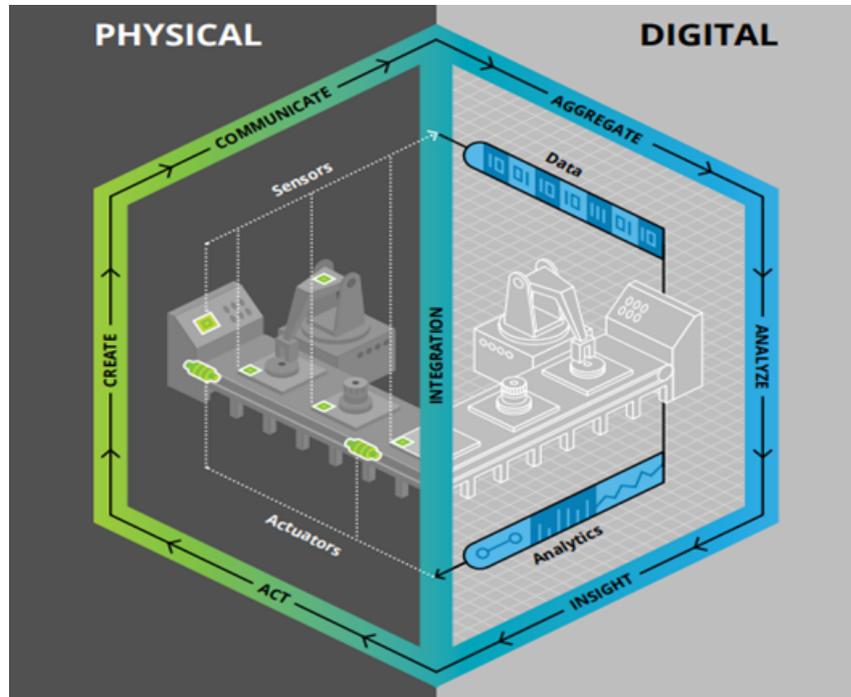


Abbildung 3.4: Zusammenspiel des Digitalen Schattens mit einem Produktionsprozess [Del17]

Während der Digitale Schatten die digitale Abbildung der Wertschöpfungsprozesse ist, bezieht sich der Digitale Zwilling auf die Abbildung des Produktes oder einer Fertigungsanlage. Dabei ist es allerdings, im Gegensatz zu einem digitalen Schatten, unerheblich, ob das Objekt in der Realität schon existiert oder ob es erst noch entstehen wird [IA21]. So wird der digitale Zwilling eines Produktes bereits während dessen Entwicklung erstellt. Durch Simulationen mit dem digitalen Zwilling ist es möglich, die Umweltauswirkungen des Produktes in späteren Lebensphasen besser vorhersagen zu können. Ebenso lassen sich Planungs- und Konstruktionsfehler frühzeitig entdecken und Prozesse optimieren, womit sich die Ressourceneffizienz steigern lässt. Mithilfe des digitalen Zwillings kann Ursachenforschung betrieben werden und eine Lösung für das jeweilige Problem gefunden werden. Doch der digitale Zwilling wird nicht nur in der Produktentwicklung genutzt. Auch in den folgenden Lebensphasen des Produktes schafft er Optimierungspotenziale (Abbildung 3.5). Deloitte definiert die dynamische Rolle des Digitalen Zwillings dementsprechend als „ein sich entwickelndes digitales Profil des histori-

schen und aktuellen Verhaltens eines physischen Objekts oder Prozesses, das dabei hilft, die betriebswirtschaftliche Leistung zu optimieren.“ [Del17]

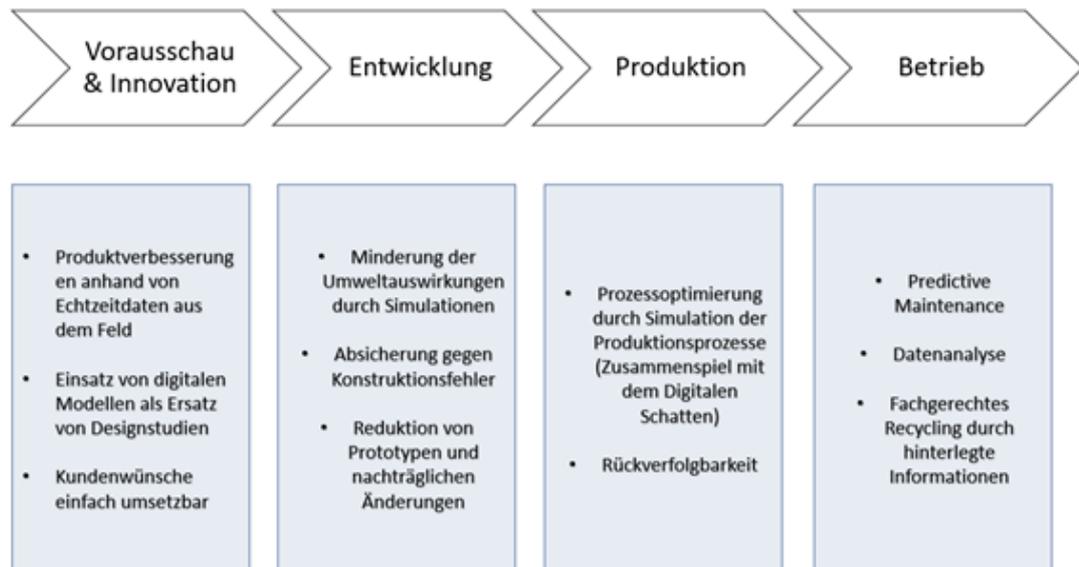


Abbildung 3.5: Optimierungspotenziale eines digitalen Zwillings hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit

3.3 Herausforderungen für eine klimagerechte Produktentwicklung

Die Digitalisierung schafft neue Produkte und Dienstleistungen. Außerdem werden Prozesse effizienter und sparen letztlich Ressourcen. Allerdings gibt es bisher wenige Forschungsarbeiten über die Auswirkungen der Digitalisierung auf die Nachfrage nach Energie oder auf die Nachfrage nach natürlichen Ressourcen wie Kupfer, Spezialmetallen oder seltenen Erden [Man21].

3.3.1 Energiebedarf

Neben den Potenzialen der Digitalisierung zur Steigerung der Energieeffizienz sind auch die Energiebedarfe der Digitalisierung zu berücksichtigen. Da weltweit der Anteil des Energieverbrauchs von Rechenzentren, Datenströmen und privaten Endgeräten zunimmt und

sogar den durch Effizienzsteigerungen eingesparten Gesamtenergieverbrauch übertrifft, trägt die Digitalisierung selbst erheblich zur Umweltbelastung bei [BMW20]. Alleine der direkte Energieverbrauch der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) nimmt in den kommenden Jahren deutlich zu (Abbildung 3.6). Auch wenn die Energieeffizienz der Endgeräte weiter steigt, so ist der wachsende Bedarf an Rechenzentren der Hauptgrund für den Anstieg.

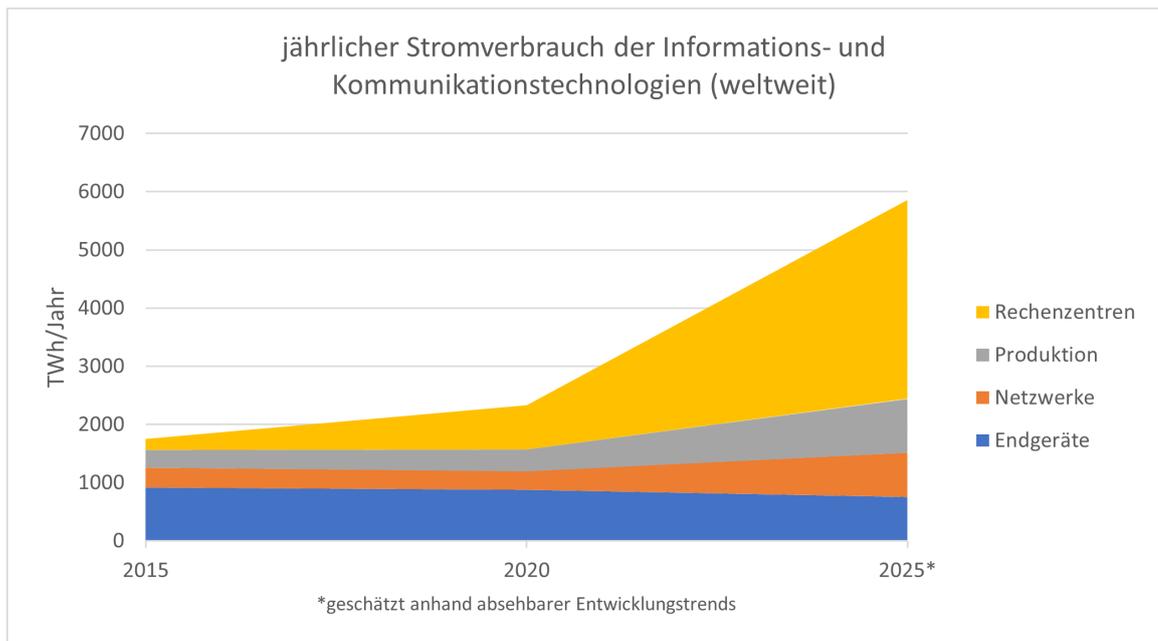


Abbildung 3.6: jährlicher, weltweiter Stromverbrauch von IKT-Technologien (eigene Grafik nach [Sei21])

3.3.2 Bedarf an kritischen Rohstoffen

Nach einer aktuellen Studie der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) könnten Materialien der entscheidende Engpass für viele Zukunftstechnologien werden [Rie18]. Für die Hardware der Digitalisierung und klimafreundlicher Technologien braucht die Industrie u.a. Lithium, Kobalt, Nickel, Kupfer, Graphit und Seltene Erden. Diese Rohstoffe sind knapp und der Abbau und die Aufbereitung sind aufwendig, energieintensiv und verursachen schädliche Umweltauswirkungen.

Probleme bei der Gewinnung der Rohstoffe

Als Beispiel wird hier die Aufbereitung von Lithium geschildert. Lithiumkarbonat, das als Grundstoff zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien dient, wird aus der lithiumreichen Sole von Salzseen gewonnen [PGR17]. Knapp 65% der weltweiten Lithium Reserven befinden sich im Drei-Länder-Eck zwischen Chile, Argentinien und Bolivien [Wel19]. Umweltproblematisch ist zum einen der hohe Wasserverbrauch während der Gewinnung, und das in einer der trockensten Regionen weltweit, und zum anderen die zum Abbau verwendeten Chemikalien, die zum Lösen des Lithiums eingesetzt werden [Wfd18]. Gleichzeitig gelangen nicht brauchbare Schwermetalle in die Umwelt. Beides kontaminiert das Grundwasser und gefährdet die Trinkwassersicherheit der Menschen vor Ort [Sch20].

Rohstoffbedarf

Umweltfreundliche Technologien benötigen Rohstoffe wie Lithium, Sondermetalle, Graphit oder Seltene Erden. Neodym und Dysprosium zum Beispiel sind Elemente, die zu den Seltenen Erden zählen. Sie sind ein wichtiger Bestandteil von Magneten gebraucht. Ohne Magnete funktioniert kein Elektromotor und kein Generator, der hinter dem Windrotor Strom erzeugt. Für die Festplatten in Rechenzentren kommen Ruthenium und Platin zum Einsatz. Die Verfahren zur Wasserstoffelektrolyse, das ein Kernstück sauberer Energieversorgung werden soll, verwenden Iridium und Scandium [Win21]. Nur ein paar Beispiele, die die Abhängigkeit von diesen kritischen Rohstoffen verdeutlichen sollen. Eine Studie der Deutschen Rohstoffagentur hat anhand von aktuellem Erkenntnisstand realistisch erscheinende Entwicklungsmöglichkeiten des Rohstoffbedarfs von Zukunftstechnologien im Jahr 2040 analysiert [DER21]. Sie hat dabei fünf verschiedene Entwicklungsszenarien untersucht. Im umweltfreundlichsten Entwicklungsszenario wird viel auf Dekarbonisierung gesetzt, was zu einem hohen Rohstoffbedarf an Scandium, Lithium, Schweren und Leichten Seltenerdmetallen, Iridium und Kobalt führt [Arn21] (Abbildung 3.7). Der Bedarf resultiert vor allem aus den Wasserstofftechnologien, Lithium-Ionen-Hochleistungsspeichern, Feststoffbatterien, Elektrischen Traktionsmotoren, Windkraftanlagen und Hochleistungs-Permanentmagneten [Arn21]. Diese Studie macht deutlich, dass der digitale Wandel und dessen Technologien eine erhebliche Menge an kritischen Rohstoffen benötigen.

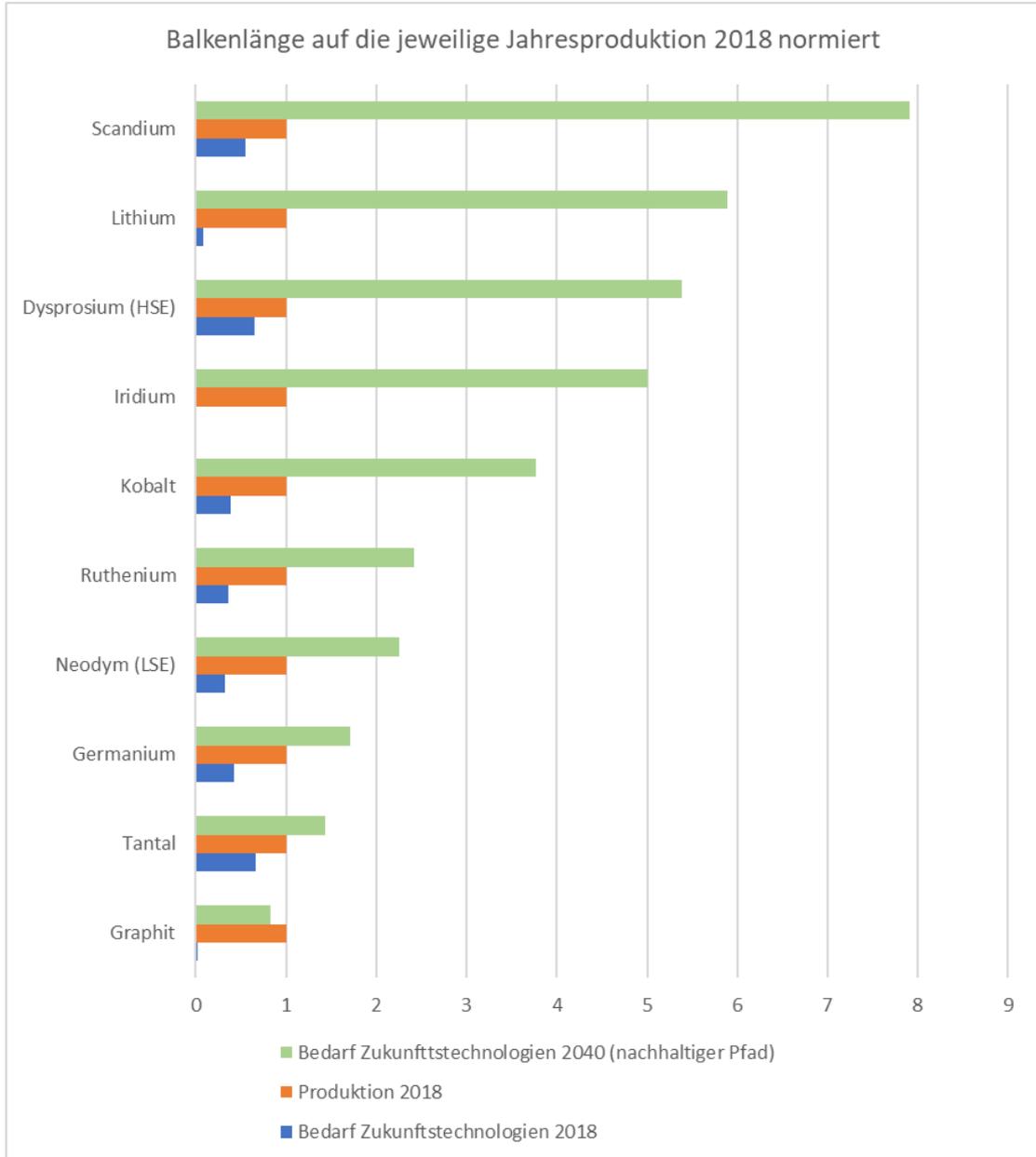


Abbildung 3.7: Ressourcenbedarf von Zukunftstechnologien (eigene Grafik nach [DER21])

3.3.3 Elektroschrott

Der hohe Energiebedarf von Rechenzentren ist jedoch nicht die einzige negative Auswirkung der Digitalisierung auf die Umwelt. Sobald die Hardware das Ende der Lebensdauer erreicht hat, wird sie zu Elektroschrott. Die in Rechenzentren benötigten Maschinen und Geräte haben nur eine begrenzte Lebensdauer. Beispielsweise müssen Server alle drei bis fünf Jahre ausgetauscht werden [Hof17]. Im privaten Gebrauch fällt ebenfalls immer mehr schwer zu recycelnder Elektroschrott an. Das liegt zum einen an der weltweit steigenden Anzahl von Endgeräten und zum anderen an die Verkürzung der Lebensdauer aufgrund verschiedener Arten der Obsoleszenz [FEGMM19]. Laut Global Waste Monitor fielen 2016 global rund 45 Mio. Tonnen Elektroschrott an, wonach lediglich 20% davon fachgerecht recycelt werden [BFG⁺17]. Das liegt daran, dass das Recycling von Elektroschrott aktuell nicht wirtschaftlich ist. Und das, obwohl die im Elektroschrott von 2016 vorhandenen Sekundärrohstoffe einen geschätzten Wert von 55 Milliarden € haben [BFG⁺17]. Von den anderen 80% dieser Abfälle landet heutzutage ein Großteil in Afrika oder Asien [Hof17]. Dort durchsuchen einfache Arbeiter ohne angemessene Schutzkleidung den Elektroschrott nach Spuren von Gold, Coltan oder Kupfer (Zeitler 2022). Um an die Rohstoffe zu kommen, schmelzen die Arbeiter die Plastikkomponenten des Elektroschrotts ein. Bei diesem Prozess werden Chemikalien freigesetzt (Zeitler 2022). Diese sind nicht nur für die Arbeiter, sondern auch für die Umwelt schädlich.

Es wird deutlich, dass es für den Klimaschutz wichtig ist, das Recycling von Elektroschrott voranzutreiben. Das liegt auch daran, dass a) die Edelmetallvorhaben gerade in Europa sowieso schon begrenzt sind und b) die Neugewinnung der relevanten Teile aus natürlichen Quellen einen großen Beitrag zur Erderwärmung leisten [Pie22]. Zwei spannende Projekte, die sich mit Innovationen in diesem Bereich befassen sind zum einen das IRVE Projekt (Innovative Recycling Verfahren für Elektroschrott) von der Fraunhofer Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie [Fra19] und zum anderen die Forschungsarbeit „Biodismantling, eine neuartige Anwendung der Biolaugung beim Recycling von Elektronikabfällen“ einer Forschungsgruppe von der TU Bergakademie Freiberg [MEWS20].

