

**Positive Impact Product Engineering**  
-  
**Produktentstehungsmodell für Produktsysteme  
mit netto-positiver Nachhaltigkeitswirkung**

Dissertation  
zur Erlangung des Grades  
des Doktors der Ingenieurwissenschaften  
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
der Universität des Saarlandes

von  
**Simon Mörsdorf, M.Sc.**

Saarbrücken  
2025

<b>Tag des Kolloquiums:</b>	14.05.2025
<b>Dekan:</b>	Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
<b>1. Berichterstatter:</b>	Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber
<b>2. Berichterstatter:</b>	Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann
<b>3. Berichterstatter:</b>	Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
<b>Vorsitz:</b>	Prof. Dr.-Ing. Matthias Nienhaus
<b>Akadem. Mitarbeiterin:</b>	Dr.-Ing. Sophie Katharina Nalbach

## **Kurzfassung**

Das Überschreiten planetarer Grenzen und die zunehmende soziale Ungleichheit erfordern eine nachhaltige Entwicklung und eine Transformation der Entstehung und Nutzung von Produkten. Diese Dissertation präsentiert folglich das Positive Impact Product Engineering (PIPE)-Modell, ein ganzheitliches Modell zur nachhaltigen Produktentstehung, das die Vision von Produktsystemen mit netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen verfolgt. Ziel ist es, positive Effekte in den Bereichen Ökologie, Soziales, Ökonomie und Kreislaufwirtschaft gezielt zu verstärken, negative Auswirkungen zu minimieren und durch überkompensierende Maßnahmen in eine netto-positive Bilanz zu überführen.

Die Arbeit identifiziert Defizite im Forschungsstand der „Nachhaltigen Produktentstehung“ in Analyse, Synthese und Integration positiver Wirkungen. Diese Lücken werden durch ein Entstehungsmodell für technische Produktsysteme geschlossen. Im vierphasigen Produktentstehungsprozess werden durch iterative Kombination von Analyse- und Synthesemethoden die Nachhaltigkeitswirkungen optimiert, um die Vision des netto-positiven Produktsystems systematisch zu realisieren. Zwei Fallstudien – die Entwicklung eines Kinderlaufrads und eines e-Bikes – validieren das Modell. Die Ergebnisse unterstreichen dessen Potenzial bei der Entstehung nachhaltiger Produkte, zeigen jedoch auch derzeitige Limitationen bei komplexen Systemen auf. PIPE leistet damit einen wertvollen Beitrag zur notwendigen Transformation der Produktentstehung.



## **Abstract**

The transgression of planetary boundaries and growing social inequality necessitate sustainable development and a transformation in how products are developed and used. In response, this dissertation introduces Positive Impact Product Engineering (PIPE), a holistic model for sustainable product development (SPD), aiming for product systems with net-positive impacts. The model seeks to enhance positive effects in ecological, social, and economic dimensions, as well as in the context of a circular economy, while minimizing negative impacts and compensating for unavoidable ones through additional measures that generate positive impacts, ensuring a net-positive outcome.

This work identifies gaps in the research on SPD in analysis, synthesis, and integration of positive impacts. These gaps are addressed by an engineering model for technical product systems. The four-phase development process combines analysis and synthesis methods iteratively, optimizing sustainability impacts and systematically realizing the vision of a net-positive product system. Validation is provided through two case studies—the development of a children's balance bike and an e-bike. The findings highlight the model's potential for SPD, while also emphasizing limitations in dealing with complex systems. Overall, PIPE makes a valuable contribution to the necessary transformation of product development processes, advancing them towards sustainable development.



## Danksagung und Vorwort

Diese Dissertation ist das Resultat engagierter Arbeit, tiefgehender Überlegungen und intensiver Diskussionen während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentstehung an der Universität des Saarlandes. Da diese Arbeit ohne die Unterstützung zahlreicher Menschen nicht möglich gewesen wäre, möchte ich an dieser Stelle meinen Dank aussprechen.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber, der mir die einzigartige Möglichkeit und wissenschaftliche Freiheit gegeben hat, ein solch visionäres Thema zu bearbeiten, und mich mit seiner konstruktiven Kritik fortwährend bei der Ausarbeitung dieser Vision unterstützt hat. Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann für seine inspirierende Vorarbeit im Bereich der positiven Ansätze, für sein Interesse am Thema dieser Arbeit und seine Bereitschaft, die Zweitbegutachtung zu übernehmen. Zudem danke ich Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre für sein Engagement als Drittgutachter sowie für die bereitwillige und aufgeschlossene Begleitung des Promotionsverfahrens.

Ein herzliches Dankeschön geht an all meine Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für Produktentstehung für die kontinuierliche Unterstützung, die angenehme Zusammenarbeit und das freundschaftliche Arbeitsumfeld, das über die Jahre hinweg entstanden ist. Zudem danke ich allen Studierenden, die auf vielfältige Weise tatkräftig zur Entwicklung und Ausarbeitung des PIPE-Ansatzes beigetragen haben.

Insbesondere möchte ich mich bei meiner ganzen Familie und all meinen wunderbaren Freunden bedanken. Die enge Verbundenheit zu euch und eure unermüdliche Bereitschaft, mir immer wieder Auszeiten zu schenken, haben mir stets geholfen, neue Kraft zu schöpfen. Mein größter Dank geht an meine Frau und meine Tochter, die mich mit unermesslichem Verständnis und großartigem Rückhalt bei der Fertigstellung dieser Dissertation begleitet und motiviert haben, auch wenn sie dabei oft auf mich verzichten mussten. Ohne euch beide wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen und hätte ihren wahren Wert nicht entfalten können.

Die Widmung dieser Dissertation gilt meinem Vater Christoph, meinem Onkel Alex und meinem Opa Hermann. Ihr habt mir euer Leben lang die Begeisterung für Technik und Ingenieurwissenschaften weitergegeben und mich dadurch stets inspiriert und ermutigt, meinen eigenen Weg zu gehen. Ich danke euch von Herzen für alles. Möge diese Arbeit eine Inspiration für all jene sein, die unsere Welt positiver, nachhaltiger und somit lebenswerter gestalten möchten.