3.3.4 Rebound Effekte

Die Grundlegenden Risiken der Digitalisierung für eine klimagerechte Entwicklung wurden hier erläutert. Doch der sogenannte Rebound-Effekt vergrößert die Auswirkungen dieser Risiken noch. Denn sowohl der Energie- und Rohstoffbedarf als auch der Elektroschrott ist davon betroffen. Sühlmann-Faul (2018) beschreibt den Rebound-Effekt wie folgt:

„Eine Einsparung von bestimmten Faktoren wie Energie oder Rohstoffe geht nicht unbedingt mit einem geringeren Verbrauch einher. Das Einsparpotenzial durch die erhöhte Effizienz wird zumindest teilweise eliminiert durch eine darauf beruhende erhöhte Produktion aufgrund von gesteigertem Verbrauch.“ [SFR18]

Rebound-Effekte treten in mehreren Ebenen auf. Materielle Rebound-Effekte beschreiben den hohen Energie- und Rohstoffbedarf, der für die Effizienzsteigerung nötig ist [BT19]. So wird für eine digitalisierte Produktion eine große Menge an elektronischer Hardware benötigt. Finanzielle Rebound-Effekte werden durch Kosteneinsparungen aufgrund von Effizienzmaßnahmen hervorgerufen. Zum Beispiel können Unternehmen die erhöhten Profite entweder in eine Ausweitung der Produktion (direkter Rebound als Expansion) oder zur Investition in neue Produkte und Dienstleistungen stecken (indirekter Rebound als Diversifizierung der Produktpalette) [San12].

Im Spannungsfeld von Nachhaltigkeitspotenzialen und kommerziellen Interessen ist zu hinterfragen, ob letztgenannte nicht die eigentlich treibenden Kräfte der Digitalisierung sind und welche Konsequenzen dies für die Realisierung der Nachhaltigkeitspotenziale hat. Auch das Konsumverhalten der Gesellschaft kann ein Rebound-Effekt werden. Konsumierende, die effizientere Produkte benutzen sparen Geld, das nun anderweitig investiert wird. Zum Beispiel werden weitere Geräte angeschafft oder ein zusätzlicher Urlaub gebucht, womit der Energieverbrauch insgesamt nicht reduziert wird.

3.4 Zwischenfazit – Einfluss der Digitalisierung

Mithilfe von Zukunftstechnologien, wie das Internet of Things oder der Digitale Zwilling lassen sich ressourceneffiziente Produktionsprozesse realisieren. Außerdem bieten Big Data-Anwendungen die Möglichkeit Auswirkungen des neuen Produktes auf die Umwelt zu simulieren. Noch bevor Prototypen erstellt werden. So lassen sich bereits in der Entwicklungsphase die Weichen für ein klimagerechtes Produkt stellen.

Die Ausführungen in diesem Kapitel zeigen, dass mit dem Einsatz der Zukunftstechnologien allein keine klimagerechte Produktentwicklung gelingt. Problematisch ist die Infrastruktur, die für den Einsatz der Zukunftstechnologien notwendig ist. Diese wirkt sich vielerorts sogar als Verstärker für die Umweltprobleme aus. Den positiven Einflüssen der Digitalisierung (Kap. 3.2) stehen insbesondere steigender Energieverbrauch und intensive Ressourcennutzung gegenüber (Kap. 3.3), wie auch Leregger (2019) erkannt hat [Ler19]. Zudem sind digitale Technologien eng mit Elektroabfällen und der Nutzung von seltenen Erden verbunden. Dennoch ist es of-

fensichtlich, dass die Digitalisierung beim Erreichen von Klimazielen nicht nur nützlich sein kann, sondern auch zwingend notwendig.

Die Einführung klima- und umweltfreundlicher Energieversorgungs- und Transportsysteme sowie die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft werden dank digitaler Fortschritte zunehmend möglich [Ler19]. Auf Basis neuer Technologien und digitalisierter Produktionsprozesse können Treibhausgase und Luftschadstoffe vermieden sowie Energie und Materialien effizienter genutzt werden. Wichtig ist das richtige Mindset für die Digitalisierung zu haben. Kommerzielle Interessen der Unternehmen dürfen nicht über die Umweltziele gestellt werden. Denn die Digitalisierung sorgt auch für Produktivitätssteigerungen und Marktwachstum. Diese führen zu Rebound-Effekten, die die Ressourceneinsparungen verpuffen lassen. Um die negativen Auswirkungen auf die Umwelt zu minimieren, sollte der zusätzliche Energiebedarf mit erneuerbaren Energiequellen aufgefangen werden. Außerdem müssen die Bemühungen hinsichtlich effektiver Recyclingprozessen gesteigert werden, um eine möglichst komplette Kreislaufführung der eingesetzten Rohstoffe zu realisieren.

4 Produktentwicklung und der Einfluss der Produktindividualisierung

Die Technologien der Digitalisierung sind die Grundvoraussetzungen für die digitale Transformation. Ein wichtiger Treiber für die Transformation ist der Trend „Konzentration auf den Kunden“ [Sau20]. Dieser stellt dessen Erwartungen in den Mittelpunkt. Technologien sollen sich immer mehr an die Bedürfnisse der Menschen anpassen und einen hohen Nutzen liefern. Für die Industrie bedeutet dies, dass Produkte immer individueller werden müssen und die Variantenvielfalt erhöht wird. Diese Auswirkungen dieses Trends auf die klimagerechte Produktentwicklung werden in diesem Kapitel untersucht.

4.1 Definition Produktindividualisierung

Der Begriff Individualisierung wird von Bogner (2019) als die „Verschiebung eines oder mehrerer Objekte oder Subjekte in Richtung Einzigartigkeit“ definiert [Bog19]. Produktindividualisierung beschreibt den Prozess der Individualisierung sowie das Ergebnis dieses Prozesses [SB08]. Dieser Prozess umfasst mehrere Wertschöpfungsschritte. Die individuellen Bedürfnisse der Kunden sind Ausgangspunkt und müssen in individualisierte Produkte umgesetzt werden. Unter dieser Prämisse definiert Schackmann ein individuelles Produkt als Leistungsbündel, das sich aus den Teilleistungen Leistungsspezifikation, Leistungszuordnung und Leistungserbringung zusammensetzt (Abbildung 4.1) [Sch03].

Hintergrund der Produktindividualisierung ist der Marktwandel. In den Anfangszeiten der Industrie bestimmte die stark wachsende Nachfrage die Strategie der Unternehmen. Das führte zu einer Produktorientierung. Mithilfe von Serienfertigung und wachsender Standardisierung konnten enorme Produktivitätssteigerungen erreicht werden. Der Nachfrageüberhang war der Treiber dieser Entwicklung. Mit zunehmender Sättigung vieler Märkte und dem daraus resultierenden steigenden Konkurrenzdruck hat sich die Strategie der Verkäufer verändert. Diese waren nun gefordert auf die Bedürfnisse der Kunden einzugehen, um den eigenen Absatz zu sichern. Die zunehmende Globalisierung, die mit Beginn der digitalen Vernetzung ermöglicht wurde, verstärkte diesen Trend zusätzlich. Die fortlaufenden technologischen Entwicklungen

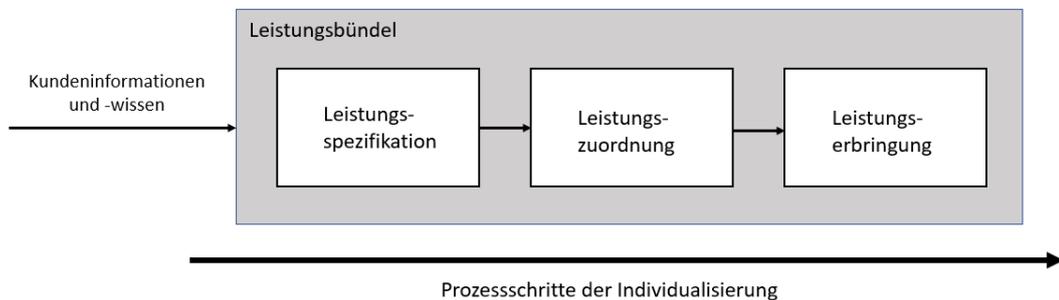


Abbildung 4.1: Produktindividualisierung als Leistungsbündel (in Anlehnung an [Sch03])

ermöglichen eine immer stärker werdende Produktdiversifikation bis hin zu einem komplett einzigartigen Produkt (Losgröße 1) [Kor10] (Abbildung 4.2).

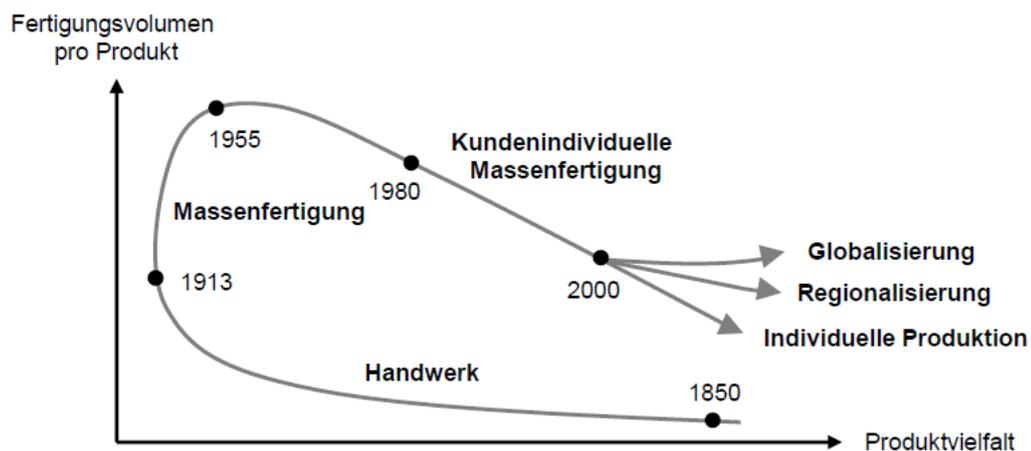


Abbildung 4.2: Evolution der Fertigungsparadigmen [Kor10]

Die Produktindividualisierung grenzt sich von der variantenreichen Serienfertigung und der Sonderfertigung ab. Bei einer variantenreichen Serienfertigung werden vorgefertigte Module individuell zusammengestellt. Mit einer hohen Variantenanzahl wächst die Komplexität der Produktion und die Intransparenz der Kostenentstehung. Um die Komplexität zu händeln, wird bei einer variantenreichen Serienproduktion versucht, die unternehmensinterne Vielfalt an Elementen zu reduzieren [Rai12]. Bei der Produktindividualisierung dagegen soll die Vielfalt nicht vermieden, sondern gezielt durch flexible Produkt-, Prozess- und Unternehmensstrukturi-

ren ermöglicht werden. Dabei werden die Individualisierungsoptionen nur in vorgegebenen Strukturbereichen zugelassen. Anders als bei der Sonderfertigung, wo jedes Produkt eine Neuentwicklung ist und genau nach Kundenspezifikationen hergestellt wird [LR06]. Nach Lindemann (2006) zeichnen sich individualisierte Produkte durch folgende Eigenschaften aus[LR06]:

- Konfiguration vordefinierter Module und kundenspezifische Gestaltung in definierten Produktbereichen
- Produkt wird in Grundstruktur vorentwickelt
- Anpassung des Produktes an individuelle Kundenbedürfnisse erfolgt auftragspezifisch
- Leistungssysteme (Produkte, Prozesse) sind auf Flexibilität ausgerichtet
- Preise und Lieferzeiten mit Serienprodukten vergleichbar

4.2 Herausforderungen für eine klimagerechte Produktentwicklung

Durch die Produktindividualisierung entstehen neue Herausforderungen für die Produktentwicklung. Rahmenbedingungen ändern sich und die Komplexität der Aufgabe steigt. Mit der Prämisse eine klimagerechte Produktentwicklung zu realisieren, muss sich das Entwicklungsteam bereits vor Beginn einer Maßnahme klar darüber sein, welche konkreten Hürden zu überwinden sind.

4.2.1 Kundenintegration

Zuerst muss der Zeitpunkt der Kundenintegration in den Wertschöpfungsprozess festgelegt werden. Je früher der Kunde in den Wertschöpfungsprozess eingreift, desto mehr Freiheitsgrade entstehen innerhalb einer Produktstruktur [Bog19]. Das Produktindividualisierungsmodell von Piller (2003) unterteilt einzelne Individualisierungskonzepte nach dem jeweiligen Zeitpunkt der Kundenintegration [Pil03](Abbildung 4.3).

Diese Konzepte werden auch als X-to-order-Produktion bezeichnet. Der Buchstabe X bezeichnet den Zeitpunkt im Wertschöpfungsprozess, zu dem kundenbezogene Auftragsinformationen einfließen und ein anonymes Produkt zu einem kundenindividuellen Produkt wird [Hoo15]. Dabei sind die beiden frühesten Formen der Einbindung „Develop-to-order“ und „Engineer-to-order“ eine Besonderheit. Nach der Abgrenzung aus Kap. 4.1 handelt es sich bei diesen



Abbildung 4.3: Individualisierungskonzepte nach Zeitpunkt der Kundenintegration (eigene Grafik nach [Pil03])

beiden um eine komplette Sonderanfertigung. Das Produkt wird nach Kundenanforderungen entwickelt und hergestellt. Beim Konzept Develop-to-order wird der Kunde bereits zur Ideensammlung integriert und beim Konzept Engineer-to-order ab der Konstruktion. Für Mandel sind diese beiden Konzepte allerdings ebenfalls eine Form der Produktindividualisierung [Man12]. „Make-to-order“ bezeichnet eine Produktion auf Bestellung. Die Waren werden erst dann produziert, wenn ein realer Auftrag vom Kunden vorliegt. Häufig wird in der Literatur auch die Bezeichnung „Build-to-order“ genutzt. Bei den folgenden Konzepten findet eine Individualisierung erst im Zuge des Produkterstellungsprozesses statt. Das Konzept „Assemble-to-order“ beschreibt die Montage eines durch den Kunden zusammengestellten Produktes aus Standardkomponenten. Bei „Configure-to-order“ hingegen findet bereits eine kundenanonyme Vormontage statt, wodurch der Kunde nur durch die Konfiguration einzelner Komponenten Einfluss auf die Endmontage nehmen kann [Bog19]. Es zeigt sich, dass die Zuordnung nicht immer ganz einfach ist. Wichtig für die weiterführende Untersuchung ist die Tatsache, dass die Integration der Kunden in den Entwicklungsprozess eine klassische Produktentwicklung

unmöglich macht. Je nach Integrationskonzept müssen vielmehr Produktstrukturen erstellt werden, in denen die Individualisierung stattfindet.

4.2.2 Komplexität der Produktentwicklung

Eine wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung individualisierter Produkte ist der Aufwand (Ressourcen, Kosten, Zeit, etc.), der für die Erstellung aufzubringen ist. Jede zusätzliche Varianz in einer Produktstruktur verursacht potenziell Komplexität in den Prozessen [KG18]. Die Komplexität beschreibt dabei die Anzahl, Vielfalt und Beziehungen der Systemelemente sowie deren Zustände und Veränderlichkeit. Ein System kann als komplex bezeichnet werden, wenn dieses nicht deterministisch, unsicher und zeitlich veränderlich ist [KG18]. Im Kontext der Produktindividualisierung äußert sich Komplexität durch [Pul04]:

- Intransparenz
- Gegenseitige Abhängigkeiten
- Informationsflut
- Vielzahl an Möglichkeiten
- Absicherung der Produkteigenschaften
- Unvorhersehbarkeit
- Wandlungsfähigkeit
- Ungenaue Spezifikation

Nach Pulm (2004) ist die Komplexität an sich kein Problem, sondern sie führt zu Problemen [Pul04]. Aus dieser Sichtweise können zwei Varianten komplexer als zehn Varianten sein. In jeglicher Hinsicht (auch für eine klimagerechte Produktentwicklung) ist es für Unternehmen unabdingbar Strategien zur Beherrschung der Komplexität in ihren Wertschöpfungsprozess zu implementieren.

4.2.3 Modularisierung der Produkte

Um eine Produktindividualisierung umsetzen zu können, sind modulare Produktarchitekturen, definierte Schnittstellen sowie standardisierte (Änderungs-)Prozesse notwendig. Denn erst die Möglichkeit zum Austausch von Komponenten erlaubt eine Individualisierung. Gleichzeitig ist die Modularisierung wichtig für die Händelbarkeit der Komplexität [Pul04]. Sie hilft eine gezielte Produkt- und Prozessindividualisierung innerhalb gewünschter Strukturen zu ermöglichen. Modularisierung beschreibt die Aufteilung eines Produkts in relativ unabhängige Komponenten, die sich durch wenige, standardisierte Schnittstellen auszeichnen. Eine Komponente ist ein Bauteil oder eine Baugruppe, die als Modul bezeichnet wird [Bog19]. Grundsätzlich werden einzelne Module unabhängig vom Gesamtprodukt entwickelt und gefertigt und anschließend in mehreren Produkten wiederverwendet [Bog19]. Durch die Kombination von Modulen mit unterschiedlichen Funktionen können unterschiedliche Produktvarianten erstellt werden. Dies wiederum schafft effektiv Vielfalt bei beherrschbaren Auswirkungen auf die interne Komplexität des Unternehmens [SR18] (Abbildung 4.4). Diese Grundsystematik erlaubt auch die Integration von immer mehr individualisierbaren Modulen innerhalb einer vorgegebenen Produktstruktur.

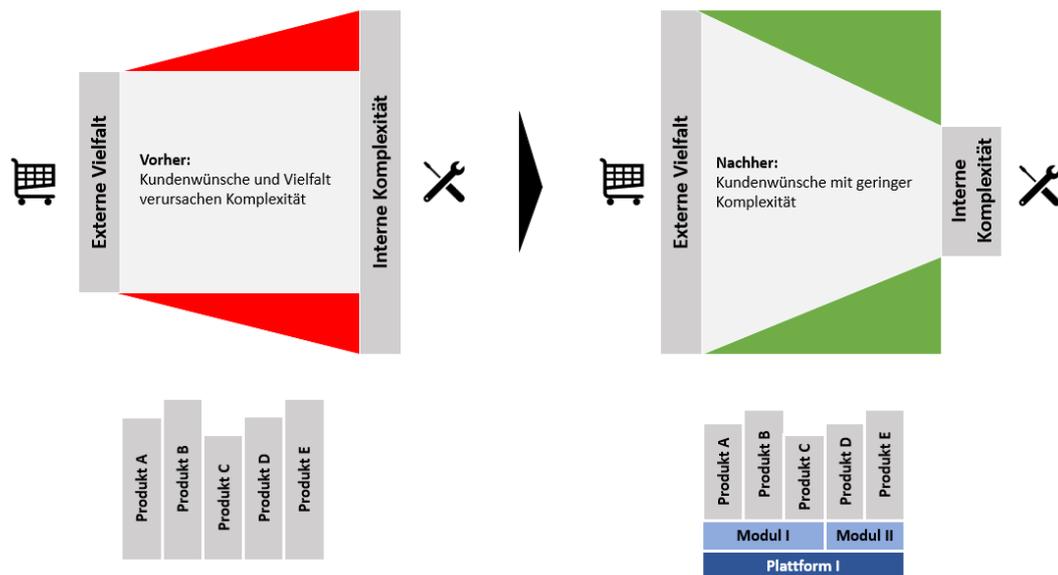


Abbildung 4.4: Trichtereffekt durch eine modulare Produktstruktur (eigene Grafik nach [Wü21])

4.2.4 Flexibilität der Produktion

Bei der Konzeption eines Produktionssystems für die Herstellung individueller Produkte müssen bestimmte Anforderungen berücksichtigt werden, damit die Bedürfnisse des Kunden auch produktionstechnisch optimal erfüllt werden können. Entscheidend für die Gestaltung des Produktionssystems sind die in der Produktentwicklung definierten Freiheitsgrade für das herzustellende Produkt [Bog19]. Aufgabe der Produktion ist es, die Machbarkeit aller in der Entwicklung definierten Produktvarianten sicherzustellen und die äußeren Einflussgrößen durch die Möglichkeit einer schnellen und kostengünstigen Anpassung an neue Gegebenheiten zu beherrschen [BCM99]. Lindemann (2006) formuliert vor diesem Hintergrund drei grundsätzliche Anforderungen an die entsprechenden Produktionssysteme [LR06]:

- **Erweiterungsfähigkeit** - bezeichnet die Fähigkeit der Skalierung eines Produktionssystems.
- **Integrationsfähigkeit** - beschreibt die Möglichkeit, neue Aufgaben, Methoden und Hilfsmittel in ein bestehendes System aufzunehmen.
- **Lernfähigkeit** - bezieht sich auf die Fähigkeit bei neuen Anforderungen Ähnlichkeiten zu vergangenen Planungen zu erkennen und so die Möglichkeit der Adaption bestehender Lösungen zu nutzen.

Je nach Grad der Produktindividualisierung muss ein geeignetes Maß an Flexibilität gefunden werden. Der Begriff Flexibilität kann als die Fähigkeit eines Systems oder Prozesses verstanden werden, sich effektiv an sich ändernde Bedingungen anzupassen [MB90] [Zel82]. Westkämper (2000) ergänzt in seiner Definition von Flexibilität den Aspekt der Planung der Anpassungsmöglichkeiten:

„Ein System wird als flexibel bezeichnet, wenn es im Rahmen eines prinzipiell vorgedachten Umfangs von Merkmalen sowie deren Ausprägungen an veränderte Gegebenheiten reversibel anpassbar ist.“ [WZBT00]

Anpassungen an Produktionssystemen sollten mühelos möglich sein, d.h. innerhalb kurzer Zeit, zu geringen Kosten und reversibel, ohne dabei den Grundaufbau des Systems zu verändern [Bog19]. Dazu werden laut Bogner (2019) sogenannte Flexibilitätskorridore geschaffen, die bereits zum Zeitpunkt der Planung festgelegt werden. Dies sind Handlungsräume für spätere Entscheidungen, in denen die Reaktion auf bekannten Veränderungsdimensionen bereits vordefiniert ist. Außerhalb dieses Bereichs sind Änderungen nicht erwünscht und führen zu

einem deutlich höheren Aufwand. Ein flexibles Produktionssystem muss drei wesentliche Flexibilitätsfelder abdecken [Bog19]:

Produktflexibilität

Die Produktflexibilität bzw. Variantenflexibilität umfasst die Fähigkeit eines Unternehmens innerhalb eines definierten Spektrums unterschiedliche und auch neue Produkte bzw. Varianten auf dem gleichen Produktionssystem fertigen zu können.

Volumenflexibilität

Die Volumenflexibilität umfasst die Anpassungsfähigkeit des Produktionssystems bezüglich des Produktionsvolumens.

Prozessflexibilität

Die Prozessflexibilität definiert sich zum einen durch die Fähigkeiten der einzelnen Produktionsressourcen als auch durch die Möglichkeiten der flexiblen Gestaltung von Prozessen hinsichtlich Abläufe und Strukturen über das gesamte System hinweg.

Jede Form von Flexibilität erfordert die Definition eines zugehörigen Flexibilitätskorridors. Die notwendigen Flexibilitätsbeschränkungen zur Definition von Flexibilitätskorridoren können durch eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ermittelt werden. Ausgedehnte Flexibilitätskorridore sind mit hohen Kosten verbunden, die über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes anfallen. Dafür sind die Anpassungskosten bei großen Flexibilitätskorridoren gering. Andererseits führen enge Flexibilitätskorridore zu geringeren Flexibilitätskosten, jedoch zu hohen Kosten, wenn Anpassungen außerhalb des geplanten Korridors vorgenommen werden müssen. Ziel ist es daher, den optimalen Flexibilitätsgrad, ausgedrückt als Minimum der Summe aus Flexibilität- und Anpassungskosten, zu finden (Abbildung 4.5) [Blu06].

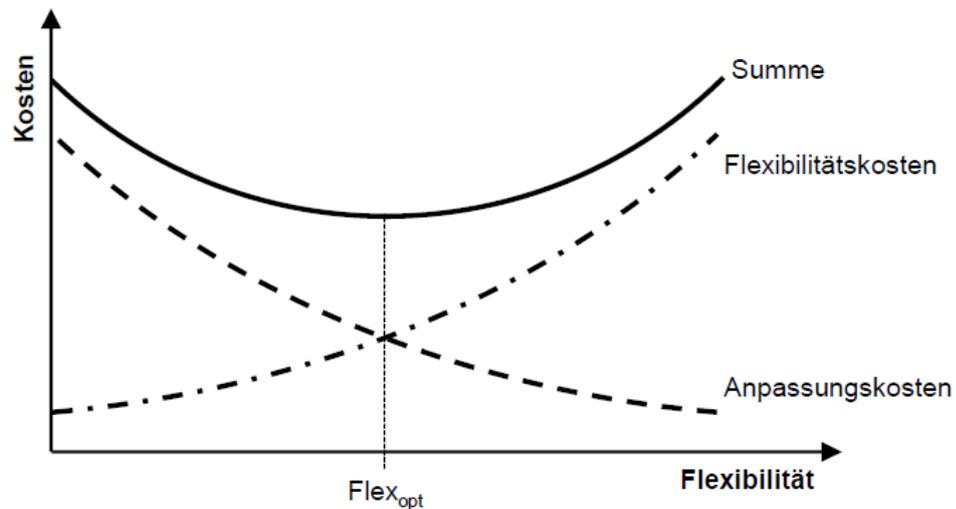


Abbildung 4.5: Anfallende Kosten in Abhängigkeit von der Flexibilität [Blu06]

4.3 Zwischenfazit – Einfluss der Produktindividualisierung

Die Marktentwicklung zwingt Unternehmen zur Individualisierung ihrer Produkte, um die Kundenbedürfnisse bestmöglich gerecht zu werden. Dadurch muss die Produktentwicklung reagieren und das Produktdesign anpassen. Klassische Produktentwicklungsprozesse müssen aufgebrochen werden. Es wird vielmehr eine Produktstruktur entwickelt, die mit individualisierbaren Komponenten bestückt werden kann. Das bedeutet, dass das finale Produkt erst nach Bestellung und Konfiguration durch den Kunden entwickelt werden kann.

Das Produktentwicklungsteam bzw. das Management muss dafür sorgen, die erforderlichen Rahmenbedingungen dafür geschaffen werden und der Aufwand für die Anpassungen möglichst geringgehalten wird. Das führt zwangsläufig zu einer Modularisierung der Produktstruktur. Um die benötigte Flexibilität in der Produktion und einen hohen Individualisierungsgrad erfolgreich umsetzen zu können, sollte der Fokus in der Produktentwicklung auf die Prozessgestaltung gelegt werden. Anders als bei einer Produktorientierung werden die Produktionssysteme strategisch bestimmt. Aus diesen entsteht dann ein Produktrealisierungsraum, der alle herstellbaren Produktvarianten abbildet (Abbildung 4.6). Bei Individualisierungskonzepten, bei denen die Individualisierung erst nach der Produktion erfolgt, wird die Produktgestaltung mit den individualisierbaren Modulen strategisch bestimmt. Dort kann mit entsprechenden

Flexibilitätskorridoren die gewünschte Individualisierung mit angemessenem Aufwand erzielt werden.



Abbildung 4.6: Prozessorientierte Produktentwicklung für frei individualisierbare Produkte (eigene Grafik nach [Bog19])

Dieser strukturelle Wandel der Produktentwicklung wirkt sich zwar nicht direkt auf die klimagerechte Produktentwicklung aus, doch die steigende Komplexität der Entwicklungsprozesse erschweren die erfolgreiche Umsetzung einer klimagerechten Produktentwicklung. Zusätzlich sorgt die steigende Flexibilität in der Produktion für höheren Aufwand, der wiederum Effizienzinsparungen egalisiert.

5 Wirkzusammenhänge zwischen der klimagerechten Produktentwicklung, der Digitalisierung und der Produktindividualisierung

5.1 Methodik

Die vorgestellten Trends der Digitalisierung und der Produktindividualisierung erzeugen Spannungsfelder, die hier für eine erfolgreiche Umsetzung einer klimagerechten Produktentwicklung untersucht werden. Ziel ist es einen Überblick über die Wirkzusammenhänge der vorgestellten Einflüsse auf eine klimagerechte Produktentwicklung zu schaffen. Dafür werden zuerst Schlüsselfaktoren für eine klimagerechte Produktentwicklung abgeleitet. Hierzu werden die in der Literaturanalyse vorgestellten Ansätze für nachhaltige Produktentwicklung herangezogen. Anschließend werden die Auswirkungen der in Kap. 3 und Kap. 4 vorgestellten Einflüsse der Digitalisierung und der Produktindividualisierung auf die Schlüsselfaktoren untersucht. Diese Untersuchung wird mithilfe einer Design Structure Matrix (DSM) durchgeführt. Mit der DSM lassen sich Elemente aus verschiedenen Themengebieten und deren Beziehungen zueinander gleichzeitig in einer übersichtlichen Form darstellen. Die DSM ist ein einfaches und flexibles Modellierungsverfahren, das für den Entwurf, die Entwicklung und die Verwaltung komplexer Systeme verwendet werden kann. Sie stellt die Elemente eines Systems und ihre Interaktionen dar, wodurch die Systemarchitektur hervorgehoben wird ([Abbildung 5.1](#)). Eine allgemeine DSM zeigt lediglich, ob eine Beziehung zwischen zwei Elementen existiert oder nicht. Es ist nicht möglich daraus zu erkennen, ob es sich dabei um eine positive oder negative Beeinflussung handelt. Um die Art der Beeinflussung zu unterscheiden, wird hier jede Beeinflussung in der DSM entweder mit +1 oder -1 markiert. Ein positives Vorzeichen entspricht einer gleichgerichteten Zustandsänderung und ein negatives Vorzeichen entspricht einer gegensätzlichen Zustandsänderung. Mittels einer DSM ist es jedoch ohne Weiteres nicht möglich eine Aussage über etwaig existierende Kreisschlüsse zwischen den einzelnen Elementen

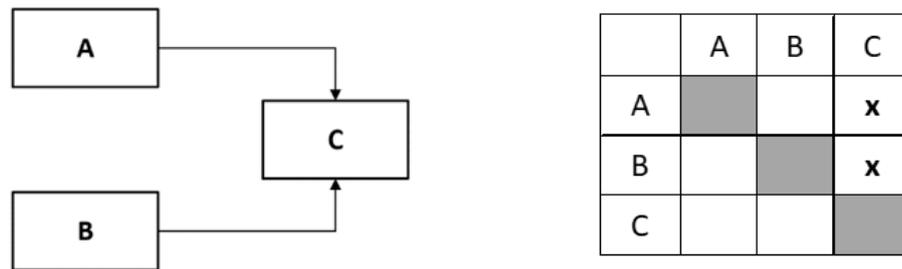


Abbildung 5.1: Wie ein System in einer Design Structure Matrix abgebildet wird.

ten des Systems zu treffen. Somit müssen in einem nächsten Schritt potenzielle Kreisschlüsse identifiziert werden. Es ist zu untersuchen, ob es sich um ausgleichende oder verstärkende Rückkopplungsschleifen handelt. Dafür wird gewöhnlich ein Causal-Loop-Diagramm (CLD) verwendet. Dieses veranschaulicht die Wirkzusammenhänge der aufgestellten Systemvariablen. Jede Beziehung wird in dem Diagramm durch einen Pfeil dargestellt. Ein Pluszeichen kennzeichnet einen positiven (= gleichgerichteten) Ursache-Wirkungs-Zusammenhang, während ein Minuszeichen einen negativen (= gegensätzlichen) Ursache-Wirkungs-Zusammenhang charakterisiert (Abbildung 5.2).

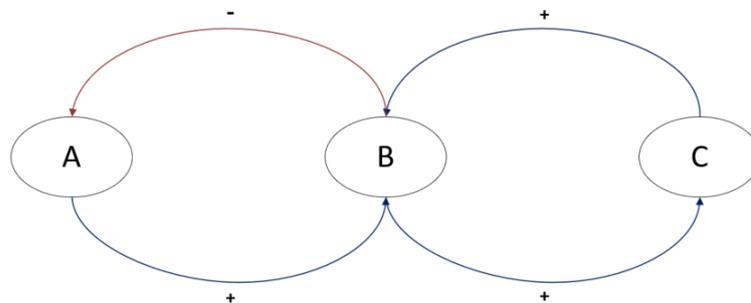


Abbildung 5.2: Aufbau eines Causal Loop Diagrams

Sind alle Beziehungen im CLD eingezeichnet, lassen sich Kreisläufe ermitteln. In [Abbildung 5.2](#) ist zwischen A und B eine ausgleichende Rückkopplung zu erkennen. Die gleichgerichtete Beeinflussung von B durch A führt zu einer gegensätzlichen Beeinflussung von A durch B. Zwischen B und C ist eine verstärkende Rückkopplung zu erkennen. Die gleichgerichtete

Beeinflussung von C durch B führt wiederum zu einer gleichgerichteten Beeinflussung von B durch C. Es ist anzumerken, dass die Variablen eindeutig und verständlich formuliert werden müssen. Eine Systemvariable „Fehlerbehebung“ ist beispielsweise nicht zweifelsfrei zu interpretieren. Sie könnte „Menge an Fehlerbehebung“, „Notwendigkeit zur Fehlerbehebung“, „Anzahl gemeldeter Fehler pro Woche“ und viele weitere Ausprägungen bedeuten. Mithilfe des Überblicks der Wirkzusammenhänge und den aufgezeigten Kreisläufen sollen im anschließenden Kapitel geeignete Angriffspunkte identifiziert und Maßnahmen abgeleitet werden, um Vorschläge für die Umsetzung einer klimagerechten Produktentwicklung zu erarbeiten.

5.2 Schlüsselfaktoren für eine klimagerechte Produktentwicklung

Im ersten Schritt werden die relevanten Eigenschaften für ein klimagerechtes Produktdesign gesammelt. Daraus werden dann die Schlüsselfaktoren abgeleitet. Dafür werden die in der Literaturanalyse vorgestellten Ansätze für nachhaltige Produktentwicklung herangezogen. So können acht Schlüsselfaktoren identifiziert werden ([Tabelle 5.1](#)).

Tabelle 5.1: Die acht Schlüsselfaktoren einer klimagerechten Produktentwicklung

Schlüsselfaktoren	Beschreibung
Materialbedarf	Beschreibt den Materialbedarf des Produkts, alle benötigten Hilfsstoffe, die Menge an Abfällen, die während der Produktion anfallen sowie die benötigten Verpackungsmaterialien.
Energieverbrauch	Beschreibt den Energieverbrauch des Produktes über den gesamten Lebenszyklus. Von der Produktidee bis zur Wiederverwertung
Produktionsaufwand	Beschreibt den Aufwand, der für den Produktionsprozess betrieben werden muss. Dabei wird die Anzahl der Prozessschritte, der Vorbereitungsaufwand sowie der Lageraufwand berücksichtigt.
Produktlebensdauer	Beschreibt die gesamte Lebensdauer eines Produktes.
Biokompatibilität	Beschreibt den Einfluss der Materialien und des Designs auf die Umwelt. Dieser Faktor impliziert alle benötigten Materialien. Neben den Produktmaterialien auch Hilfsstoffe in der Produktion als auch Verpackungsmaterialien.
Transportaufwand	Umfasst jeglichen Transportaufwand, der für das Produkt benötigt wird. Lieferungen von Rohstoffen, Hilfsstoffen und Zukaufteile, den Transport zwischen den Bearbeitungsschritten sowie den Endtransport zum Kunden. Ziel muss es sein, möglichst wenig Aufwand zu betreiben.
Entsorgungsaufwand	Aufwand, der für die Entsorgung des Produkts, der Hilfsstoffe und der Verpackungsmaterialien betrieben werden muss. Oberste Priorität der Produktentwicklung sollte die Wiederverwendbarkeit des Produktes sein. Doch es lässt sich nicht alles wiederverwenden. Und dann muss der Entsorgungsaufwand möglichst geringgehalten werden.
Wiederverwendbarkeit	Die Wiederverwendbarkeit des Produktes bzw. von dessen Materialien, der Hilfsstoffe in der Produktion sowie der Verpackungsmaterialien. Impliziert auch die Wiederverwendung der Rohstoffe.

5.3 Erstellung einer Design Structure Matrix

Die in Kap. 3 und Kap. 4 vorgestellten Einflüsse werden hier noch einmal zur Übersicht aufgelistet (Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Einflüsse der Digitalisierung und der Produktindividualisierung

Einflüsse Digitalisierung	Einflüsse Produktindividualisierung
Internet of Things	Kundenintegration
Big Data	Komplexität der Produktentwicklung
Digitaler Schatten und Digitaler Zwilling	Modularisierung der Produkte
Produktlebensdauer	Beschreibt die gesamte Lebensdauer eines Produktes.
Energiebedarf	Flexibilität der Produktion
Bedarf an kritischen Rohstoffen	
Elektroschrott (E-Waste)	
Rebound-Effekte	

Diese Einflüsse werden für die Analyse als Faktoren in der DSM eingesetzt. Dabei muss der Einfluss von IoT in zwei Anwendungsfälle unterschieden werden. Zum einen sind die Produkte selbst immer häufiger mit der IoT-Technologie ausgestattet und zum anderen wird die IoT-Technologie als Hilfsmittel für die Produktion genutzt. Die industrielle Nutzung wird auch Industrial Internet of Things (IIoT) genannt (siehe Kap. 3.2.1). Da mit dem Schlüsselfaktor Energieverbrauch der Energiebedarf der Digitalisierung ebenfalls adressiert wird, wird diese Thematik in der DSM nicht explizit aufgeführt. Außerdem werden der „Digitale Schatten“ und der „Digitale Zwilling“ für die Untersuchung zusammengefasst betrachtet, da sie eng miteinander verbunden sind und meist gleichzeitig eingesetzt werden. Die resultierende DSM, die die Faktoren von allen drei Bereichen und deren Beziehungen zueinander darstellt, ist in [Abbildung 5.3](#) abgebildet. Zu sehen sind die drei Ebenen

- Schlüsselfaktoren der klimagerechten Produktentwicklung (grün)
- Einflüsse der Digitalisierung (blau)
- Einflüsse der Produktindividualisierung (orange),

die jeweils in einer eigenen Farbe eingefärbt sind. Die dunkelgrünen, dunkelblauen und dunkelorange Bereiche in der Mitte der Matrix zeigen die Beziehungen zu den Faktoren der

5 Wirkzusammenhänge zwischen der klimagerechten Produktentwicklung, der Digitalisierung und der Produktindividualisierung

eigenen Ebene. Es ist darauf hinzuweisen, dass hier nur die zwangsläufig entstehenden Auswirkungen berücksichtigt werden können. Diese Analyse soll allgemeingültige Ergebnisse liefern, um am Ende grundlegende Richtlinien für eine Umsetzung einer klimagerechten Produktentwicklung nennen zu können. Dennoch dient diese Methode als Vorlage, um auch im spezifischen Anwendungsfall die Auswirkungen zu ermitteln. Dafür müssen die Faktoren lediglich noch einmal neu bewertet werden. Diese DSM basiert auf den bereits vorgestellten Erkenntnissen aus der Literaturanalyse. Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Auswirkungen auf die klimagerechte Produktentwicklung werden hiermit veranschaulicht.