# I Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>V</b>
<b>Danksagung und Vorwort</b> .....	<b>VII</b>
<b>I Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>II Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>III Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XVII</b>
<b>IV Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XIX</b>
<b>1 Einleitung und Motivation</b> .....	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung .....	1
1.2 Fokus und Ziel der Arbeit .....	4
1.2.1 Ziele und inhaltliche Abgrenzung .....	4
1.2.2 Definition der Forschungsfragen .....	6
1.3 Vorgehensweise .....	7
1.4 Struktur und Aufbau der Arbeit .....	9
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>13</b>
2.1 Grundlagen im Themengebiet Nachhaltigkeit .....	13
2.1.1 Nachhaltigkeit und nachhaltige Entwicklung .....	13
2.1.2 Ökologische Dimension .....	15
2.1.3 Soziale Dimension .....	17
2.1.4 Ökonomische Dimension .....	18
2.1.5 Grundlagen der Kreislaufwirtschaft .....	19
2.2 Grundlagen im Themengebiet Produktentstehung .....	20
2.2.1 Problemlösungsprozess .....	22
2.2.2 Produktentstehungsmodelle .....	23
2.3 Grundlagen im Themengebiet Nachhaltige Produktentstehung .....	26
2.3.1 Nachhaltigkeitsstrategien .....	28
2.3.2 Absolute Nachhaltigkeit .....	29
<b>3 Stand der Forschung</b> .....	<b>33</b>
3.1 Historische Entwicklung der Nachhaltigen Produktentstehung .....	33
3.1.1 Historische Entwicklung von 1960 bis 1989 .....	38
3.1.2 Historische Entwicklung von 1990 bis 1999 .....	41
3.1.3 Historische Entwicklung von 2000 bis 2009 .....	44
3.1.4 Historische Entwicklung von 2010 bis heute .....	48

---

3.1.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	51
3.2	Analysemethoden der Nachhaltigen Produktentstehung.....	52
3.2.1	Einführung in Analysemethoden.....	52
3.2.2	Analyse ökologischer Aspekte.....	53
3.2.3	Analyse sozialer Aspekte.....	63
3.2.4	Analyse ökonomischer Aspekte.....	66
3.2.5	Analyse der Kreislauffähigkeit.....	69
3.2.6	Ganzheitliche Analysemethoden auf Produktebene.....	73
3.2.7	Analysemethoden auf Organisationsebene.....	77
3.3	Synthesemethoden der Nachhaltigen Produktentstehung.....	79
3.3.1	Einführung in Synthesemethoden.....	79
3.3.2	Synthesemethoden in der ökologischen Dimension.....	80
3.3.3	Synthesemethoden in der sozialen Dimension.....	85
3.3.4	Synthesemethoden in der ökonomischen Dimension.....	89
3.3.5	Synthesemethoden zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit.....	96
3.3.6	Ganzheitliche Synthesemethoden.....	106
3.4	Positive Nachhaltigkeitswirkungen.....	116
3.4.1	Einführung und Klassifizierung.....	116
3.4.2	Kompensationen & positive Auswirkungen in der ökologischen Dimension...	119
3.4.3	Kompensationen & positive Auswirkungen in der sozialen Dimension.....	130
3.4.4	Kompensationen & positive Auswirkungen in der ökonomischen Dimension	132
3.4.5	Kompensationen & positive Auswirkungen in der Kreislaufwirtschaft.....	133
3.4.6	Ganzheitliche Ansätze.....	134
3.4.7	Kritische Einordnung von Kompensationen.....	140
<b>4</b>	<b>Defizite und Handlungsbedarf.....</b>	<b>143</b>
4.1	Bewertung des Stands der Forschung.....	143
4.1.1	Defizite der Analysemethoden.....	144
4.1.2	Defizite der Synthesemethoden.....	147
4.1.3	Defizite im Bereich der positiven Nachhaltigkeitswirkungen.....	149
4.2	Forschungsfragen.....	152
4.3	Anforderungen an das Produktentstehungsmodell.....	154
<b>5</b>	<b>PIPE-Modell.....</b>	<b>159</b>
5.1	Ziele, Einordnung und Herleitung des Modells.....	159
5.2	Aufbau und Überblick des Produktentstehungsmodells.....	162
5.3	Positive Impact Product System.....	163
5.3.1	Aufbau und Bestandteile des PIPS.....	164
5.3.2	Inhärente positive Nachhaltigkeitswirkungen des PIPS.....	168
5.4	Positive Impact Optimization Loop.....	169

5.4.1	Allgemeine Vorgehensweise im PIOL .....	169
5.4.2	Wirkungsbeurteilung ökologischer Aspekte .....	173
5.4.3	Wirkungsbeurteilung sozialer Aspekte .....	177
5.4.4	Wirkungsbeurteilung ökonomischer Aspekte .....	181
5.4.5	Wirkungsbeurteilung von Aspekten der Kreislauffähigkeit aus Systemsicht ...	182
5.4.6	Methodensammlung und Methodenauswahl .....	186
5.5	Positive Impact Product Engineering Produktentstehungsprozess .....	189
5.5.1	Allgemeiner Aufbau .....	189
5.5.2	Phase 1: Planen und Klären der Aufgabe .....	191
5.5.3	Phase 2: Konzipieren .....	194
5.5.4	Phase 3: Entwerfen .....	196
5.5.5	Phase 4: Ausarbeiten .....	198
<b>6</b>	<b>Validierung des PIPE-Modells durch Fallbeispiele .....</b>	<b>201</b>
6.1	Einführung und Ziele .....	201
6.2	Entwicklung eines PI-Kinderlaufrades .....	202
6.2.1	Phase 1: PI-Kinderlaufrad .....	202
6.2.2	Phase 2: PI-Kinderlaufrad .....	205
6.2.3	Phase 3: PI-Kinderlaufrad .....	211
6.2.4	Phase 4: PI-Kinderlaufrad .....	220
6.2.5	Fazit der Fallstudie PI-Kinderlaufrad .....	233
6.3	Entwicklung eines PI-e-Bike .....	234
6.3.1	Phase 1: PI-e-Bike .....	234
6.3.2	Fazit der Fallstudie PI-e-Bike .....	237
<b>7</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>239</b>
7.1	Überprüfung der Anforderungen .....	239
7.1.1	Anforderungserfüllung des PIPE-PEP .....	239
7.1.2	Anforderungserfüllung des PIPS .....	241
7.2	Übergreifende Diskussion und Schlussfolgerungen .....	243
7.3	Beantwortung der Forschungsfragen .....	246
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>251</b>
8.1	Zusammenfassung der Arbeit .....	251
8.2	Ausblick .....	253
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>259</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>299</b>
A.1	PI-Kinderlaufrad – Phase 3 – LCA .....	299
A.2	PI-Kinderlaufrad – Phase 4 – TLBMC .....	300