	Materialbedarf	Energieverbrauch	Produktionsaufwand	Produktlebensdauer	Biokompatibilität	Transportaufwand	Entsorgungsaufwand	Wiederverwendbarkeit	Consumer IoT	Industrial IoT	Verfügbare Daten (Big Data)	Verwendung des Digitalen Zwillings	Bedarf an kritischen Rohstoffen	E-Waste	Rebound Effekt	Zeitpunkt der Kundenintegration	Komplexität der Produktentwicklung	Modularisierung der Produkte	Flexibilität der Produktion
Materialbedarf						1	1												
Energieverbrauch																			
Produktionsaufwand	1	1				1	1												
Produktlebensdauer	-1	1											-1	-1					
Biokompatibilität																			
Transportaufwand		1																	
Entsorgungsaufwand		1																	
Wiederverwendbarkeit	-1												-1	-1					
Consumer IoT		1	1	-1			1	-1			1		1	1			1		
Industrial IoT		1									1					1			
Verfügbare Daten (Big Data)	-1	-1																-1	
Verwendung des digitalen Zwillings	-1	1	-1			-1	-1											-1	
Bedarf an kritischen Rohstoffen					-1														
E-Waste							1												
Rebound Effekt	1	1											1	1					
Zeitpunkt der Kundenintegration																	1	1	1
Komplexität der Produktentwicklung																			
Modularisierung der Produkte				-1														-1	
Flexibilität der Produktion			1																

Abbildung 5.3: Design Structure Matrix des untersuchten Systems

5.4 Erkenntnisse aus der Design Structure Matrix

Bei der Betrachtung der DSM lassen sich folgende Auffälligkeiten beobachten:

- 1) Die Faktoren der klimagerechten Produktentwicklung beeinflussen sich gegenseitig. Es ist zu erkennen, dass eine Veränderung eines Faktors, bis auf den Energieverbrauch, immer mindestens eine weitere Reaktion erfolgt. Weiter lässt sich feststellen, dass eine positive Veränderung immer positive Reaktionen erzeugen. Das bedeutet, dass sich eine Maßnahme für mehr Umweltfreundlichkeit immer mehrfach auswirkt. Im Gegenzug führt eine negative Beeinflussung auch zu weiteren sich negativ auswirkenden Reaktionen.
- 2) Die Digitalisierung hat einen starken Einfluss auf die Faktoren einer klimagerechten Produktentwicklung. Die Konzentration an Beziehungen zueinander ist in diesem Abschnitt der DSM am größten. Bei genauerer Betrachtung der Wirkzusammenhänge lässt sich erkennen, dass 12 von 17 Beziehungen in diesem Bereich bei steigendem Einfluss der Digitalisierung negative Auswirkungen auf die Faktoren der klimagerechten Produktentwicklung haben.
- 3) Speziell die Verwendung von IoT-Technologien im Consumer Bereich hat einen großen Einfluss im betrachteten System. Die Hälfte aller Faktoren wird davon beeinflusst. Von diesen Beziehungen hat nur eine einen positiven Effekt. Die IoT-Technologie in Produkten liefert neue Nutzungsdaten und ermöglicht somit u.a. neue Service-Dienstleistungen oder Designoptimierungen.
- 4) Die Produktindividualisierung hat nur einen sehr geringen direkten Einfluss auf die Faktoren der klimagerechten Produktentwicklung.
- 5) Die Produktindividualisierung wird von der Digitalisierung beeinflusst, aber andersherum hat sie keinen Einfluss auf die Digitalisierung. Die Digitalisierung vereinfacht die Individualisierung und macht sie in vielen Fällen erst wirtschaftlich sinnvoll nutzbar.

5.5 Darstellung der Zusammenhänge in einem Causal Loop Diagram

In diesem Abschnitt wird ein CLD erstellt, um die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Faktoren besser analysieren zu können. Die Faktoren der DSM werden als Systemvariablen für das CLD verwendet. Um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten, wurden die einzelnen Faktoren

5 *Wirkzusammenhänge zwischen der klimagerechten Produktentwicklung, der Digitalisierung und der Produktindividualisierung*

mit Abkürzungen dargestellt und farblich der jeweiligen Ebene zugeordnet (Tabelle 5.3). Zudem wurde auf die Kennzeichnung der Beziehungspfeile mit einem „+“ oder „-“ verzichtet, um die Darstellung übersichtlich zu halten. Stattdessen wurde ein Farbcode eingeführt: Blaue Pfeile signalisieren eine gleichgerichtete Reaktion und ein roter Pfeil eine gegenläufige Reaktion (Abbildung 5.4).

Tabelle 5.3: Zuordnung der Abkürzungen für die Faktoren des CLD

Faktor	Abkürzung
Materialbedarf	MB
Energieverbrauch	EV
Produktionsaufwand	PA
Produktlebensdauer	PL
Biokompatibilität	BK
Transportaufwand	TA
Entsorgungsaufwand	EA
Wiederverwendbarkeit	WV
Consumer IoT	C IoT
Industrial IoT	I IoT
Verfügbare Daten (Big Data)	VD
Einsatz des Digitaler Zwilling	DZ
Bedarf an kritischen Rohstoffen	B k R
Elektroschrott (E-Waste)	E-W
Rebound Effekte	R E
Zeitpunkt der Kundenintegration	ZK
Komplexität der Produktentwicklung	KP
Modularisierung der Produkte	M
Flexibilität der Produktion	FP

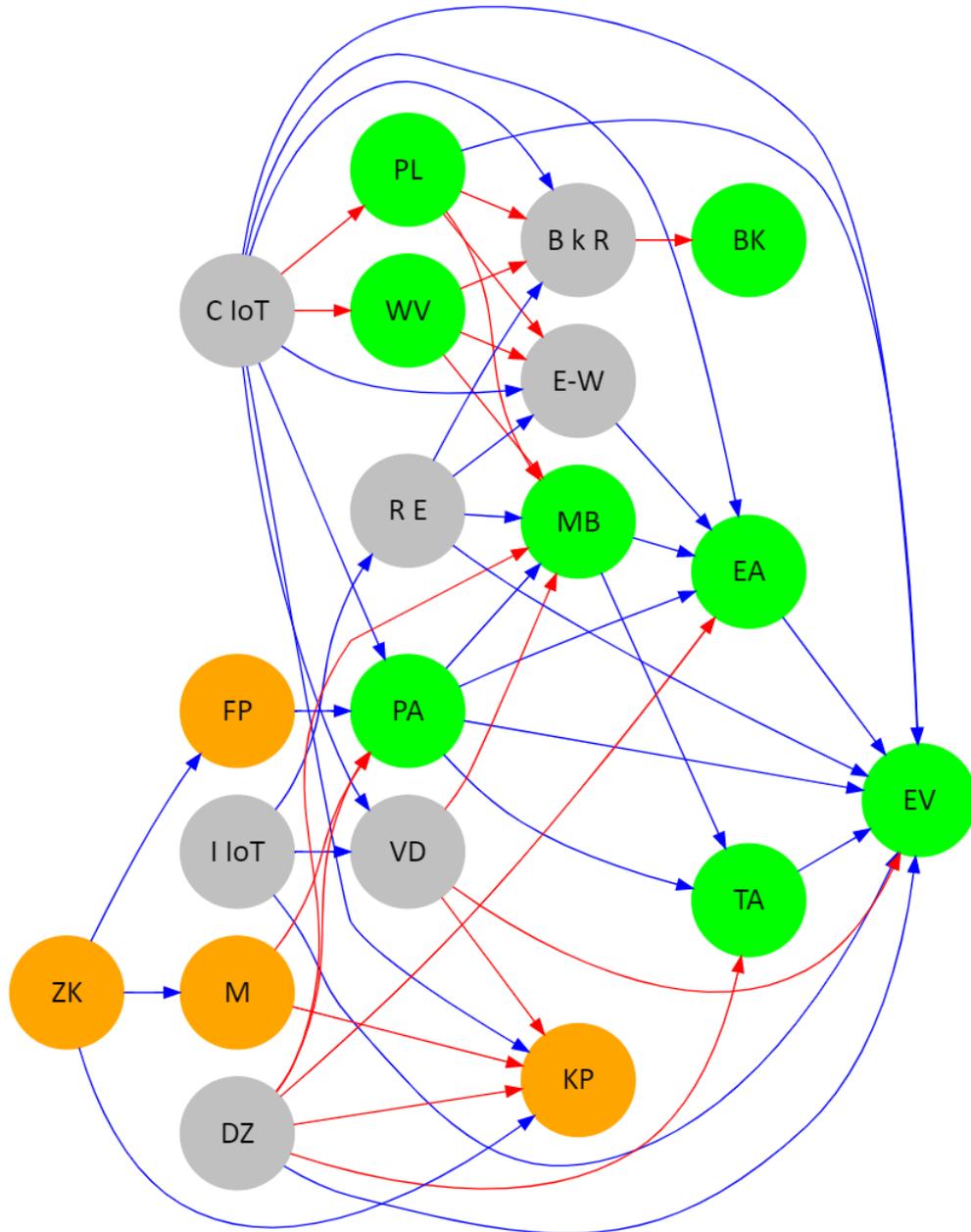


Abbildung 5.4: Causal Loop Diagram des untersuchten Systems

5.6 Analyse des Causal Loop Diagram

Aus dem CLD wird ersichtlich, dass es in dem untersuchten System keine Kreisschlüsse vorhanden sind. Stattdessen lassen sich mehrere Wirkungsketten erkennen, die sich untereinander vermischen. Die vier Einflüsse Industrial IoT, Consumer IoT, Verwendung digitaler Zwillinge und der Zeitpunkt der Kundenintegration werden von keinem anderen Faktor beeinflusst und sind somit Ausgangspunkt von jeweils einer Wirkungskette. Es zeigt sich, dass alle Wirkungsketten am Ende beim Faktor Energieverbrauch enden. Außerdem beeinflussen alle Wirkungsketten die Komplexität der Produktentwicklung. Um die Beziehungen zwischen den Faktoren detaillierter untersuchen zu können, werden die Wirkungsketten isoliert voneinander betrachtet, wodurch eine bessere Übersichtlichkeit geschaffen wird.

Wirkungskette des Industrial IoT

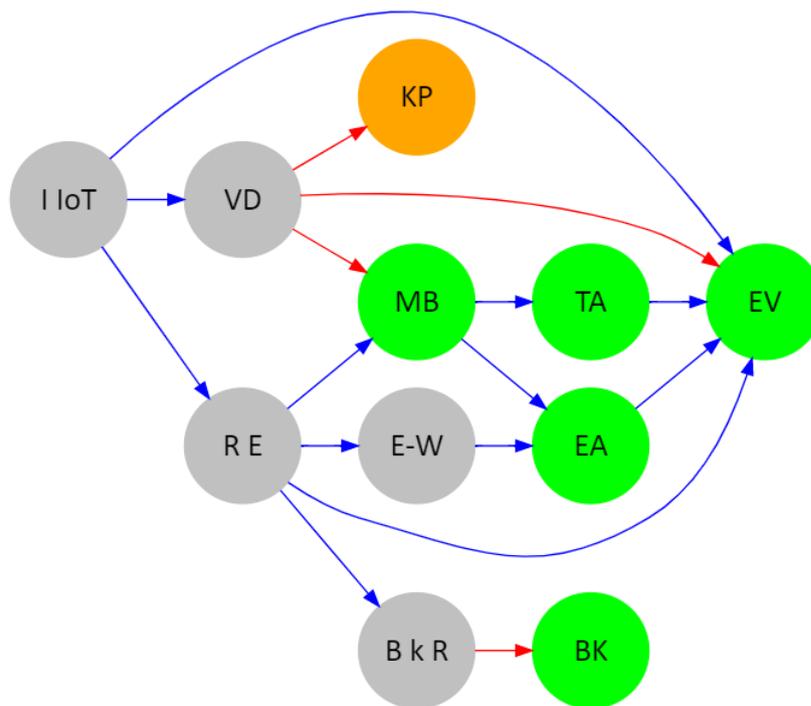


Abbildung 5.5: Wirkungskette des Industrial IoT

Industrial IoT-Anwendungen führen zu einem Gewinn von Datenmengen in der Produktion. Diese können Energiemanagementsysteme nutzen, um den Energieverbrauch zu reduzieren.

5 Wirkzusammenhänge zwischen der klimagerechten Produktentwicklung, der Digitalisierung und der Produktindividualisierung

Außerdem sorgen die neuen Datenmengen für Effizienzsteigerungen in der Produktion. Es lassen sich Materialien durch Ressourceneffizienz und durch Designoptimierungen einsparen, da hierdurch präzisere Toleranzen in der Designphase möglich sind. Das minimiert den Transportaufwand und den Entsorgungsaufwand, da weniger Material benötigt wird. Der verminderte Aufwand für Transport und Entsorgung hat wiederum Einfluss auf den Energieverbrauch und sorgt für eine Reduzierung. Ein weiterer Effekt, der mit einer gesteigerten Datenmenge einhergeht, ist die Reduzierung der Komplexität der Entwicklungsaufgabe. Zusätzlichen Informationen bieten eine bessere Entscheidungsgrundlage und es lassen sich einfacher mögliche Umweltauswirkungen prognostizieren. Es ist anzumerken, dass zusätzlicher Aufwand bei der Datenauswertung entsteht.

Industrial IoT Anwendungen sorgen allerdings auch für Rebound Effekte, die zu einer Steigerung des Energieverbrauchs führen. Gleichzeitig sind Rebound Effekte verantwortlich für einen Anstieg des Materialbedarfs, der wie gerade beschrieben auch den Energieverbrauch beeinflusst. Zusätzlich sorgen Rebound Effekte für einen Anstieg des Bedarfs an kritischen Rohstoffen, wodurch die Biokompatibilität des Produktes abnimmt. Außerdem erhöhen Rebound Effekte die Menge an Elektroschrott, da insgesamt der Markt angekurbelt wird [SFR18], wie es in Kap. 3.3.3 beschrieben wird. Eine große Menge an Elektroschrott steigert den Entsorgungsaufwand, da dieser nur sehr aufwendig recycelt werden kann. Und zuletzt führt die Nutzung von Industrial IoT-Anwendungen grundsätzlich zu Energieverbräuchen in der Produktion. Zusammenfassend lässt sich also schlussfolgern, dass Industrial IoT-Anwendungen auf unterschiedlichen Wegen den Energieverbrauch sowohl positiv als auch negativ beeinflussen.

Wirkungskette des Consumer IoT

Abbildung 5.6 zeigt deutlich die große Einflussnahme des Consumer IoT, d.h. den IoT-Anwendungen in den zu entwickelnden Produkten. Durch IoT-Komponenten in den Produkten können Daten während der Nutzungsphase gesammelt werden. Mit diesen Daten kann die Produktentwicklung ebenfalls erleichtert werden. Der Materialbedarf kann durch Optimierungspotenziale, die sich aus den zusätzlichen Daten ergeben, in Form von engeren Toleranzen reduziert werden. Der reduzierte Materialbedarf erzeugt wiederum weitere Reaktionen, die oben bereits beschrieben wurden. Durch die Daten aus der Nutzungsphase lassen sich die Energieverbräuche in dieser Phase gezielt optimieren.

Auch wenn Consumer IoT-Anwendungen, wie gerade beschrieben, indirekt durch zusätzliche Daten die Produktentwicklung erleichtern, wird sie durch diese ebenfalls auch komplexer, da die Produktstruktur durch die Integration von IoT-Modulen größer und komplizierter wird. Kom-

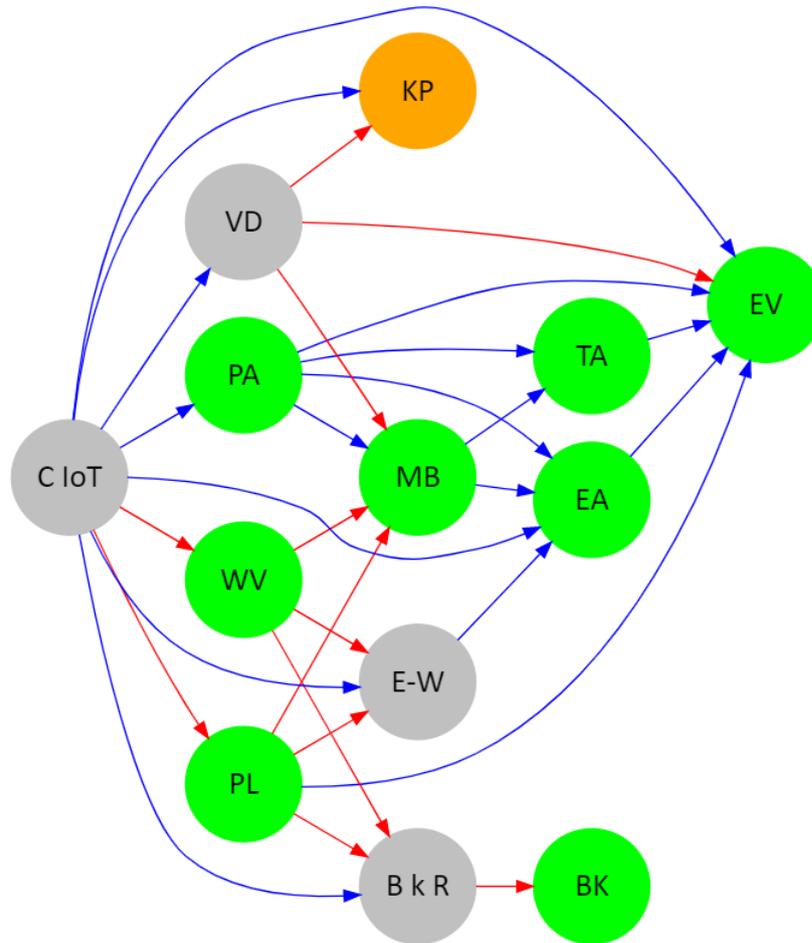


Abbildung 5.6: Wirkungskette des Consumer IoT

pliziertere Produktstrukturen führen auch zu einem höheren Produktionsaufwand, da mehr Prozessschritte benötigt werden. Dadurch steigen Materialbedarf, Transportaufwand, Entsorgungsaufwand und Energieverbrauch. Ein weiterer Einfluss von Consumer IoT-Anwendungen ist der gesteigerte Entsorgungsaufwand, da die IoT-Module als zusätzliche Komponenten in der Produktstruktur integriert sind. Durch die vermehrte Anzahl an IoT-Technologien in Produkten werden immer mehr sogenannte seltene Erden und weitere kritische Rohstoffe für die Hardware benötigt. Diese lassen sich nur aufwendig und oftmals nicht umweltfreundlich gewinnen (siehe Kap. 3.3.2). Eine verringerte Biokompatibilität ist die Folge. Zusätzlich entsteht eine größere Menge an Elektroschrott, der nur sehr aufwendig recycelt werden kann. Ein weiterer Nachteil ist, dass Consumer IoT-Anwendungen führen zu einer Verringerung der Produktlebensdauer, aufgrund von Obsoleszenz. Sowohl die natürliche Obsoleszenz, d.h. die

Alterung der Hardware, als auch die zunehmende Alterung der Technik durch einen hohen Technologiefortschritt ist Grund für die Verringerung der Produktlebensdauer. Auch sorgt die verringerte Produktlebensdauer für einen erhöhten Materialbedarf, einen erhöhten Bedarf an kritischen Rohstoffen und einen Anstieg von Elektroschrott. Allerdings wird dadurch auch der Energieverbrauch gesenkt, denn der fortlaufende Technologiefortschritt ermöglicht immer effizientere Komponenten, die bei einer kurzen Produktlebensdauer dann früher zum Einsatz kommen [Vez18]. Letztlich führen IoT-Anwendungen in Produkten zu einer geringeren Wiederverwendungsquote, da sich derzeit eine Aufbereitung des Elektroschrotts wirtschaftlich nicht rechnet [Pie22]. Durch die geringere Wiederverwendung steigt die Menge an Elektroschrott sowie der Materialbedarf und der Bedarf an kritischen Rohstoffen.

Wirkungskette des Digitalen Zwillings

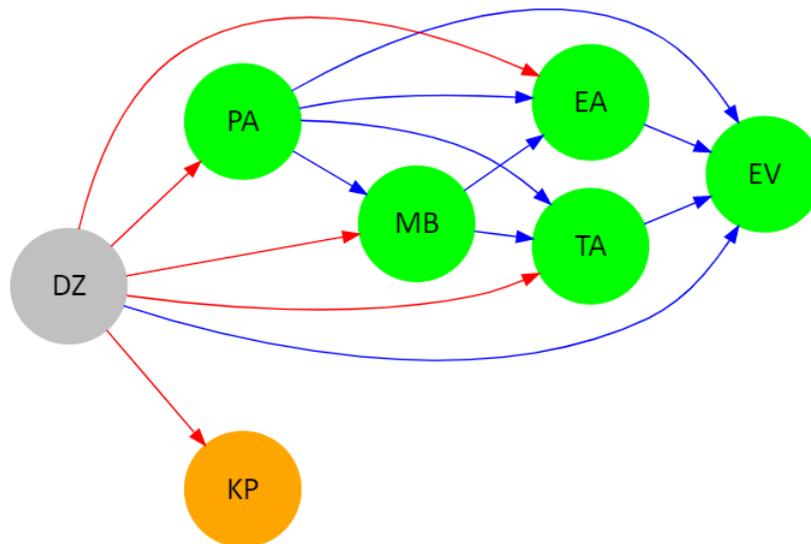


Abbildung 5.7: Wirkungskette des Digitalen Zwillings

Der Einsatz eines Digitalen Zwillings auf der Produktebene und des digitalen Schattens auf der Prozessebene sorgt für Optimierungspotenziale über den gesamten Produktlebenszyklus verteilt. Zunächst kann durch Produktsimulationen während der Planung ein optimiertes Design hinsichtlich Materialbedarf, Transportaufwand, Produktionsaufwand und Entsorgungsaufwand erstellt werden. Der Digitale Schatten sorgt für die Optimierung aller Produktionsprozesse, wodurch die Ressourceneffizienz gesteigert werden kann. Die Digitalen Zwillinge haben allerdings einem gewissen Energieverbrauch. Ein weiterer Benefit des digitalen Zwillings ist die Vereinfachung

chung des Entwicklungsprozesses, da mögliche Konflikte frühzeitig behoben werden können und die Umweltauswirkungen bereits vorzeitig simuliert werden können. Je nach Produktentwicklungsstrategie lassen sich noch weitere Optimierungen erzielen, zum Beispiel hinsichtlich der Produktlebensdauer oder der Wiederverwendbarkeit. Allerdings sind diese Auswirkungen strategiespezifisch und werden somit nicht bei den allgemeinen Auswirkungen aufgeführt. Die beschriebenen Effizienzsteigerungen innerhalb der Produktion lassen sich dagegen generell erzielen. Nur die Stärke der Auswirkungen hängt von der Produktentwicklungsstrategie ab.

Wirkungskette des Zeitpunkts der Kundenintegration

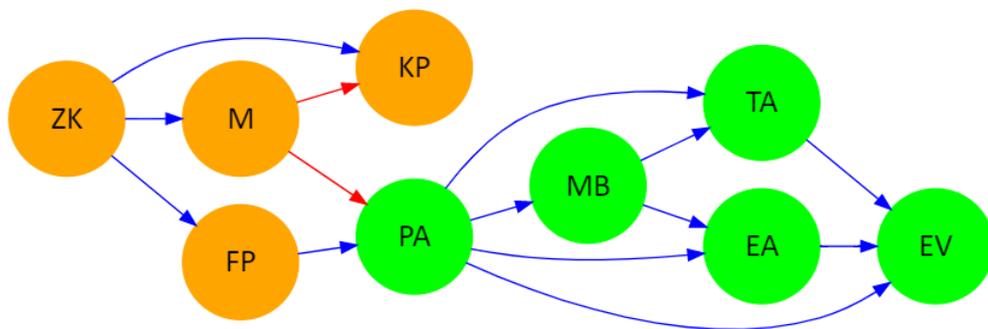


Abbildung 5.8: Wirkungskette des Zeitpunkts der Kundenintegration

In **Abbildung 5.8** ist die Wirkungskette des Zeitpunkts der Kundenintegration zu sehen. Es zeigt sich, dass die Produktindividualisierung sich lediglich auf den Produktionsaufwand direkt auswirkt. Alle weiteren Faktoren der klimagerechten Produktentwicklung in dieser Wirkungskette sind nur indirekt betroffen. Ihre Zusammenhänge wurden oben bereits beschrieben. Ein früherer Zeitpunkt der Kundenintegration führt zur gesteigerten Komplexität in der Produktentwicklung, da eine erhöhte Variantenvielfalt entsteht und aufwendige Prozesse zur Kommunikation mit dem Kunden benötigt werden. Gleichzeitig erhöht sich mit der frühen Kundenintegration auch der Grad der Modularisierung, um diese Variantenvielfalt verwalten zu können. Denn die Modularisierung sorgt für eine Reduzierung der internen Komplexität (siehe Kap. 4.2.3), was für die Produktentwicklung und den Produktionsaufwand nützlich ist. Jedoch steigt mit der frühen Kundenintegration auch die benötigte Flexibilität der Produktion, da die Produktion auf die erhöhte Variantenzahl reagieren muss. Damit wird der Produktionsaufwand wieder erhöht.

5.7 Bewertung der Ergebnisse

Die Analyse der Wirkungsketten zeigt die allgemeinen Wirkzusammenhänge zwischen dem Einfluss der Digitalisierung, dem Einfluss der Produktindividualisierung und den Schlüsselfaktoren einer klimagerechten Produktentwicklung. Die Analyse zeigt, dass es unmöglich ist, beide Trends getrennt voneinander zu analysieren, da diese sich auch gegenseitig beeinflussen. Neue IoT-Technologien verändern die Produktion und Logistik umfassend. Sie überwachen, automatisieren und unterstützen immer mehr Prozesse im Lager und in der Fertigung. Dadurch wird die Ressourceneffizienz gesteigert. Außerdem schaffen sie eine Flexibilität in der Produktion, die einen hohen Grad an Produktindividualisierung ermöglicht. Nach Winkler (2017) bleiben Unternehmen nur zukunftsfähig, wenn sämtliche Prozesse entlang der Wertschöpfungskette digitalisiert werden [WBMS17]. Die Digitalisierung forciert den Innovationsdruck. Das führt zu immer schnelleren Innovationszyklen und den Bedarf an Kosteneinsparungen, um diese Entwicklungen zu finanzieren. Gleichzeitig liefert die Digitalisierung Anreize für neue Produkt-Service-Systeme (PSS) [Pis21]. Diese Entwicklungen müssen bei der Strategiebildung für eine klimagerechte Produktentwicklung berücksichtigt werden.

Die Produktindividualisierung hat zwar nur wenig direkten Einfluss auf die klimagerechten Faktoren, aber sie sorgt dennoch für eine erhöhte Komplexität der Produktentwicklung. Es müssen Produktstrukturen mit mehr Freiheitsgrade geschaffen werden, die trotzdem möglichst effizient umgesetzt werden können. Außerdem muss der Kunde in den Entwicklungsprozess integriert werden. Diese strukturelle Veränderung der Entwicklungsaufgabe erschwert die Umsetzung einer klimagerechten Produktentwicklung. Brosch (2014) fasst die Komplexität im Unternehmen als Auslöser für Zusatzaufwand, erhöhten Ressourceneinsatz sowie Informationsbedarf zusammen [Bro14].

Die Einflüsse der Digitalisierung und der Produktindividualisierung wirken sich häufig auf die Effizienzpotenziale aus. Somit sind die klimagerechten Faktoren, die durch Effizienzsteigerungen angesprochen werden, häufiger betroffen. Allerdings darf die Rolle der anderen Faktoren für eine klimagerechte Produktentwicklung nicht unterschätzt werden. Für Walcher (2017) ist die Wiederverwendung von Komponenten und Rohstoffen sogar ein zentraler Ansatzpunkt für eine klimagerechte Produktentwicklung [Wal17].

Die Richtlinien für eine klimagerechte Produktentwicklung, die aus den in Kapitel 2 vorgestellten Konzepten hervorgehen, auf denen die hier vorgestellten Schlüsselfaktoren basieren, lassen sich nicht gleichzeitig erfüllen. Manche stehen sogar komplementär gegenüber [MP21]. Zum Beispiel kann die Minimierung des Flugzeuggewichts durch den Einsatz von Verbundwerkstoffen die negativen Umweltauswirkungen in der Nutzungsphase minimieren, aber das

5 Wirkzusammenhänge zwischen der klimagerechten Produktentwicklung, der Digitalisierung und der Produktindividualisierung

Lebensende gefährden, da derzeit keine technischen Lösungen für das Recycling von Verbundwerkstoffen verfügbar sind. Dementsprechend ist die Umsetzung einer Strategie immer ein individuelles Konzept, das in den Entwicklungsprozess des jeweiligen Unternehmens eingearbeitet werden muss. Mit dem Einfluss der Digitalisierung und der Produktindividualisierung ändert sich die Strategieentwicklung. Um die Strategieentwicklung zu unterstützen, werden im folgenden Abschnitt allgemeine Richtlinien für eine klimagerechte Produktentwicklung unter Berücksichtigung dieser Einflüsse aufgestellt.

6 Allgemeine Richtlinien zur Umsetzung einer klimagerechten Produktentwicklung

Damit dauerhaft eine klimagerechte Produktentwicklung realisiert werden kann, muss die Produktentwicklung eine systemische und strategische Nachhaltigkeitsperspektive einnehmen, anstatt das Paradigma der inkrementellen Verbesserung und Effizienz von Nachhaltigkeitsaspekten weiter zu verfolgen. Die hier vorgestellten Richtlinien ([Abbildung 6.1](#)) sollen als Handlungsempfehlungen für die Handhabung der Einflüsse Digitalisierung und Produktindividualisierung im Kontext einer klimagerechten Produktentwicklung dienen. Diese werden als Design for Climate Change (DfCC) Richtlinien formuliert. Die Anlehnung an die DfX-Methodik (Kap. 2.2.1) soll dabei helfen in frühen Entwicklungsphasen strategische Entscheidungen für möglichst klimafreundliche Produktdesigns zu treffen. Im weiteren Verlauf müssen diese dann zu konkreten Richtlinien weiterentwickelt werden. Wie das aussieht, wird im Folgenden dargestellt. Grundsätzlich bleiben die Zielvorgaben von den in Kapitel 2 vorgestellten Ansätzen für eine umweltfreundliche Produktentwicklung bestehen. Doch die hier eingeführte DfCC Strategie berücksichtigt zusätzlich die Einflüsse der Digitalisierung und der Produktindividualisierung.

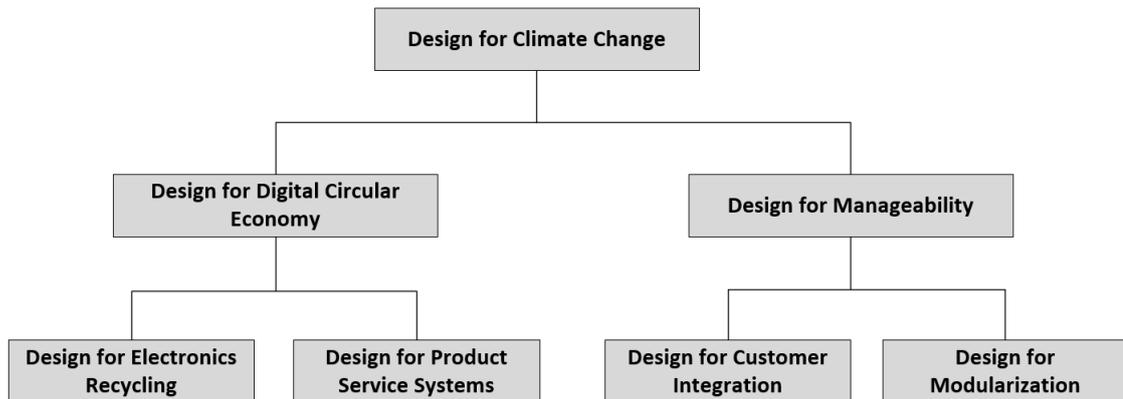


Abbildung 6.1: Richtlinien für eine DfCC-Strategie

6.1 Design for Manageability

Wie in Kapitel 5 dargestellt wurde, sorgen die Digitalisierung und die Produktindividualisierung für eine gesteigerte Komplexität auf allen Ebenen eines Produkts. In der Gesamtheit der Betrachtung lässt sich Komplexität im Unternehmen als Auslöser für Zusatzaufwand, erhöhten Ressourceneinsatz sowie Informationsbedarf zusammenfassen [Bro14]. Beim Design for Manageability ist es das Ziel, die Komplexität der Produktstruktur als auch die Komplexität der Unternehmensprozesse so gering wie möglich zu halten. Somit soll gewährleistet werden, dass die Übersichtlichkeit bestehen bleibt und die Anforderungen an eine klimagerechte Produktentwicklung erfüllt werden.

Für die Umsetzung dieser Richtlinie müssen zuerst die Komplexitätstreiber identifiziert werden. Hierfür empfiehlt Brosch (2014) die Visualisierung der Supply Chain Struktur in einem Swimlane-Diagramm [Bro14]. So kann der Soll-Ist-Prozess verglichen werden. Experteninterviews, mit allen beteiligten entlang der Supply Chain helfen dann die Komplexitätstreiber zu identifizieren. Diese können nach Brosch (2014) in einem Baumdiagramm dargestellt werden (Abbildung 6.2).

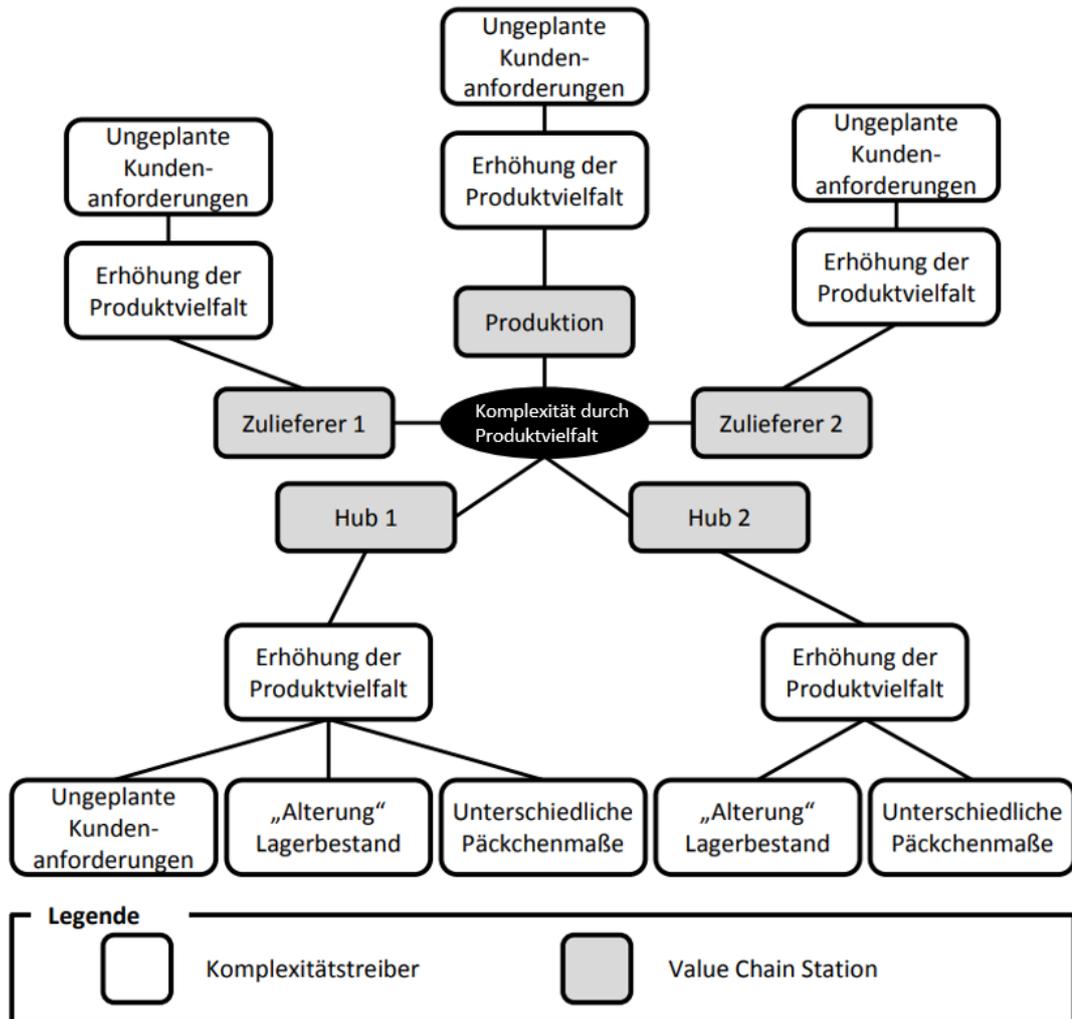


Abbildung 6.2: Beispiel eines Baumdiagramms [Bro14]

Sind die Komplexitätstreiber bekannt können konkrete Maßnahmen eingeleitet werden. Grundsätzlich helfen folgende Richtlinien für die Produktentwicklung die Komplexität möglichst gering zu halten:

- Möglichst wenige Organisationen innerhalb der Supply Chain einplanen. (Als Organisationseinheiten werden dabei Betriebsstätten verstanden, zwischen denen ein außerbetrieblicher Material- oder auch Datentransport erforderlich ist.)
- Zentrale Bündelung des Daten- und Informationsflusses

- Möglichst wenige Prozessschritte in der Produktion durch Anpassungen im Produktdesign

Weiterführend werden zwei weitere DfCC-Richtlinien vorgestellt, die dem Design for Manageability untergeordnet sind, da sie ebenfalls dazu dienen sollen, die Komplexität gering zu halten. Eine fokussiert sich auf die Reduzierung der Prozesskomplexität und die andere auf die Reduzierung der Komplexität der Produktstruktur.

6.1.1 Design for Customer Integration

Im Causal Loop Diagram wurde aufgezeigt, dass eine frühe Kundenintegration zur gesteigerten Komplexität beiträgt. Für diese Problematik wird die Richtlinie Design for Customer Integration eingeführt. Das Ziel von Design for Customer Integration ist die Optimierung des Produktentstehungsprozesses hinsichtlich einer einfachen Kundenintegration. Dafür ist es notwendig den Kunden dabei zu unterstützen seine tatsächlichen Anforderungen zu erkennen. Insgesamt ergeben sich für die Kundenintegration folgende Anforderungen, die es umzusetzen gilt, um eine erfolgreiche Kundenintegration sicherzustellen [Bog19]:

- **Transparenz der Ablaufprozesse:** Sowohl Anbieter als auch Kunde müssen sich über ihre Aufgaben im Leistungserstellungsprozess bewusst sein.
- **Kundenfreundliche Spezifikationswerkzeuge:** Einsatz von Werkzeugen und Plattformen, die den Kunden im Leistungserstellungsprozess unterstützen und anleiten.
- **Effizienter Informationstransfer:** Bereitstellung von notwendigen Informationen zum richtigen Zeitpunkt und in ausreichender Qualität.
- **Geringe Schnittstellenproblematik:** Einfache und schnelle Integration der entsprechenden Informationen in den Leistungserstellungsprozess.

Je nachdem in welcher Phase des Produktentstehungsprozesses die Kunden miteinbezogen werden, gibt es verschiedene Methoden diese Integration umzusetzen. Bretschneider (2009) definiert den Produktentwicklungsprozess in fünf Phasen, wobei die ersten beiden als frühe Phasen, die nächsten beiden als mittlere Phasen und die letzte Phase als späte Phase bezeichnet werden [BLK09] (Abbildung 6.3).