---

A.3	PI-Kinderlaufrad – Phase 4 – LCA .....	301
-----	--	-----

## II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Planetare Grenzen und soziales Fundament im Doughnut-Modell nach [Rawo18] .....	2
Abbildung 1-2: 17 Ziele für eine nachhaltige Entwicklung [Ziel15] .....	2
Abbildung 1-3: Design Research Methodology nach [BlCh09] im Kontext dieser Arbeit .....	7
Abbildung 1-4: Struktur der Arbeit .....	11
Abbildung 2-1: Verschiedene Darstellungen der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit nach [PuMR19] .....	14
Abbildung 2-2: Handlungsregeln für eine nachhaltige Entwicklung [Hauf21] in Anlehnung an [Daly90] .....	16
Abbildung 2-3: Grafische Darstellung der Kreislaufwirtschaft nach [Bund18] .....	19
Abbildung 2-4: Produktlebenszyklus, Produktentstehungsprozess und Produktentwicklung aus [NaLu16] .....	20
Abbildung 2-5: Grundbegriffe des Systemgedankens in Anlehnung an [HDFV19] .....	21
Abbildung 2-6: Regelungszyklus zwischen Zielen, Aktivitäten und Ergebnissen [VDI19a] .....	23
Abbildung 2-7: Allgemeines Vorgehensmodell der Produktentwicklung aus [BeGe21] .....	25
Abbildung 2-8: Das Produktsystem als Ergebnis des Produktentstehungsprozess .....	27
Abbildung 2-9: Öko-Effektivität und Öko-Effizienz in Anlehnung an [Epea24] .....	29
Abbildung 2-10: Verteilung des Handlungsspielraums der planetaren Grenzen im Konzept der absoluten Nachhaltigkeit (Eigene Darstellung nach [Geb122, HLAO21, Rawo18, SRRC15]) .....	30
Abbildung 3-1: Historische Entwicklung der Nachhaltigen Produktentstehung 1960-1989 .....	34
Abbildung 3-2: Historische Entwicklung der Nachhaltigen Produktentstehung 1990-1999 .....	35
Abbildung 3-3: Historische Entwicklung der Nachhaltigen Produktentstehung 2000-2009 .....	36
Abbildung 3-4: Historische Entwicklung der Nachhaltigen Produktentstehung 2010-2025 .....	37
Abbildung 3-5: Untersuchungsgebiet der Analysemethoden der Nachhaltigen Produktentstehung .....	53
Abbildung 3-6: Phasen einer Ökobilanz [DIN21a] .....	55
Abbildung 3-7: Konzept der Wirkungsindikatoren [DIN21c] .....	56
Abbildung 3-8: EcoDesign-Checkliste von ecoconcept [TiMo23, Tisc00] .....	61
Abbildung 3-9: MET-Matrix nach [BrVa97] (frei übersetzt) .....	61
Abbildung 3-10: Konzeptionelles Rahmenwerk für Life Cycle Costing nach [ReHu03] .....	67
Abbildung 3-11: Schematische Darstellung der Life Cycle Costs (erweitert nach [EKLM14, VDI05]) .....	68
Abbildung 3-12: MCI - Schematische Darstellung der Materialflüsse nach [GMPT19] .....	70
Abbildung 3-13: Rahmenwerk zur Messung und Bewertung der Kreislauffähigkeit nach [ISO24b] (frei übersetzt) .....	71
Abbildung 3-14: LCSA Rahmenwerk nach [Muth21] .....	73