Für die Integration des Kunden bereits in den frühen Phasen bieten sich unterschiedliche Methoden an. Zum einen die Lead-User-Methode von Von Hippel (1986) [Hip86]. Sie stellt ein etabliertes Instrument zur Kundeneinbindung in das Innovationsmanagement dar. Es zielt

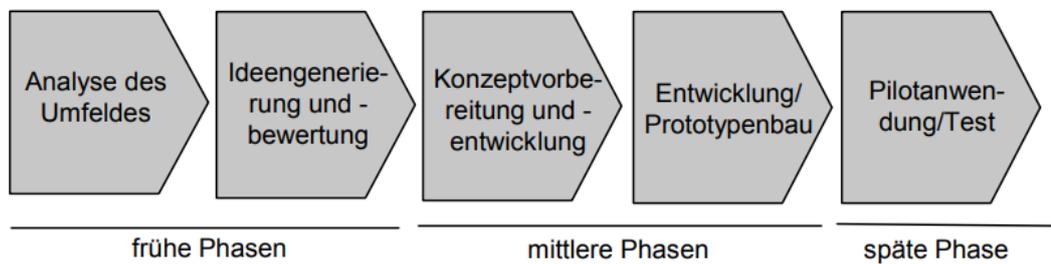


Abbildung 6.3: Frühe bis späte Phasen des Designprozesses [BLK09]

darauf ab, innovative Kunden bzw. Nutzer, so genannte Lead-User, systematisch zu identifizieren und in vom Unternehmen veranstaltete Innovationsworkshops zu integrieren [Hip86]. Dort werden sowohl Produktideen gesammelt als auch zusammen mit dem Entwicklungsteam Konzepte zur Umsetzung entwickelt. Lead-User-Workshops liefern somit sowohl Bedürfnis- als auch Lösungsinformationen. Zum anderen auch die Quality Function Deployment (QFD) Methode. Bretschneider (2009) definiert diese als ein Konzept zur konsequent kundenorientierten Gestaltung des Innovationsprozesses [BLK09]. Das Konzept geht davon aus, dass das Unternehmen bereits eine innovative Idee hat, und entwickelt aus dieser Idee ein Prototyp, der strikt den Kundenbedürfnissen entspricht [Lü07]. Kundenbedürfnisse stellen somit den Maßstab für weitere Entwicklung dar. Weitere Methoden für die frühen Phasen sind Fokusgruppen [Lü07] oder der Community Based Innovation Ansatz [FBEM06].

Um Kunden in die mittleren Entwicklungsphasen, d.h. in der Konzeptions- und Ausarbeitungsphase, einzubinden, lässt sich der Toolkit-Ansatz verwenden. Hier treten Kunden als unabhängige Innovatoren auf, und das Unternehmen ist nur noch in geringem Maße in den eigentlichen Entwicklungsprozess eingebunden (Abbildung 6.4) [KM03]. Bei den Toolkits werden benutzerfreundliche Designwerkzeuge zur Verfügung gestellt, mit denen Kunden ihre eigenen Lösungskonzepte entwickeln können. Unternehmen müssen sich in den meisten Fällen zunächst über Kundenbedürfnisse informieren, um daraus passende Produkte zu entwickeln. Dieser Prozess ist in der Regel langwierig und beinhaltet viele Iterationsschleifen [Hof13].

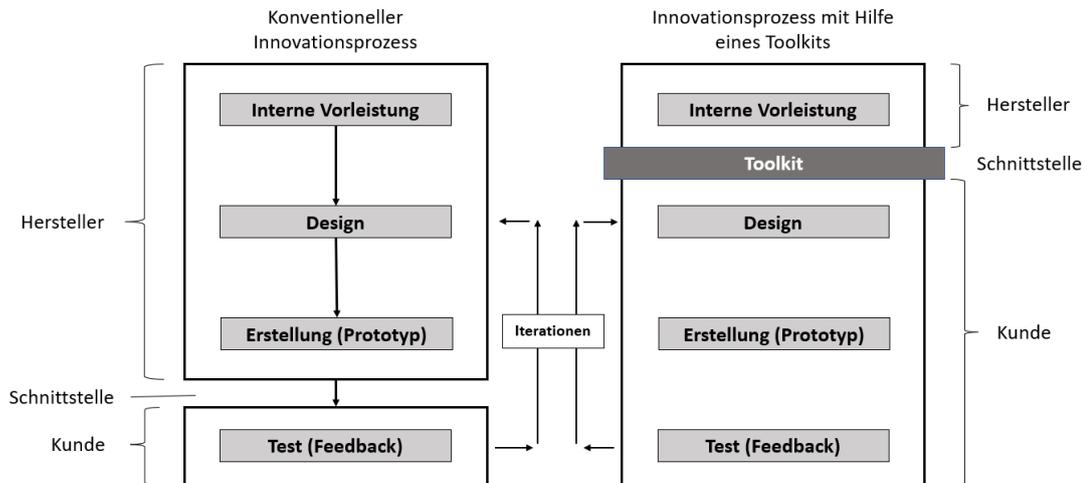


Abbildung 6.4: Funktionsweise des Toolkits-Ansatzes (eigene Grafik nach [Hof13])

Für die späte Phase, der Test- und Pilotphase, lassen sich Kunden durch interaktive Produkttests miteinbeziehen. Produkttests sind Teil der traditionellen Marktforschung und sind gleichzeitig für das Innovationsmanagement eines Unternehmens nützlich. Denn die dabei gewonnenen Testurteile lassen sich als Bedürfnisinformationen interpretieren [BLK09].

6.1.2 Design for Modularization

Diese Richtlinie dient zur Beherrschung der Komplexität in der Produktstruktur. Die Modularisierung wurde in Kapitel 4.2.3 bereits vorgestellt. Aus der Sicht der Produktentwicklung bieten modulare Produktstrukturstrategien große Potenziale, eine extern geforderte Angebotsvielfalt mithilfe einer möglichst geringen, unternehmensinternen Vielfalt an Komponenten und Prozessen zu deren Herstellung bereitzustellen. Die Modularisierung hilft zusätzlich den Produktionsaufwand zu verringern und die Demontagefähigkeit zu verbessern. Somit lassen sich weitere Effizienzpotenziale innerhalb des gesamten Produktlebenszyklus nutzen.

Ericsson hat im Jahr 1998 eine methodische Vorgehensweise entwickelt, um modulare Produktkonzepte strukturiert und effektiv zu konzipieren, das sogenannte Modular Function Deployment (MFD) (Abbildung 6.5) [Eri98]. Diese Vorgehensweise bietet sich an für Unternehmen, die eine modulare Produktstruktur aufbauen wollen.

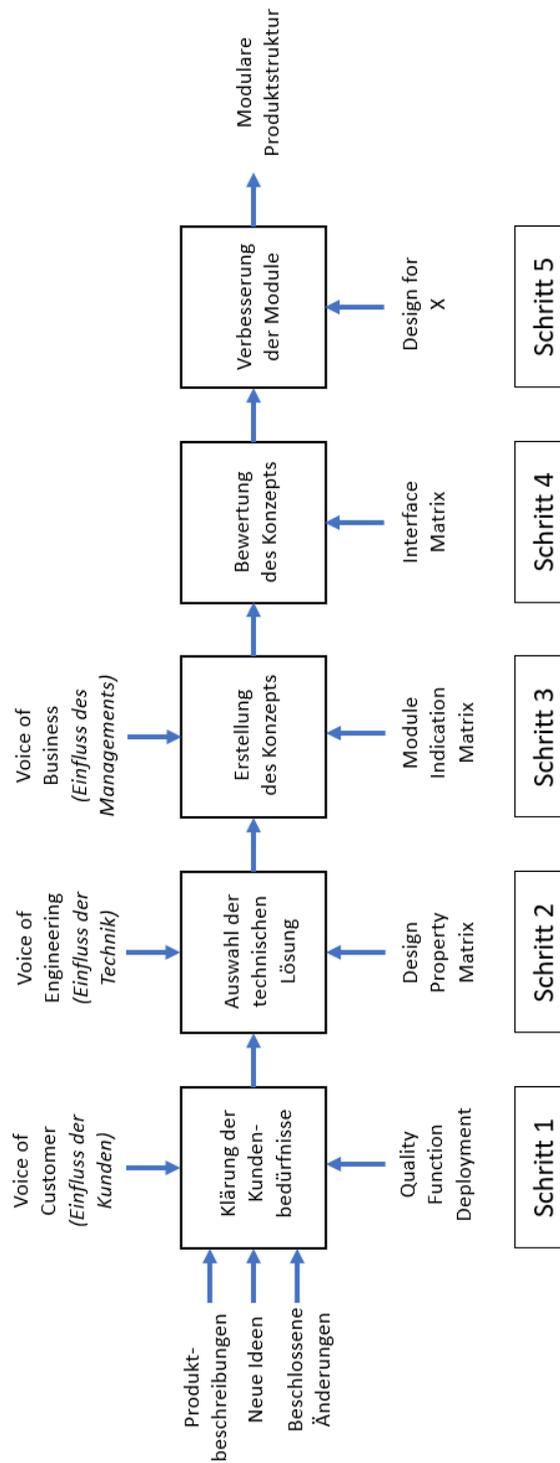


Abbildung 6.5: Aufbau des Modular Function Deployments (nach [Eri98])

Zu Beginn eines jeden MFD-Projekts wird ein Kernprojektteam bestimmt. Es ist wichtig, dass das Kernteam funktionsübergreifend ist [Kon07]. Der Einfluss des Kunden (Voice of Customer) ist ein wichtiger Input für die Produktdefinition und die Festlegung des Wertversprechens eines Produkts. Dieser wird häufig von der Vertriebs- bzw. Marketingeinheit des Unternehmens vertreten [LI13].

MFD besteht aus fünf grundlegenden Schritten [Eri98]. Der erste Schritt besteht in der Klärung der Kundenbedürfnisse und kann mithilfe einer QFD-Matrix durchgeführt werden. Im zweiten Schritt werden die passenden technischen Lösungen für die Anforderungen gesucht. Dafür empfiehlt Lange (2013) die Zerlegung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen, um mit einer Design Property Matrix (DPM) die technischen Einzellösungen mit den Produkteigenschaften in Beziehung zu setzen [LI13]. Die DPM zielt darauf ab, die Bedeutung der vorgeschlagenen technischen Lösungen zu quantifizieren [SEF⁺16]. Wenn mehr als eine technische Lösung eine bestimmte Produktfunktion erfüllen, kann die Pugh'schen Matrix verwendet werden, um die beste Lösung auszuwählen [Pug91]. Im nächsten Schritt werden die Funktionsträger in Modulen zusammengefasst. Dabei hilft die Module Indication Matrix (MIM). Sie dient zur Identifikation von potenziellen Modulen für die modulare Produktarchitektur [LI13]. Dafür wird der Einfluss der Funktionsträger auf die zwölf, in der MIM definierten, Modularitätstreiber gewichtet und bewertet. Diese decken den gesamten Produktlebenszyklus ab [Dan16]. Sind potenzielle Module ermittelt werden diese im nächsten Schritt bewertet, indem überlegt wird, wie die Module mithilfe standardisierter Modulschnittstellen physisch miteinander verbunden werden können [HBC01]. Der MFD-Prozess berücksichtigt sieben Grundtypen von Schnittstellen [LI13]. Eine Interface Matrix dokumentiert den Schnittstellentyp und erleichtert die Analyse der Schnittstellen. Im letzten Schritt wird das Modulkonzept mithilfe von DfX-Ansätzen verbessert.

6.2 Design for Digital Circular Economy

Aktuell konzentriert sich die Digitalisierung von Anlagen und Prozessen vornehmlich auf die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit. Was fehlt ist der ganzheitliche Blick auf die Einbettung des einzelnen Unternehmens ins Gesamtsystem und eine stärkere Fokussierung auf die Umweltaspekte. Das Hauptaugenmerk der Richtlinie Design for Digital Circular Economy ist die Industrie 4.0 zu einer digitalen Kreislaufwirtschaft weiterzuentwickeln, bei der sowohl Stoff- sowie Informationsflüsse geschlossen werden. Das IoT wird zusammen mit der Blockchain-Technologie wird als grundlegende Technologie für die Umsetzung der Digital Circular Economy angesehen [SR18] [MNB⁺21]. Die Blockchain-Technologie kann Informatio-

nen über die Herkunft eines Produkts, über Prozesse und über die beteiligten Parteien sichtbar, nachvollziehbar und überprüfbar für alle Beteiligten der Lieferkette machen [KS18]. So wird die Anwendung von Nachhaltigkeitskriterien gefördert.

Um auch den Stoffkreislauf zu schließen und effizient zu gestalten, gibt es drei Hebelpunkte [Eis20]. Der erste betrifft die Schließung des Kreislaufs. Dieser Hebelpunkt beinhaltet Strategien zur Wiederverwendung und Re-/Upcycling von Komponenten und Materialien. Der zweite Hebelpunkt ist die Verengung der Kreisläufe. Dieser umfasst Strategien zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Der dritte Hebelpunkt ist die Verlangsamung des Kreislaufs, indem die Produktlebensdauer verlängert wird. Um Design for Digital Circular Economy umzusetzen, werden hier ein paar konkrete Richtlinien aufgeführt, sowohl für die Schließung des Stoffkreislaufs als auch für die Schließung des Informationskreislaufs (Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1: Richtlinien für Design for Digital Circular Economy

Richtlinien für den Stoffkreislauf	Richtlinien für den Informationskreislauf
Nutzung von Materialien mit den effizientesten Recyclingtechnologien	Einführung von PLM-Systemen
Kennzeichnung der Materialien	Vernetzung von Produktionsmaschinen
Erleichterung der Reinigung der Materialien	Bereitstellung der Produktdaten in Open-Source Cloudanwendungen
Erleichterung der Abholung und des Transports von Altgeräten	Nutzung von Building Information Modeling (BIM)
Reduzierung von benötigten Ressourcen	
Verlängerung der Produktlebensdauer	

Zusätzlich lassen sich weitere DfCC-Richtlinien aufstellen, die dem Design for Digital Circular Economy untergeordnet sind, da sie die gleichen Ziele verfolgen.

6.2.1 Design for Product Service Systems

Diese Richtlinie fokussiert sich auf die Nutzung von Daten, die während der Nutzungsphase gesammelt werden können. Dafür müssen für die physischen Produkte angepasste Serviceprodukte entwickelt werden. Das bringt nicht nur wirtschaftlichen Nutzen für das Unternehmen, sondern es hilft auch die Produkte klimagerecht zu optimieren [Tuk04]. Neue Wartungsangebote durch Prognosemöglichkeiten können die Produktlebensdauer verlängern. Außerdem kann durch die Erfassung von Daten während der Nutzungsphase ein Nutzungsprofil erstellt werden.

Mit diesen Informationen kann der Hersteller individualisierte Softwareupdates anbieten, die dabei helfen den Energieverbrauch zu optimieren. Die Produktdaten in der Nutzungsphase, z. B. Materialverhalten, Alterungsprozesse oder das Nutzungsprofil der Kunden, lassen sich als Informationsinput für Forschung und Entwicklung sowie Engineering und Produktdesign schon am Anfang des Lebenszyklus berücksichtigen, wodurch zukünftige Produktgenerationen hinsichtlich der Klimafreundlichkeit optimiert werden können. Um ein PSS sinnvoll und effektiv erstellen zu können, schlagen Tonelli (2009) und Schmidt (2015) einen vierphasigen Entwicklungsprozess vor [TTS09] [SMFM15]. Diese vier Phasen umfassen:

- Ideenfindung und Planung
- Konzeptentwicklung
- Detailentwicklung
- Erprobung und Markteinführung

In der Ideen- und Planungsphase wird eine Machbarkeitsanalyse empfohlen, um die Durchführbarkeit und Rentabilität der vorgeschlagenen Idee zu bewerten. Zunächst wird eine Makrobewertung empfohlen, typischerweise eine SWOT-Analyse, die qualitativ hilft das Potenzial der Lösung und die möglichen Hindernisse für ihre Umsetzung zu visualisieren [MCVL13]. In dieser Phase muss eine umfassende Analyse über wirtschaftliche und technologische Aspekte durchgeführt werden. Schließlich zeigt eine Sensitivitätsanalyse die Auswirkungen externer (Wettbewerbsumfeld, Preisgestaltung, Absatzvolumen usw.) und interner Faktoren (Entwicklungskosten, Produktionskosten, PSS-Performance usw.) auf den Gesamtwert des PSS-Angebots [HF17].

Sobald die vorgeschlagene Idee validiert ist, wird in der nächsten Phase ein Konzept erstellt. Die Idee wird als Hauptfunktion aufgefasst, die in Unterfunktionen zerlegt werden kann. Die Ausarbeitung jeder Teilfunktion ist eine schrittweise Annäherung an das umfassende Konzept. Dafür könnte auf eine morphologische Matrix zurückgegriffen werden, die an den PSS-Entwicklungskontext angepasst wird. Diese Anpassung sollte die zusätzlichen Dienstleistungselemente sowie die beteiligten Akteure miteinbeziehen [HF17].

Wird das Konzept genehmigt, geht es in die Detailentwicklung. Hier wird die Ausführung der Produkt-Service Integration, der Prozesslandkarte, der Interaktionen der Beteiligten und des Wertschöpfungsnetzes spezifiziert. Die detaillierte Ausarbeitung kann mit der Function Analysis System Technique (FAST), 1965 von Charles W. Bytheway entwickelt, durchgeführt werden [HF17]. Mit ihr lassen sich in komplexen Systemen Funktionsebenen bilden, die dann

unabhängig voneinander betrachtet werden können.

In der letzten Phase finden die Erprobung und die Markteinführung statt. Für die Erprobung der Produkteigenschaften können klassische Methoden wie die Prototypenherstellung genutzt werden. Die Erprobung der Dienstleistung kann mithilfe der Nachbildung einer realen Kundengruppe durchgeführt werden. Diese hat die Möglichkeit, das PSS zu bewerten. Mit dem Feedback können die Kundeninteraktionen verbessert und mögliche unerwünschte Ereignisse vermieden werden. Sobald der Entwurf feststeht, kann ein Marketingplan nach Kreuzer (2018) erstellt werden, um eine erfolgreiche Markteinführung zu gewährleisten [Kre18].

6.2.2 Design for Electronics Recycling

Beim Design for Electronics Recycling soll das Produktdesign hinsichtlich der Recyclebarkeit optimiert werden. Dabei steht das Recycling von Elektronikkomponenten im Fokus. Diese Richtlinie befasst sich somit mit der Schließung des Stoffkreislaufes. Aktuell führen die Produktion und Abfallbehandlung von elektronischen Produkten zu zahlreichen negativen ökologischen und wirtschaftlichen Auswirkungen (Kapitel 3.3.3). Elektroschrott ist der weltweit am schnellsten wachsende Abfallstrom [TD22]. Gleichzeitig liegt die Recycling-Quote von Elektroschrott im Jahr 2019 weltweit bei nur rund 30% [Pie22]. Mit dieser Richtlinie sollen die Auswirkungen auf die Umwelt verringert werden, indem der Verbrauch von kritischen Rohstoffen reduziert wird. Eine in der Forschung mehrfach erwähnte Methode zur Verbesserung des Recyclings ist das sogenannte Closed Loop Recycling [HKK08] [Fau12] (Abbildung 6.6).

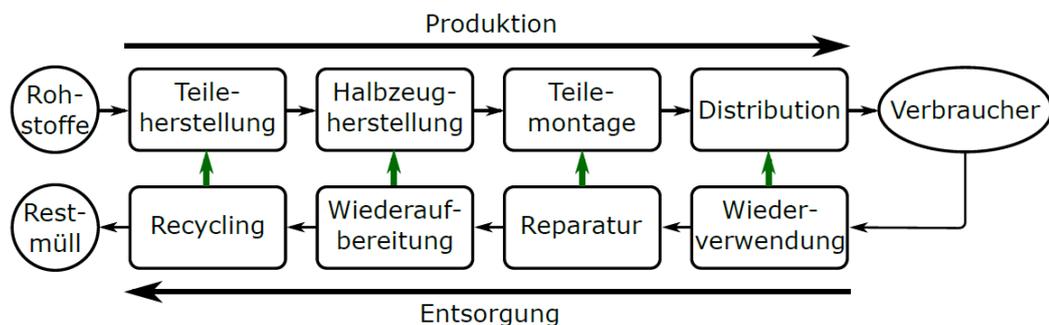


Abbildung 6.6: Modell des Closed Loop Recycling nach [Kem21]

Kemeter (2021) wendet dieses Modell speziell für das Recycling von Elektrogeräten an [Kem21]. Es fasst Produktion und Entsorgung von Elektrogeräten zusammen, indem für die einzelnen Stufen Rückgewinnungsschritte geschaffen werden. Das Ziel dieser Methode ist eine geschlossene Versorgungskette in Bezug auf Bauteile und Rohstoffe. Gleichzeitig kann durch

eine möglichst frühe Rückführung der Energieverbrauch bei der Herstellung neuer Produkte reduziert werden [HKK08]. Um diese Methode in der Praxis umzusetzen ist es wichtig, das Produktdesign für eine gute Recyclebarkeit zu optimieren. Dafür werden hier ein paar Richtlinien zur Orientierung genannt:

- Verwendung kleinerer, kompakterer Platinen
- Minimierung der Anzahl der Komponenten
- Minimierung der Anzahl von Verbindungselementen und Steckern
- Minimierung verschiedener Arten von Kunststoffen und Metallen
- Minimierung der Verwendung von beschichteten oder kontaminierten Metallen
- Verzicht auf Schrauben und Muttern
- Minimierung von Klebstoffen für Kunststoffteile
- Anreize schaffen für Rückgabe des Elektroschrotts

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Für eine klimagerechte Produktentwicklung müssen ökologische Aspekte stärker in die Überlegungen des Produktentstehungsprozess integriert werden. Verschiedene Ansätze wie Eco Design, Design for Environment und Cradle to Cradle liefern wertvolle Ansatzpunkte dafür, wie die Industrie ökologische Kriterien in den Entwicklungsprozess integrieren kann. Gleichzeitig haben die Digitalisierung und die Produktindividualisierung einen immer größeren Einfluss auf das Produktdesign. Der Technologiefortschritt durch die Digitalisierung sorgt für eine regelrechte digitale Transformation [Sau20]. Der Treiber dieser digitalen Transformation ist ein Marktwandel, mit dem die Fokussierung auf den Kunden und dessen Bedürfnisse einhergeht. Um den Kunden zufrieden zu stellen, entstehen neue Geschäftsmodelle, die Variantenvielfalt nimmt zu und Produkte werden individualisiert [Bog19]. Diese Feststellung zeigt, dass die beiden Trends eng miteinander verknüpft sind, wodurch sie nicht getrennt voneinander betrachtet werden können. Diese Trends haben einen deutlichen Einfluss auf das Produktdesign und auf die Produktentwicklung und müssen von klimagerechten Ansätzen berücksichtigt werden. Damit trotz dieser Einflüsse die Bedürfnisse nach klimaneutralen Produkten erfüllt werden können, sind hier Handlungsempfehlungen zum richtigen Umgang mit der Digitalisierung und der Produktindividualisierung aufgestellt worden.

Dafür wurden in dieser Arbeit zuerst die Einflüsse der Digitalisierung sowie der Produktindividualisierung herausgearbeitet. Im Rahmen der durchgeführten Literaturanalyse stellt sich heraus, dass die Digitalisierung in der Produktion große Potenziale zur Steigerung der Ressourceneffizienz bietet. Mögliche Rebound Effekte wirken dem aber entgegen. Es hängt davon ab, was mit den freigewordenen Ressourcen passiert. Hier müssen die Nachhaltigkeitsaspekte für zukünftige Investitionen weiter in den Vordergrund rücken. Die Potenziale der IoT-Anwendungen in neuen Produkten hinsichtlich einer klimagerechten Produktentwicklung liegen vor allem in der Generierung von Daten in der Nutzungsphase. Diese lassen sich auswerten, um a) Optimierungen für die nächste Produktgeneration zu finden und um b) individuelle und produktbezogene Serviceangebote zu erstellen. Die Richtlinie Design for Product Service

Systems soll genau dieses Potenzial fördern, indem für die physischen Produkte bereits in der Entwicklungsarbeit gezielt sinnvolle Serviceangebote erarbeitet werden. Doch der vermehrte Einsatz von IoT-Anwendungen führt zu einem enormen Anstieg des Bedarfs an Seltenen Erden, Lithium und weiteren Sondermetallen. Gleichzeitig wächst die Menge an Elektroschrott deutlich. Die Richtlinie Design for Electronics Recycling soll dabei helfen, diese Herausforderungen zu meistern. Während der Produktentwicklung wird der Fokus auf eine gute Recyclebarkeit, insbesondere von Elektronikkomponenten, gelegt. Durch eine verbesserte Recyclingquote kann der Bedarf an kritischen Rohstoffen reduziert werden. Der digitale Zwilling hilft bei der gesamtheitlichen Optimierung des Produkts über den gesamten Lebenszyklus. Mit ihm lassen sich bereits in der Entwurfsphase die Auswirkungen des Produkts auf die Umwelt vorhersagen. Die digitale Abbildung der Produktion, der Digitale Schatten, dient der Verbesserung der Ressourceneffizienz. Insgesamt hilft der Digitale Zwilling die Entwicklungsaufgabe zu erleichtern.

Die Produktindividualisierung sorgt hingegen für eine gesteigerte Komplexität der Produktentwicklung. Das liegt zum einen an der Integration des Kunden in den Entwicklungsprozess und zum anderen an der wachsenden Variantenvielfalt und den offenen Freiheitsgraden in der Produktstruktur. Die wachsende Komplexität erschwert die Aufgabe ein klimagerechtes Produkt zu entwickeln. Darum muss es Ziel sein a) die Komplexität zu beherrschen, um eine dauerhafte Übersicht der Umweltauswirkungen zu gewährleisten und gleichzeitig die individuellen Bedürfnisse des Kunden zu erfüllen und b) die Digitalisierung zu nutzen, um eine digitale Kreislaufwirtschaft zu erreichen. Die Digitalisierung soll die aktuell vorhandenen Informationslücken zwischen den einzelnen Akteuren im Produktlebenszyklus schließen. Dort verbirgt sich ein großes Optimierungspotenzial für die Nachhaltigkeit, wie auch Wilts (2017) in seiner Forschung festgestellt hat [WB17].

7.2 Limitationen und weiterführende Forschungsansätze

Für diese Arbeit wurde bewusst eine produktunabhängige Betrachtungsweise gewählt, um die Übertragbarkeit der vorgestellten Handlungsempfehlungen zu gewährleisten. Sie hilft ein generelles Verständnis für die Problematik zu entwickeln. Dabei wurde das Thema aus Sicht der Produktentwicklung betrachtet. Es handelt sich hierbei um eine explorative Arbeit, in der sich Wissen angeeignet wurde, um daraus die Ergebnisse zu erzielen. Im Fokus der Überlegungen standen die technologischen Aspekte der Digitalisierung und der Produktindividualisierung, um auf dieser Basis Richtlinien für die klimagerechte Produktentwicklung zum Umgang mit der Technologieentwicklung zu erstellen. Weiterführend könnte eine Fragestellung bzgl. des Ein-

flusses von gesellschaftspolitischen Faktoren der Digitalisierung auf die Produktentwicklung untersucht werden. Gleichzeitig könnte der Fokus auch auf andere Themen des unternehmerischen Handelns gelegt werden. Wie verändert sich die Supply Chain durch die Digitalisierung, die Produktindividualisierung und dem Bestreben nach klimaneutralen Produkten? Diese Wissenssammlungen können Unternehmen bei der Strategiewaehrung helfen. Damit können sie schnell die richtigen Entscheidungen f#r eine nachhaltige Ausrichtung treffen. F#r diese Untersuchungen bieten sich Experteninterviews mit Vorreitern aus der Industrie an.

In einem weiteren Schritt k#nnten die Erkenntnisse dieser Arbeit auf ein konkretes Produkt #bertragen werden. Eine Fragestellung k#nnte lauten: Wie wirken sich die DfCC-Richtlinien auf das aktuelle Produktdesign aus? Es w#re zu untersuchen, wo die DfCC-Richtlinien Optimierungspotenziale aufdecken und wo diese Richtlinien produktspezifisch noch weiter pr#zisiert werden m#ssen.

Insgesamt wurden hier vorhandene Ans#tze der klimagerechten Produktentwicklung vorgestellt. Anschließend wurden die Einfl#sse von der Digitalisierung und der Produktindividualisierung auf die klimagerechte Produktentwicklung untersucht. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurden klare Handlungsempfehlungen in Form von DfCC-Richtlinien formuliert, um trotz eines strukturellen Wandels in der Gesellschaft klimagerechte Produkte entwerfen zu k#nnen. Abschlie#end wurden Vorschläge f#r weiterf#hrende Forschungsarbeiten gegeben. Somit wurde das Ziel der Arbeit erreicht.

Literaturverzeichnis

- [AABR07] ABELE, Eberhard ; ANDERL, R. ; BIRKHOFFER, H. ; RÜTTINGER, B.: *Ecodesign - Von der Theorie in die Praxis*. Springer Berlin Heidelberg, 2007. – ISBN 978-3-540-75437-4
- [ABC14] ARNETTE, Andrew N. ; BREWER, B.L. ; CHOAL, T.: Design for sustainability (DFS): the intersection of supply chain and environment. In: *Journal of Cleaner Production* (2014), Nr. 83, S. 374-390
- [Arn21] ARNOLD, Heinz: Rohstoffe - Wo der Bedarf kräftig steigen wird. (2021). <https://www.elektroniknet.de/automation/industrie-40-iot/wo-der-bedarf-kraeftig-steigen-wird.187695.html>, Abruf: 11.05.2022
- [ASC16] ABHASI, Ahmed ; SARKER, S. ; CHANG, R.: Big Data Research in Information Systems: Toward an Inclusive Research Agenda. In: *Journal of the Association for Information Systems* (2016), Nr. 17, S. 1-32
- [AWGD16] AKTER, S. ; WAMBA, S.F. ; GUNASEKARAN, A. ; DUBEY, R.: How to improve firm performance using big data analytics capability and business strategy alignment? In: *International Journal of Production Economics* (2016), Nr. 182, S. 113-131
- [Bau03] BAUER, Stefan: Design for X - Ansätze zur Definition und Strukturierung. In: *14. Symposium "Design for X"* (2003)
- [BCM99] BORDOLOI, Sanjeev K. ; COOPER, W. ; MATSUO, H.: Flexibility, Adaptability and Efficiency in Manufacturing Systems. In: *Production and Operations Management* (1999), Nr. 2, S. 133-150
- [BFG⁺17] BALDÉ, C.P. ; FORTI, V. ; GRAY, V. ; KÜHR, R. ; STEGEMANN, P.: *The global e-waste monitor 2017 - Quantities, flows, and resources*. International Telecommunication Union, 2017. – ISBN 978-92-808-9053-2

- [BH97] BREZET, Han ; HERMEL, Carolien van: *Ecodesign - A promising approach to sustainable production and consumption*. UN Environment Programme, 1997. – ISBN 978-9-280-71631-3
- [Bha16] BHAMRA, Tracy: *Design for Sustainability - A Practical Approach*. Taylor and Francis, 2016. – ISBN 978-1-317-15235-4
- [BLK09] BRETSCHNEIDER, U. ; LEIMEISTER, J.M. ; KRUMHOLTZ, H.: *Methoden der Kundenintegration in den Innovationsprozess: Eine Bestandsaufnahme*, Technische Universität München, Arbeitspapier, 2009
- [Blu06] BLUMENAU, Jean-Claude: *Lean Planning unter besonderer Berücksichtigung der Skalierung wandlungsfähiger Produktionssysteme*. Universität d. Saarlandes Produktionstechnik, 2006. – ISBN 978-3-930-42965-3. – Dissertation
- [BM14] BRAUNGART, Michael ; McDONOUGH, William: *Cradle to Cradle - Einfach intelligent produzieren*. Piper ebooks, 2014. – ISBN 978-3-492-96479-1
- [BMB07] BRAUNGART, Michael ; McDONOUGH, W. ; BOLLINGER, A.: Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design. In: *Journal of Cleaner Production* (2007), Nr. 14, S. 1337–1348
- [BMW20] BMWI: *Schwerpunktstudie Digitalisierung und Energieeffizienz - Erkenntnisse aus Forschung und Praxis*, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Studie, 2020
- [Bog19] BOGNER, Eva: *Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2019
- [Bro14] BROSCHE, Max: *Eine Methode zur Reduzierung der produktvarianteninduzierten Komplexität*. TuTech Verlag, 2014. – ISBN 978-3-941-49282-0
- [BT19] BIEDERMANN, Hubert ; TOPIC, Milan: Digitalisierung im Kontext von Nachhaltigkeit und Klimawandel – Chancen und Herausforderungen für produzierende Unternehmen. In: *CSR und Klimawandel*. 2019. – ISBN 978-3-662-59748-4, S. 41–62
- [BWT10] BAKKER, C.A. ; WEVER, R. ; TEOH, C.: Designing cradle-to-cradle products: a reality check. In: *International Journal of Sustainable Engineering* (2010), Nr. 1, S. 2–8

- [CG16] CESCHIN, Fabrizio ; GAZIULUSOY, Idil: Evolution of design for sustainability: From product design to design for system innovations and transitions. In: *Design Studies* (2016), Nr. 47, S. 118–163
- [Dan16] DANIILIDIS, Charalampos: *Planungsleitfaden für die systematische Analyse- und Verbesserung von Produktarchitekturen*, Technischen Universität München, Dissertation, 2016
- [Del17] DELOITTE: *Industry 4.0 and the digital twin*. https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/kr/Documents/insights/deloitte-newsletter/2017/26_201706/kr_insights_deloitte-newsletter-26_report_02_en.pdf. Version: 2017, Abruf: 10.04.2022. – Deloitte University Press
- [DER21] DERA: *Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021*, Deutsche Rohstoffagentur (DERA), Studie, 2021. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- [DIN03] DIN: *DIN ISO/TR 14062-2003: Umweltmanagement - Integration von Umweltaspekten in Produktdesign und -entwicklung*. Beuth Verlag GmbH, 2003. – DIN-Fachbericht
- [DIN20a] DIN: *DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Beuth Verlag GmbH, 2020. – DIN-Norm
- [DIN20b] DIN: *DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*. Beuth Verlag GmbH, 2020. – DIN-Norm
- [Doh21] DOHTS, Hannah: Kreislaufwirtschaft und Cradle to Cradle: Was Circular Economy bedeutet. (2021). <https://slow.supply/blogs/magazin/cradle-to-cradle>, Abruf: 12.05.2022
- [EAS16] EIGNER, Martin ; AUGUST, U. ; SCHMICH, M.: *Smarte Produkte erfordern ein Umdenken bei Produktstrukturen und Prozessen*, Siemens Product Lifecycle Management, White Paper, 2016
- [Eis20] EISENRIEGLER, Sepp: *Kreislaufwirtschaft in der EU - Eine Zwischenbilanz*. Springer Gabler, 2020. – ISBN 978-3-658-27378-1

- [EPE22] EPEA: Cradle to Cradle. (2022). <https://epea.com/ueber-uns/cradle-to-cradle>
- [Eri98] ERIXON, Gunnar: *Modular Function Deployment-A method for product modularization*, KTH Royal Institute of Technology Stockholm, Dissertation, 1998
- [Fau12] FAULKNER, David W.: How well are we handling electronic-waste? In: *2012 17th European Conference on Networks and Optical Communications* (2012). – Tagungsband
- [FBEM06] FÜLLER, J. ; BARTL, M. ; ERNST, H. ; MÜHLBACHER, H.: Community based innovation: How to integrate members of virtual communities into new product development. In: *Electronic Commerce Research* (2006), Nr. 1, S. 57–73
- [FEGMM19] FROMHOLD-EISEBITH, M. ; GROTE, U. ; MATTHIES, E. ; MESSNER, D.: *Unsere gemeinsame digitale Zukunft*. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), 2019. – ISBN 978-3-946830-02-3
- [Fik96] FIKSEL, Joseph: *Design for environment: creating eco-efficient products and processes*. McGraw-Hill, 1996. – ISBN 978-0-070-20972-5
- [FM18] FÖRTSCH, Gabi ; MEINHOLZ, Heinz: *Handbuch betriebliches Umweltmanagement*. Springer Vieweg, 2018. – ISBN 978-3-658-19151-1
- [Foi18] FOIT, Dörte: *Industrie 4.0 und Nachhaltigkeit - Digitalisierung als Teil der „Großen Transformation“?*, Universität Paderborn, Diskussionspapier, 2018
- [Fra15] FRAUNHOFER: *Geschäftsmodell-Innovation durch Industrie 4.0 - Chancen und Risiken für den Maschinen- und Anlagenbau*, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Studie, 2015
- [Fra19] FRAUNHOFER: Projekt IRVE - Neues Forschungsprojekt für innovative Recyclingverfahren von Elektroschrott gestartet. (2019). <https://www.iwks.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/pressemeldungen-2019/start-projekt-irve.html>, Abruf: 02.05.2022. – Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS
- [GWDC21] GOUMAGIAS, Nikolaos ; WHALLEY, J. ; DILAVER, O. ; CUNNINGHAM, J.: Making sense of the internet of things: a critical review of internet of things definitions between 2005 and 2019. In: *Internet Research* (2021), Nr. 5, S. 1583–1610

- [HBC01] HATCH, Nile W. ; BALDWIN, C.Y. ; CLARK, K.B.: Design Rules, Volume 1: The Power of Modularity. In: *The Academy of Management Review* (2001), Nr. 1, S. 130
- [HF17] HABER, Nicolas ; FARGNOLI, Mario: Designing Product-Service Systems: A Review Towards a Unified Approach. In: *International Conference on Industrial Engineering* (2017). – Tagungsband
- [Hip86] HIPPEL, Eric von: Lead Users: A Source of Novel Product Concepts. In: *Management Science* (1986), Nr. 7, S. 791–805
- [HJ13] HINRICHSSEN, Sven ; JASPERNEITE, Jürgen: Industrie 4.0 – Begriff, Stand der Umsetzung und kritische Würdigung. In: *Betriebspraxis & Arbeitsforschung* (2013)
- [HKK08] HANAFI, Jessica ; KARA, S. ; KAEBERNICK, H.: Reverse logistics strategies for end-of-life products. In: *The International Journal of Logistics Management* (2008), Nr. 3, S. 367–388
- [HN18] HAUFF, Michael von ; NGUYEN, Thuan: *Fortschritte in der Nachhaltigkeitsforschung*. Nomos, 2018. – ISBN 978-3-8487-4501-2
- [Hof13] HOFBAUER, Günter: *Customer Integration - Prinzipien der Kundenintegration zur Entwicklung neuer Produkte*, Technische Hochschule Ingolstadt, Arbeitspapier, 2013
- [Hof17] HOFER, Elisabeth: Klimawandel und Elektroschrott – die andere Seite der Digitalisierung. (2017). <https://brutkasten.com/klimawandel-und-elektroschrott-die-andere-seite-der-digitalisierung/>, Abruf: 02.05.2022
- [Hoo15] HOOSHMAND, Yousef: *Transparenzerhöhung bei der Entwicklung von individualisierten Produkten in der Einzelfertigung*, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2015
- [Hua96] HUANG, G.Q.: *Design for X - Concurrent engineering imperatives*. Springer Netherlands, 1996. – ISBN 978-94-011-3985-4
- [Hub84] HUBKA, Vladimir: *Theorie technischer Systeme - Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre*. Springer Vieweg, 1984. – ISBN 978-3-540-12953-0