Abbildung 3-15: Mögliche Wirkungspfade eines LCSA (in Anlehnung an [UnVL11]).....	75
Abbildung 3-16: C-LCSA Rahmenwerk mit Durchführungsschritten [LuTC23] (frei übersetzt) ...	76
Abbildung 3-17: Hauptthemen der European Sustainability Reporting Standards nach [Euro23a] .....	78
Abbildung 3-18: Anwendungsgebiet der Synthesemethoden zur Nachhaltigen Produktentstehung .....	79
Abbildung 3-19: Ansatz der integrierten Produktentstehung für BoP frei übersetzt nach [CaJH12] .....	87
Abbildung 3-20: Target Costing in Abgrenzung zur klassischen Kostenkalkulation in Anlehnung an [EKLM14] .....	90
Abbildung 3-21: Phasenmodell für die Entwicklung nachhaltiger Geschäftsmodelle nach [Ahre16] .....	92
Abbildung 3-22: Triple Layered Business Model Canvas nach [JoPa16] (frei übersetzt) .....	94
Abbildung 3-23: Produkt-Service-Systeme in Anlehnung an [Tukk04] .....	96
Abbildung 3-24: Umsetzungsrelevanter Prozess des zirkulären Produktdesigns nach Normentwurf [DIN23b] .....	100
Abbildung 3-25: Biologischer und technischer Kreislauf nach [Elle12] (frei übersetzt).....	102
Abbildung 3-26: Circular Business Model Tool nach Geissdoerfer et al. [GPPS20] (frei übersetzt) .....	103
Abbildung 3-27: Morphologischer Kasten der Geschäftsmodelloptionen für die Kreislaufwirtschaft von [LüGB19] (frei übersetzt) .....	105
Abbildung 3-28: Design for Sustainability - Schrittweises Vorgehen bei Redesign, Neuentwicklung und PSS nach [CrDR09] (frei übersetzt) .....	107
Abbildung 3-29: Entwicklungsstufen und Lebenszyklusphasen des ISEDP nach [GaLS12] .....	112
Abbildung 3-30: Positive und negative Auswirkungen des Produktsystem und durch Kompensationsmaßnahmen auf die Dimensionen der Nachhaltigkeit.....	117
Abbildung 3-31: Bilanz von Auswirkungen durch das Produktsystem und Kompensationsmaßnahmen .....	118
Abbildung 3-32: Vermeidungshierarchie und Kompensation negativer Auswirkungen in Anlehnung an [AiLB15, Geb122] .....	119
Abbildung 3-33: Wechselwirkungen positiver und negativer Auswirkungen am Beispiel von Treibhausgasen .....	120
Abbildung 3-34: Bilanz der Treibhausgase zu einem Nettoergebnis nach [ISO23].....	121
Abbildung 3-35: Sechs Schritte des „Gemeinsam umweltneutral handeln“-Standard [MBFH23b, MBFH23a].....	130
Abbildung 3-36: Erweiterung der Life Cycle Costs (nach [EKLM14, VDI05]) um die Kompensationskosten.....	133
Abbildung 3-37: "Pure Net Positive Change" Framework [Norr17] (frei übersetzt).....	135
Abbildung 3-38: Handprint approach [KSBE19] (frei übersetzt) .....	138

---

Abbildung 3-39: Grundlegende Systemeigenschaften der Positivfabrik [Geb122] .....	139
Abbildung 4-1: Produktentstehungsmodell bestehend aus Produktentstehungsprozess und Produktsystem .....	154
Abbildung 5-1: Differenzierung zwischen Forecasting und Backcasting .....	160
Abbildung 5-2: Vorgehensweise bei der Herleitung des PIPE-Modells.....	161
Abbildung 5-3: Überblick über das PIPE-Produktentstehungsmodell.....	163
Abbildung 5-4: Positive Impact Product System (PIPS) .....	164
Abbildung 5-5: Positive Impact Optimization Loop .....	169
Abbildung 5-6: Wirkungsbeurteilung und Vermeidungshierarchie im PIOL .....	170
Abbildung 5-7: Systemsicht und Wirkungsbeurteilung der Kreislaufaspekte im PIOL .....	185
Abbildung 5-8: Überblick über den PIPE-Produktentstehungsprozess .....	189
Abbildung 5-9: Allgemeiner Aufbau der Hauptphasen des PIPE-PEP .....	191
Abbildung 5-10: PIPE-PEP Phase 1 - Planen und Klären der Aufgabe .....	193
Abbildung 5-11: PIPE-PEP Phase 2 -Konzipieren .....	195
Abbildung 5-12: PIPE-PEP Phase 3 - Entwerfen.....	197
Abbildung 5-13: PIPE-PEP Phase 4 - Ausarbeiten.....	199
Abbildung 6-1: Skizze des PIPS-Profiles eines PI-Kinderlaufrad .....	204
Abbildung 6-2: Konzeptionelles Geschäftsmodell mit Werterhaltungsoptionen und Stakeholdern .....	206
Abbildung 6-3: Konzept A und B für das PI-Kinderlaufrad nach [Andr22] .....	208
Abbildung 6-4: Vergleich der Materialklassen für mögliche Strukturwerkstoffe .....	209
Abbildung 6-5: CAD-Entwurf und Explosionszeichnung des PI-Kinderlaufrad nach [Andr22]...	212
Abbildung 6-6: Vorläufiges Produktsystem in Phase 3 des PIPE-PEP.....	215
Abbildung 6-7: Kostenverteilung und Gewinnspanne für den vorläufigen Entwurf des Kinderlaufrades .....	218
Abbildung 6-8: Finaler CAD-Entwurf und Explosionszeichnung des PI-Kinderlaufrades .....	221
Abbildung 6-9: Vermeidungspotenzial roter Wirkungen durch die Vermeidung der drei größten Prozessbeiträge .....	224
Abbildung 6-10: Kostenverteilung und Gewinnspanne für den vorläufigen und finalen Entwurf .....	226
Abbildung 6-11: Kompensationsbilanz der kompensierbaren negativen Wirkungen für den Lebenszyklus eines PI-Kinderlaufrades im Szenario „Entsorgung“ .....	231
Abbildung 6-12: Finales PIPS des PI-Kinderlaufrad .....	232
Abbildung 6-13: Skizze des PIPS-Profiles eines PI-e-Bike .....	235
Abbildung 8-1: Vereinfachungsansätze und Möglichkeiten zur schrittweisen Umsetzung der Backcasting-Vision von PIPE.....	256



### III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Inhaltliche Abgrenzung dieser Arbeit .....	5
Tabelle 3-1: Unterscheidung von Analyse- und Synthesemethoden in der Nachhaltigen Produktentstehung .....	33
Tabelle 3-2: Kriterien zur Klassifizierung des Stands der Forschung .....	51
Tabelle 3-3: Begriffsbeispiele der Phase Wirkungsabschätzung nach [DIN21c] .....	57
Tabelle 3-4: S-LCA Stakeholder mit jeweiligen Wirkungskategorien nach [UBSL20] (frei übersetzt) .....	64
Tabelle 3-5: Die acht Designstrategien aus [ISO02] mit weiterführenden Beispielen .....	82
Tabelle 3-6: „Ten Golden Rules“ des Ecodesign frei übersetzt nach [LuLa06] .....	84
Tabelle 3-7: Die zehn Werterhaltungsoptionen nach Reike et al. [ReVW18] .....	98
Tabelle 3-8: Dimensionen eines zirkulären Geschäftsmodells nach [LüGB19] (frei übersetzt) ...	99
Tabelle 3-9: ISEDP - Integrated Sustainable Engineering Design Process [GaLS12] (frei übersetzt) .....	113
Tabelle 3-10: Beispiele für Kompensationsmaßnahmen in der Wirkungskategorie Klimaänderung .....	122
Tabelle 3-11: Mögliche Kompensationsmaßnahmen in ökologischen Wirkungskategorien .....	128
Tabelle 3-12: Mögliche Projekte zur Erzeugung positiver sozialer Auswirkungen (Social Handprints) .....	132
Tabelle 3-13: Beispiele positiver Effekte in einer Kreislaufwirtschaft .....	134
Tabelle 3-14: Übersichtsmatrix zur Zertifizierung nach der Living Product Challenge [Inte18] (frei übersetzt) .....	136
Tabelle 3-15: SWOT-Analyse zu Kompensationsmaßnahmen .....	142
Tabelle 4-1: Bewertung der Analysemethoden aus dem Stand der Forschung .....	145
Tabelle 4-2: Bewertung der Synthesemethoden aus dem Stand der Forschung .....	148
Tabelle 4-3: Bewertung der Ansätze für positive Wirkungen aus dem Stand der Forschung ...	150
Tabelle 4-4: Anforderungen an das zu entwickelnde Produktsystem .....	155
Tabelle 4-5: Anforderungen an den Produktentstehungsprozess .....	157
Tabelle 5-1: Möglichkeiten für inhärente positive Nachhaltigkeitswirkungen durch Produktsysteme .....	168
Tabelle 5-2: Anforderungen an Kompensationsmaßnahmen im PIPE-Modell .....	172
Tabelle 5-3: Kategorisierung der positiven Wirkungen für die ökologische Wirkungsbeurteilung im PIOL .....	174
Tabelle 5-4: Kategorisierung der negativen Wirkungen für die ökologische Wirkungsbeurteilung im PIOL .....	176
Tabelle 5-5: Kategorisierung der Wirkungen für die soziale Wirkungsbeurteilung im PIOL .....	179
Tabelle 5-6: Sammlung von Synthesemethoden für das PIPE-Modell .....	187
Tabelle 5-7: Sammlung von Analysemethoden für das PIPE-Modell .....	188

---

Tabelle 6-1: Morphologischer Kasten für das PI-Kinderlaufrad mit Konzept A und B.....	207
Tabelle 6-2: Wirkungsbeurteilung des Konzept B und Schlussfolgerungen für die weitere Entwicklung .....	210
Tabelle 6-3: Wirkungsabschätzungen der Ökobilanzen für beide Szenarien in Phase 3 .....	217
Tabelle 6-4: Bill of Material mit MCI-Berechnung des vorläufigen Entwurfs nach [Godd24]....	220
Tabelle 6-5: Wirkungsabschätzungen der Ökobilanzen für beide Szenarien in Phase 4 .....	223
Tabelle 6-6: Analyse der sozialen Auswirkungen anhand der identifizierten Stakeholder.....	227
Tabelle 6-7: Bill of Material mit MCI-Berechnung des finalen Entwurfs nach [Godd24].....	228
Tabelle 6-8: Kompensationsmaßnahmen und Abschätzung der Kompensationskosten für das PI- Kinderlaufrad.....	230
Tabelle 7-1: Bewertung der Anforderungserfüllung des entwickelten PIPE-PEP .....	241
Tabelle 7-2: Bewertung der Anforderungserfüllung des entwickelten PIPS.....	242
Tabelle 7-3: Bewertung des PIPE-Modells anhand der Kriterien der Bewertung des Forschungsstands .....	249

## IV Abkürzungsverzeichnis

BMC	Business Model Canvas
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BoM	Bill of Materials
BoP	Base of the Pyramid
BRD	Bundesrepublik Deutschland
BSI	British Standards Institution
C2C	Cradle to Cradle
CA	Circularity Assessment
CAD	Computer Aided Design
CBD	Convention on Biological Diversity
CBMT	Circular Business Model Tool
CCS	Carbon Capture and Storage
CE	Circular Economy
CEBM	Circular Economy Business Model
CEC	Circular Ecosystem Compensation
CFP	Carbon footprint
C-LCSA	Circular Life Cycle Sustainability Assessment
CO <sub>2</sub> e	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
CSD	Commission on Sustainable Development
CSR	Corporate Social Responsibility
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
D4S	Design for Sustainability
DCB	Dichlorbenzoläquivalent
DfBoP	Design for the Base/Bottom of the Pyramid
DIN	Deutsches Institut für Normung
DRM	Design Research Methodology
EC	European Commission
EDD	Environmental Due Diligence
EEA	European Environment Agency
EMAS	Eco-Management and Audit Scheme
EN	Europäische Norm
EoL	End of Life
ESG	Environmental, Social, Governance
ESPR	Ecodesign for Sustainable Products Regulation
ESRS	European Sustainability Reporting Standards
ETS	Emissions Trading System
EU	Europäische Union