- [IA21] IA: Digitaler Zwilling vs. Digitaler Schatten. (2021). <https://www.industry-analytics.de/digitaler-zwilling-vs-digitaler-schatten/>, Abruf: 10.04.2022. – Industry Analytics
- [IBU20] IBU: Institut Bauen und Umwelt e.V.: Ökobilanzierung. (2020). <https://ibu-epd.com/oekobilanzierung/>, Abruf: 30.04.2022
- [Int22] INTROVIS: *Cradle to Cradle*. <https://introvis.com/cradle-to-cradle/>. Version: 2022, Abruf: 01.04.2022
- [iPo16] iPOINT: Erfolgsfaktor für Ökobilanzen (Life Cycle Assessment, LCA): Daten, Daten und nochmals Daten. (2016). <https://www.ipoint-systems.com/blog/erfolgsfaktoren-fur-okobilanzen-life-cycle-assessment-lca-daten-daten-und-nochmals-daten/>, Abruf: 12.05.2022. – iPoint-systems GmbH
- [iPo22] *Lebenszyklusanalyse nach ISO 14040*. <https://www.ifu.com/de/oekobilanz/>. Version: 2022, Abruf: 28.03.2022
- [Kem21] KEMETER, Dominik: Entsorgung und Recycling von Elektroschrott: Aktuelle Situation und Trends. In: *Seminar zu aktuellen Themen der Elektro-und Informationstechnik* (2021). – Seminarbeitrag
- [KG18] KRAUSE, Dieter ; GEBHARDT, Nicolas: *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien - Hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln*. Springer Vieweg, 2018. – ISBN 978-3-662-53039-9
- [KM03] KUNZ, Werner H. ; MANGOLD, Marc: Segmentierungsmodell für die Kundenintegration in Dienstleistungsinnovationsprozesse - eine Anreiz-Beitrags-theoretische Analyse. In: *Dienstleistungsinnovationen* (2003), Nr. 1, S. 327-355
- [KNFB18] KORHONEN, Jouni ; NUUR, C. ; FELDMANN, A. ; BIRKIE, S.E.: Circular economy as an essentially contested concept. In: *Journal of Cleaner Production* (2018), Nr. 175, S. 544-552
- [Kon07] KONO, Toyohiro: *Strategic new product development for the global economy*. Palgrave Macmillan, 2007. – ISBN 0230001998
- [Kor10] KOREN, Yoram: *The global manufacturing revolution - Product-process-business integration and reconfigurable systems*. Wiley-Blackwell, 2010. – ISBN 978-0-470-58377-7

- [Kre18] KREUTZER, Ralf T.: *Toolbox Für Marketing und Management*. Gabler, 2018. – ISBN 978-3-658-21881-2
- [KS18] KOUHIZADEH, Mahtab ; SARKIS, Joseph: Blockchain Practices, Potentials, and Perspectives in Greening Supply Chains. In: *Sustainability* (2018), Nr. 10, S. 3652
- [Lee08] LEE, Edward A.: Cyber Physical Systems: Design Challenges. In: *IEEE Computer Society 2008 – 11th IEEE International Symposium* (2008), S. 363–369
- [Ler19] LEREGGER, Florian: Digitalisierung und Klimawandel im Kontext der Sustainable Development Goals. In: *CSR und Klimawandel*. Springer, 2019. – ISBN 978-3-662-59748-4, S. 149–161
- [LI13] LANGE, Mark W. ; IMSDAHL, Andrea: Modular Function Deployment – Using Module Drivers to Impart Strategies to a Product Architecture. In: *Advances in Product Family and Product Platform Design*. Springer, 2013. – ISBN 978-1-4614-7936-9, S. 91–118
- [Lit16] LITZEL, Nico: Was ist Business Intelligence? (2016). <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-business-intelligence-bi-a-563185/>, Abruf: 08.04.2022
- [LR06] LINDEMANN, Udo ; REICHWALD, Ralf: *Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen, in Entwicklung und Produktion*. Springer Berlin, 2006. – ISBN 978-3-540-25506-2
- [Lü07] LÜTHJE, Christian: Methoden zur Sicherstellung von Kundenorientierung in den frühen Phasen des Innovationsprozesses. In: *Management der frühen Innovationsphasen*. Gabler Verlag, 2007, S. 39–60
- [Man12] MANDEL, Jörg: *Modell zur Gestaltung von Build-to-Order-Produktionsnetzwerken*. Fraunhofer Verlag, 2012. – ISBN 978-3-8396-0434-2
- [Man21] MANSTEIN, Christopher: Digitalisierung und natürliche Ressourcen. (2021). <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/ressourcenschonung-in-produktion-konsum/digitalisierung-natuerliche-ressourcen>, Abruf: 10.04.2022
- [MB90] MANDELBAUM, Marvin ; BUZACOTT, John: Flexibility and decision making. In: *European Journal of Operational Research* (1990), Nr. 44, S. 17–27

- [MCVL13] MARQUES, P. ; CUNHA, P.F. ; VALENTE, F. ; LEITAO, A.: A Methodology for Product-service Systems Development. In: *Procedia CIRP* (2013), Nr. 7, S. 371–376
- [Met08] METZLER, Anja: *Gerechtigkeit und Globalisierung: zur Notwendigkeit einer gerechten und nachhaltigen globalen Energie-und Ressourcenpolitik*, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Dissertation, 2008
- [MEWS20] MONNERON-ENAUD, Benjamin ; WICHE, O. ; SCHLÖMANN, M.: Biodismantling, a Novel Application of Bioleaching in Recycling of Electronic Wastes. In: *Recycling* 5 (2020), Nr. 3, S.22. <https://www.mdpi.com/2313-4321/5/3/22>. – ISSN 2313–4321
- [MK05] MEERKAMM, Harald ; KOCH, Michael: Design for X. In: *Design process improvement*. Springer London, 2005, S. 306–323
- [MNB⁺21] MAGRINI, C. ; NICOLAS, J. ; BERG, H. ; BELLINI, A. ; PAOLINI, E. ; VINCENTI, N. ; CAMPADELLO, L. ; BONOLI, A.: Using Internet of Things and Distributed Ledger Technology for Digital Circular Economy Enablement: The Case of Electronic Equipment. In: *Sustainability* (2021), Nr. 9, S. 4982
- [MP21] McALOONE, Tim C. ; PIGOSSO, Daniela C.: Ökodesign. In: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Springer Vieweg, 2021, S. 975–1021
- [MRT15] MADAKAM, S. ; RAMASWAMY, R. ; TRIPATHI, S.: Internet of Things (IoT): A Literature Review. In: *Journal of Computer and Communications* (2015), Nr. 5, S. 164–173
- [MSH17] MURRAY, Alan ; SKENE, K. ; HAYNES, K.: The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. In: *Journal of Business Ethics* (2017), Nr. 3, S. 369–380
- [NC06] NES, Nicole van ; CRAMER, Jacqueline: Product lifetime optimization: a challenging strategy towards more sustainable consumption patterns. In: *Journal of Cleaner Production* 14 (2006), S. 1307–1318
- [NGO21] NGO: Das C2C Designkonzept. (2021). <https://c2c.ngo/>, Abruf: 12.05.2022. – Cradle to Cradle NGO
- [Obe19] OBERMAIER, Robert: *Handbuch Industrie 4.0 und digitale Transformation*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. – ISBN 978–3–658–24575–7

- [PGR17] PILGRIM, Hannah ; GRONEWEG, M. ; RECKORDT, M.: *Ressourcenfluch 4.0 - Die sozialen und ökologischen Auswirkungen von Industrie 4.0 auf den Rohstoffsektor*. 2017. – ISBN 978-3-9814344-9-1
- [Pie22] PIECK, Martin: So wenig von deinem Elektroschrott wird wirklich verwertet. (2022). <https://www.quarks.de/umwelt/muell/so-wenig-von-deinem-elektroschrott-wird-wirklich-verwertet/>, Abruf: 27.04.2022
- [Pil03] PILLER, Frank T.: *Mass Customization und Kundenintegration - Neue Wege zum innovativen Produkt*. Symposion-Verlag, 2003. – ISBN 978-3-936-60805-2
- [Pis21] PISTER, Marco: Threats to Established Companies from Increasing Digitalization. In: *European Journal of Marketing and Economics* (2021), Nr. 2, S. 14
- [PMR15] PIGOSSO, Daniela C. ; McALOONE, T.C. ; ROZENFELD, H.: Characterization of the State-of-the-art and Identification of Main Trends for Ecodesign Tools and Methods: Classifying Three Decades of Research and Implementation. In: *Indian Institute of Science* (2015), Nr. 94, S. 405-427
- [PSF09] PODBREGAR, Nadja ; SCHWANKE, K. ; FRATER, H.: *Wetter, Klima, Klimawandel: Wissen für eine Welt im Umbruch*. Springer Verlag, 2009. – ISBN 978-3-540-79291-8
- [Pug91] PUGH, Stuart: *Total design - Integrated methods for successful product engineering*. Addison-Wesley, 1991. – ISBN 0201416395
- [Pul04] PULM, Udo: *Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung*, Technische Universität München, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Dissertation, 2004
- [Rai12] RAIDL, Andreas: *Variantenmanagement in der Fließfertigung*, Montanuniversität Leoben - Lehrstuhl Industrielogistik, Masterarbeit, 2012
- [Rie18] RIEDEL, Donata: Der Rohstoffhunger der Digitalwirtschaft wird zum Problem. (2018). <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/rohstoffkongress-der-rohstoffhunger-der-digitalwirtschaft-wird-zum-problem/22764402.html>, Abruf: 10.04.2022

- [Rus11] RUSSOM, Philip: Big Data Analytics. (2011). – Report
- [San12] SANTARIUS, Tilman: *Der Rebound-Effekt: Über die unerwünschten Folgen der erwünschten Energieeffizienz*, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Report, 2012
- [Sau20] SAUTER, Stephan: *Industrie 4.0 Digitale Transformation*, Duale Hochschule Baden Württemberg Ravensburg, Vorlesungsskript, 2020
- [SB08] SCHICKER, Günter ; BODENDORF, Freimut: *Koordination und Controlling in Praxisnetzen mithilfe einer prozessbasierten E-Service-Logistik*. Gabler Verlag, 2008. – ISBN 978-3-834-90927-5
- [Sch03] SCHACKMANN, Jürgen: *Ökonomisch vorteilhafte Individualisierung und Personalisierung - Eine Analyse unter besonderer Berücksichtigung der Informationstechnologie und des Electronic Commerce*. Verlag Dr. Kovac, 2003. – ISBN 978-3-830-00917-7
- [Sch20] SCHULZ, Christian: Lithium-Abbau: Das solltest du darüber wissen. (2020). <https://utopia.de/ratgeber/lithium-abbau-das-solltest-du-darueber-wissen/>, Abruf: 02.05.2022
- [SEF⁺16] SONEGO, M. ; ECHEVESTE, M. ; FOGLIATTO, F.S. ; TONETTO, M. ; CATEN, C.S. ten: Modular Function Deployment Adapted. In: *International Design Conference 2016* (2016). – Tagungsband
- [Sei21] SEIDEL, Andreas: Wenig beachtete Nebenwirkungen der Digitalisierung. (2021). <https://www.saurugg.net/2019/blog/stromversorgung/digitalisierung-als-informatisierte-energie>, Abruf: 26.04.2022
- [Sem22] SEMMELMANN, Killian: Was ist Advanced Analytics? Definition und Beispiele. (2022). <https://datadrivencompany.de/was-ist-advanced-analytics-definition-und-beispiele/>, Abruf: 08.04.2022
- [SFR18] SÜHLMANN-FAUL, Felix ; RAMMLER, Stephan: *Digitalisierung und Nachhaltigkeit. Nachhaltigkeitsdefizite auf ökologischer, ökonomischer, politischer und sozialer Ebene. Handlungsempfehlungen und Wege einer erhöhten Nachhaltigkeit durch Werkzeuge der Digitalisierung*, Robert-Bosch-Stiftung und WWF Deutschland e.V., Studie, 2018

- [Sma22] SMARTEK, Technology: Dissecting the Industrial IoT. (2022). <https://www.smartrek.io/dissecting-the-industrial-iot/>, Abruf: 12.05.2022
- [SMFM15] SCHMIDT, D.M. ; MALASCHEWSKI, O. ; FLUHR, D. ; MÖRTL, M.: Customer-oriented Framework for Product-service Systems. In: *Procedia CIRP* (2015), Nr. 30, S. 287–292
- [SPB⁺18] SCHOLZ, Ulrich ; PASTOORS, S. ; BECKER, J.H. ; HOFMANN, D. ; DUN, R. van: *Praxishandbuch nachhaltige Produktentwicklung - Ein Leitfaden mit Tipps zur Entwicklung und Vermarktung nachhaltiger Produkte*. Springer Gabler, 2018. – ISBN 978-3-662-57319-8
- [SR18] SCHUH, Günther ; RIESENER, Michael: *Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools*. Hanser, 2018. – ISBN 978-3-446-45334-0
- [SRK18] SCHALLMO, Daniel ; REINHART, J. ; KUNTZ, E.: *Digitale Transformation von Geschäftsmodellen erfolgreich gestalten*. Springer Gabler, 2018. – ISBN 978-3-658-20214-9
- [SSS⁺12] SCHROECK, Michael ; SHOCKLEY, R. ; SMART, J. ; ROMERO-MORALES, D. ; TUFANO, P.: *Analytics: The real-world use of big data*. (2012). – Report
- [Sta21] STATISTA: *CO2-Emissionen weltweit in den Jahren 1960 bis 2020*. Version: 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37187/umfrage/der-weltweite-co2-ausstoss-seit-1751/>, Abruf: 30.04.2022
- [Sto20] STOLLE, Henrik: *Kreislaufwirtschaft oder Cradle-to-Cradle?* (2020). <https://blacksatino.eu/de/blog/kreislaufwirtschaft-oder-cradle-to-cradle/>, Abruf: 01.04.2022
- [TD22] TU-DELFT: *Designing Electronics for Recycling in a Circular Economy*. (2022). <https://online-learning.tudelft.nl/courses/designing-electronics-for-recycling-in-a-circular-economy/>, Abruf: 29.04.2022
- [The14] *The All-Weather Bicycle Accessory: Design for Sustainability*. <https://sites.google.com/site/allweatherbicycle/home->

[1/embodiment-design/5-design-for-sustainability](#).

Version: 2014, Abruf: 02.05.2022

- [Thi19] THIEBAT, Francesca: *Life Cycle Design - An Experimental Tool for Designers*. Springer International Publishing, 2019. – ISBN 978-3-030-11496-1
- [TSW09] TELENKO, Cassandra ; SEEPERSAD, C.C. ; WEBBER, M.E.: A Compilation of Design for Environment Principles and Guidelines. In: *American Society of Mechanical Engineers 2009 – 13th Design for Manufacturing (2009)*, S. 289–301
- [TT18] TSCHIGGERL, Karin ; TOPIC, Milan: Potenziale durch Industrie 4.0 zur Steigerung der Ressourceneffizienz. In: *WINGbusiness 1 (2018)*, S. 25–28. – ISSN 0256-7830
- [TTS09] TONELLI, Flavio ; TATICCHI, P. ; SUE, E.: A Framework for Assessment and Implementation of Product-Service Systems Strategies: Learning From an Action Research in the Health-Care Sector. In: *WSEAS Transactions on Business and Economics (2009)*, Nr. 6, S. 303–319
- [Tuk04] TUKKER, Arnold: Eight types of product-service system: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet. In: *Business Strategy and the Environment (2004)*, Nr. 4, S. 246–260
- [Tun16] TUNA, Bercan: *Nachhaltigkeitsgerechte Produktentwicklung anhand eines Praxisbeispiels*, HAW Hamburg, Masterthesis, 2016
- [VDI16] VDI: *VDI 4800 Blatt 1: Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien*. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, 2016
- [VDI17] VDI: *Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes*. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, 2017
- [VDI22] VDI: *Steigerung der Ressourceneffizienz im Unternehmen - Verlängerung der technischen Produktlebensdauer*. https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/strategien-massnahmen/VDI-ZRE_Verlaengerung_technische_Produktlebensdauer.pdf. Version: 2022, Abruf: 03.04.2022. – VDI - Zentrum Ressourceneffizienz
- [Vez18] VEZZOLI, Carlo A.: *Design for Environmental Sustainability - Life Cycle Design of Products*. Springer London, 2018. – ISBN 978-1-4471-7363-2

- [VS06] VEZZOLI, Carlo ; SCIAMA, Dalia: Life Cycle Design: from general methods to product type specific guidelines and checklists: a method adopted to develop a set of guidelines/checklist handbook for the eco-efficient design of NECTA vending machines. In: *Journal of Cleaner Production* (2006), Nr. 16, S. 1319–1325
- [Wag17] WAGNER, Marcus: *Entrepreneurship, Innovation and Sustainability*. Taylor and Francis, 2017. – ISBN 978–1–351–27776–1
- [Wal17] WALCHER, Dominik: *Kreislaufwirtschaft in Design und Produktmanagement - Co-Creation im Zentrum der zirkulären Wertschöpfung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. – ISBN 978–3–658–18511–4
- [WB17] WILTS, Henning ; BERG, Holger: *Digitale Kreislaufwirtschaft: Die Digitale Transformation als Wegbereiter ressourcenschonender Stoffkreisläufe*, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Report, 2017
- [WBMS17] WINKLER, Herwig ; BERGER, U. ; MIEKE, C. ; SCHENK, M.: *Flexibilisierung der Fabrik im Kontext von Industrie 4.0*. Logos Verlag Berlin, 2017. – ISBN 978–3–8325–4475–1
- [Wel19] WELLING, Kira: Lithium Vorkommen: Diese Länder haben die größten Reserven. (2019). https://efahrer.chip.de/news/lithium-vorkommen-diese-laender-haben-die-groessten-reserven-1_101148, Abruf: 13.04.2022
- [Wfd18] WFD: Lithiumabbau in Südamerika - Aus dem Salzsee ins Handy. (2018). <https://wfd.de/thema/lithiumabbau>, Abruf: 21.04.2022. – Weltfriedensdienst e.V
- [Win21] WINTER, Stefan: Die Ideen für eine grüne Zukunft sind da – aber reichen die Rohstoffe? (2021). <https://www.rnd.de/wirtschaft/digitalisierung-trotz-rohstoffmangel-wie-passt-das-zusammen-VQJN4YKIKFB5RFG6J7XHADO5IQ.html>, Abruf: 11.05.2022
- [Wit20] WITTPAHL, Volker: *Klima - Politik & Green Deal | Technologie & Digitalisierung | Gesellschaft & Wirtschaft*. Springer Berlin Heidelberg, 2020. – ISBN 978–3–662–62194–3

- [WK18] WAGNER, Harry ; KABEL, Stefanie: *Mobilität 4.0 – neue Geschäftsmodelle für Produkt- und Dienstleistungsinnovationen*. Springer Gabler, 2018. – ISBN 978-3-658-21106-6
- [WMO20] WMO: New climate predictions assess global temperatures in coming five years. (2020). <https://public.wmo.int/en/media/press-release/new-climate-predictions-assess-global-temperatures-coming-five-years>, Abruf: 30.04.2022
- [WZBT00] WESTKÄMPER, E. ; ZAHN, E. ; BALVE, P. ; TILEBEIN, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. Ein Bezugsrahmen für die Unternehmensentwicklung im turbulenten Umfeld. In: *Wt Werkstattstechnik Online* (2000), Nr. 90, S. 22–26
- [Wü21] WÜPPING, D.: Modularisierung und Standardisierung in der hoch flexiblen Form. (2021). <https://wuepping.com/modularisierung/>, Abruf: 17.04.2022. – Dr. Wüpping Consulting GmbH
- [Zel82] ZELENOVIC, Dragutin M.: Flexibility—a condition for effective production systems. In: *International Journal of Production Research* (1982), Nr. 3, S. 319–337

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Hamburg, 19. Mai 2022

Marius Peters