---

EVA	Ethylen-Vinylacetat
EVPG	Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz
EWG	Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft
GWP	Global Warming Potential
HDPE	High Density Polyethylen
HLPF	High-Level Political Forum on Sustainable Development
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
ILO	International Labour Organisation
INCOSE	International Council on Systems Engineering
IPP	Integrierten Produktpolitik
ISED	Integrated Sustainable Engineering Design Process
ISO	International Organization for Standardization
IUCN	International Union for Conservation of Nature and Natural Resources
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Costing
LCE	Life Cycle Engineering
LCI	Life Cycle Initiative
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment
LkSG	Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz
LPC	Living Product Challenge
MCI	Material Circularity Indicator
MET	Material cycles, Energy use and Toxic emissions
MFCA	Material Flow Cost Analysis
MIPS	Material-Intensität pro Serviceeinheit
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OLCA	Organizational Life Cycle Assessment
OLCSA	Organizational Life Cycle Sustainability Assessment
PAS	Publicly Available Specification
PEP	Produktentstehungsprozess
PI	Positive Impact
PIOL	Positive Impact Optimization Loop
PIPE	Positive Impact Product Engineering
PIPS	Positive Impact Product System
PIUS	Produktionsintegrierter Umweltschutz
PLA	Produktlinienanalyse
PROSA	Product Sustainability Assessment

---

PSILCA	Product Social Impact Life Cycle Assessment
PSS	Produkt-Service-Systeme, Product-Service System
QFD	Quality Function Deployment
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of CHemicals
REDD+	Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation
REPA	Resource and Environmental Profile Analysis
SAI	Social Accountability International
SDG	Sustainable Development Goal
SDGs	Sustainable Development Goals
SELCA	Social and Environmental Life Cycle Assessment
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SHDB	Social Hotspots Database
SHINE	Sustainability and Health Initiative for NetPositive Enterprise
S-LCA	Social Life Cycle Assessment
SO-LCA	Social organizational life cycle assessment
SPD	Sustainable Product Development
SWOT	Strengths Weaknesses Opportunities Threats
TLBMC	Triple Layered Business Model Canvas
UBA	Umweltbundesamt
UN	United Nations
UNCED	United Nations Conference on Environment and Development
UNCHE	United Nations Conference on the Human Environment
UNCSD	United Nations Conference on Sustainable Development
UNEP	United Nations Environmental Programm
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
VCM	Voluntary Carbon Markets
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VOC	Volatile Organic Compounds
WCED	World Commission on Environment and Development
WFP	Water footprint
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
WSD	Whole System Design
WSSD	World Summit on Sustainable Development
WWF	World Wide Fund for Nature



## 1 Einleitung und Motivation

Im ersten Kapitel dieser Arbeit wird zunächst die derzeitige Ausgangssituation erläutert und sukzessive auf die Problemstellung fokussiert, um die Motivation für das Thema darzulegen (Kapitel 1.1). Darauf folgt die Beschreibung der Ziele der Dissertation mit inhaltlicher Abgrenzung sowie die Formulierung der Forschungsfragen (Kapitel 1.2). Nach der Beschreibung der wissenschaftlichen Vorgehensweise (Kapitel 1.3) schließt sich ein Überblick über die Struktur und den Aufbau der Arbeit an (Kapitel 1.4).

### 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Der Planet Erde kann als ein komplexes Ökosystem betrachtet werden, in dem zahllose Organismen in einem sich ständig wandelnden Gleichgewicht abhängig voneinander existieren und sich gegenseitig beeinflussen [LoMa74]. Die Menschheit kann als ein Teil dieses Ökosystems gesehen werden, der in den vergangenen beiden Jahrhunderten ein exponentielles Wachstum erreicht hat, wodurch die Marke von acht Milliarden Menschen auf der Erde überschritten wurde [Unit22]. Durch den rasanten Anstieg der Weltbevölkerung und die Ausbreitung der Menschen auf dem gesamten Planeten ist eine erhebliche Einflussnahme auf die Prozesse des Ökosystems Erde entstanden, weswegen man die aktuelle Epoche auch als Anthropozän bezeichnet [CrSc19]. Rockström et al. [RSNP09a, RSNP09b] und Steffen et al. [SRRC15] bewerten dazu neun Prozesse des Erdsystems, auf die der Mensch durch seine Aktivitäten einen so starken Einfluss hat, dass die Grenzen der natürlichen Regenerationsfähigkeit der Erde zum Teil bereits überschritten sind [RSLB23]. Diese neun planetaren Grenzen sind im äußeren Teil der Abbildung 1-1 dargestellt.

Die Einflussnahme der Menschen auf diese Prozesse und der damit verbundenen Grenzen verstärkt sich zwangsweise mit steigender Weltbevölkerung, sofern sich die Lebensweise der Menschen und damit der Umgang mit unserer Umwelt nicht verändert.

In [Rawo12, Rawo18] erweitert Raworth die Situationsanalyse über diese ökologischen Grenzen hinaus und ergänzt im sogenannten Doughnut-Modell elf soziale Grundlagen. Diese müssen gewährleistet sein, um einen sicheren und gerechten Lebensraum für die Menschheit zu schaffen. Wie in Abbildung 1-1 visualisiert, kann dieser Lebensraum langfristig nur erhalten bleiben, wenn die neun planetaren Belastungsgrenzen respektiert und die elf grundlegenden sozialen Voraussetzungen für alle Menschen erfüllt sind.

Scharmer [Scha18] beschreibt die ökologischen und sozialen Herausforderungen als Klüfte, die wir als Menschheit überwinden müssen und fügt der Problemstellung die spirituelle Kluft hinzu. Damit sieht er als größte Herausforderung der Menschheit in Zukunft diese Klüfte zu überwinden: Die zunehmende Entfernung der Menschen von der Natur und Umwelt, die zunehmende Distanzierung der Menschen untereinander und die gesteigerte Entfernung von uns selbst, beispielsweise gemessen an der Zunahme von Depressionen und anderen psychologischen Krankheitsbildern [Bühr15].

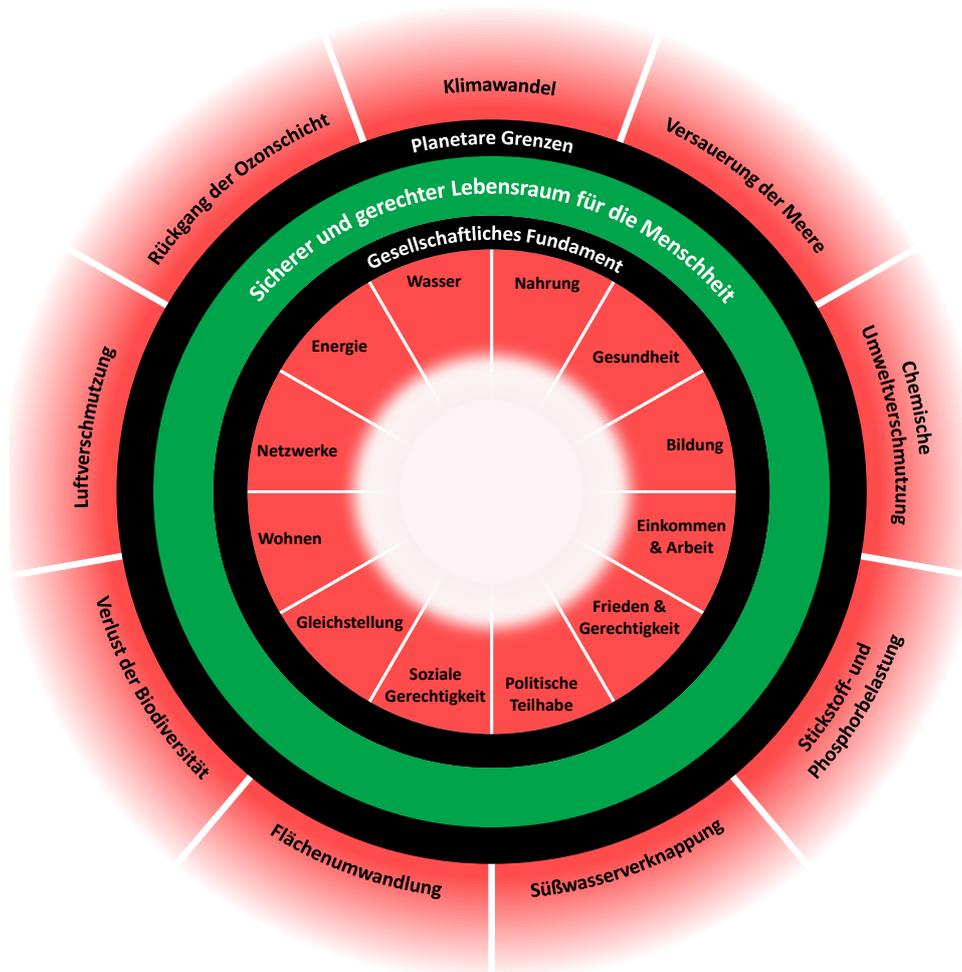


Abbildung 1-1: Planetare Grenzen und soziales Fundament im Doughnut-Modell nach [Rawo18]

Auch die Vereinten Nationen (englisch: United Nations (UN)) haben erkannt, dass unsere derzeitige Lebensweise langfristig die Grundlagen für ein lebenswertes Existieren zukünftiger Generationen gefährdet und im Jahr 2015 „17 Ziele für eine nachhaltige Entwicklung“ [Unde15] formuliert, die in Abbildung 1-2 dargestellt sind.



Abbildung 1-2: 17 Ziele für eine nachhaltige Entwicklung [Ziel15]

Die Anzahl der Ziele verdeutlicht die Vielschichtigkeit der derzeitigen Herausforderungen der Menschheit. Es gilt einen Weg zu einer nachhaltigen, gerechten und dauerhaft tragbaren Lebensweise der Menschen auf dem Planeten Erde zu finden, zum größtmöglichen Nutzen aller Beteiligten des Ökosystems. Davon sind nahezu alle Bereiche unseres Lebens betroffen, wie z.B. Ernährung, Energie, Wohnraum, Gesundheit, Wirtschaft und, wie im zwölften Ziel beschrieben, auch die Art und Weise, wie wir produzieren und konsumieren.

Als Teil der übergreifenden Problemstellung können also auch Produkte, in Form von Dienstleistungen oder Waren, gesehen werden, denn „alle Produkte [...] haben bestimmte Auswirkungen auf die Umwelt, die in irgendeiner Stufe oder in allen Stufen des Produkt-Lebensweges auftreten können - Rohstoffgewinnung, Herstellung, Vertrieb, Nutzung und Beseitigung“ [ISO02]. Sie sind außerdem vielfältige Treiber des Wirtschaftssystems und generieren damit ebenfalls soziale Wertschöpfung, beispielsweise durch Arbeitsplätze. Da Produkte fester Bestandteil unseres Lebens sind und weiterhin die Umwelt, die Gesellschaft und die Wirtschaft signifikant beeinflussen können, lässt sich für die Zukunft folgern, dass auch die Art und Weise, wie wir Produkte herstellen, nutzen und entsorgen, eine nachhaltige Entwicklung vollziehen sollte.

Auch wenn diese Erkenntnis in den letzten Jahren an Zustimmung im öffentlichen Diskurs gewonnen hat, ist sie keineswegs neu. Bereits vor über 50 Jahren legte unter anderem Papanek in seinem Werk „Design for the real world. Anleitungen für eine humane Ökologie und sozialen Wandel“ [Papa72] wichtige Grundsteine für eine nachhaltigere Gestaltung von Produkten. Spätestens seit den 1990er Jahren spielt die Nachhaltigkeit von Produkten und Systemen eine immer wichtigere Rolle in der industriellen Praxis, der Gesetzgebung und in der Forschung. Dabei steht das Forschungsfeld der „*Nachhaltigen Produktentstehung*“ (dieser Begriff wird in dieser Arbeit als feststehender Eigenname des Forschungsfelds großgeschrieben) in Zeiten von globalen Lieferketten, immer komplexeren Produktsystemen und multiplen Wirkungen der Produkte auf die Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft vor wesentlichen Herausforderungen. So fokussiert sich ein Teilgebiet der Forschung auf die Analyse der nachhaltigkeitsrelevanten Wirkungen von Produkten und Systemen, um diese besser verstehen und messen zu können. Andere Gebiete untersuchen Ansätze zur Gestaltung von Produkten, welche die ungewünschten nachhaltigkeitsrelevanten Wirkungen reduzieren oder gänzlich vermeiden. Wie in dieser Arbeit noch näher erläutert werden wird, konzentrieren sich viele Ansätze dabei auf eine bestimmte Art von Auswirkungen auf die Umwelt oder sind speziell für eine bestimmte Produktart ausgelegt. Obwohl im Bereich der *Nachhaltigen Produktentstehung* bereits viele Fortschritte erzielt wurden, können die meisten heutigen Produkte noch nicht als (vollständig) nachhaltig bezeichnet werden. Daraus ergibt sich die Frage, unter welchen Bedingungen ein Produkt als „nachhaltig“ gelten kann und wie ein solches Produkt entwickelt, hergestellt, vertrieben, genutzt und entsorgt werden sollte.

## 1.2 Fokus und Ziel der Arbeit

In den folgenden beiden Abschnitten werden auf Grundlage der dargestellten Problemstellung die Ziele der Arbeit präzisiert und eine inhaltliche Abgrenzung vorgenommen. Anschließend werden die Forschungsfragen der Arbeit formuliert.

### 1.2.1 Ziele und inhaltliche Abgrenzung

Der überwiegende Teil der nachhaltigkeitsrelevanten Wirkungen eines Produkts, die in den verschiedenen Stufen des Produktlebens auftreten, werden bewusst oder unbewusst bereits während der Entwicklung des Produkts vorbestimmt [HoJa95, ScAp14]. Daher kommt den Entwicklern von Produkten eine besondere Verantwortung zu und es werden effektive Werkzeuge und Methoden benötigt, dieser **Verantwortung im Produktentstehungsprozess (PEP)** gerecht werden zu können. Dazu sind eine Vielzahl von **Analysemethoden** zur Bewertung von nachhaltigkeitsrelevanten Wirkungen von Produkten [SMGD12] sowie **Synthesemethoden** zur systematischen Produktentstehung von nachhaltigen Produkten [AWTW18] publiziert worden. Ein großer Teil dieser Methoden ist speziell auf die reine Analyse von nachhaltigkeitsrelevanten Aspekten ausgelegt, die in den meisten Fällen erst durchgeführt wird, wenn das Produkt bereits weitestgehend entwickelt ist und alle wesentlichen Produktaspekte festgelegt sind [KSHW17]. Eine Optimierung zu einer nachhaltigeren Lösung ist dann meist nicht mehr umsetzbar. Im Gegensatz dazu versuchen die Synthesemethoden den Produktentwickler während des PEP basierend auf bestehenden Erkenntnissen, bewährten Verfahren und Beispielen darin zu unterstützen, nachhaltigere Produkte zu entwickeln. Ohne jedoch die nachhaltigkeitsrelevanten Wirkungen dabei zu analysieren, kann der Erfolg der Synthesemethoden nicht überprüft werden.

**Ziel dieser Arbeit** ist es daher, einen neuartigen und effektiven Ansatz zur methodischen Unterstützung des Produktentwicklers zu erarbeiten und zu validieren. Es werden dabei die Vorteile der bisherigen Ansätze vereint, so dass Produkte einen positiven Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung im Sinne der 17 Ziele der UN leisten. Hierbei liegt ein besonderer Fokus auf der vollständigen Betrachtung von allen bekannten nachhaltigkeitsrelevanten Wirkungen des zu entwickelnden Produkts, um diese derart zu gestalten, dass sie vorteilhaft auf die vielseitigen Problemstellungen im Bereich Umwelt und Gesellschaft wirken. Wenn ein Produkt über seinen gesamten Lebenszyklus in allen bekannten Wirkungsbereichen keine negativen, sondern sogar positive Auswirkungen hätte, könnte es effektiv dazu beitragen, bereits entstandene Schäden zu mindern und somit langfristig nachhaltig zu wirken. Statt einen wie bisher meist negativen „Fußabdruck“ zu hinterlassen, könnten Produkte damit in Zukunft dabei helfen, die nachhaltige Entwicklung der Welt voranzutreiben und bisherige Fehlentwicklungen zu korrigieren.

Da die Zielsetzung der Arbeit nicht nur komplex, sondern auch die involvierten Themen- und Forschungsfelder breit gestreut und umfassend sind, erfolgt nun eine **inhaltliche Abgrenzung**. Das Forschungsfeld der *Nachhaltigen Produktentstehung* kombiniert zwei Forschungsgebiete. Zum einen die klassische Produktentwicklung, die aufgrund immer komplexer werdender Produkte mittlerweile häufig auch als Produktsystementwicklung oder im Englischen als „Systems

Engineering“ bezeichnet wird, und zum anderen die Bestrebungen der oben beschriebenen nachhaltigen Entwicklung. Hierbei gibt es zahlreiche Ansätze sowohl in der Forschung als auch in der praktischen Anwendung in verschiedenen Branchen. In Tabelle 1-1 ist ein Überblick über die in- und exkludierten Themenbereiche dargestellt. Der Fokus dieser ingenieurwissenschaftlichen Arbeit liegt auf der Entwicklung technischer und physischer Produkte. Dadurch werden Produkte aus den Branchen der Textil-, Bau- und Lebensmittelindustrie nicht explizit betrachtet, auch wenn die erarbeiteten Ansätze auf diese durchaus übertragbar sein sollten. Das Ergebnis der Arbeit soll eine Unterstützung für den Produktentwickler im PEP bieten, weswegen vorrangig technische Prozesse (vgl.[Iso15]), Methoden, Normen und passende Werkzeuge dafür betrachtet werden. Hingegen werden begleitende, organisatorische Prozesse größtenteils außer Acht gelassen. Grundlegend ist die vollständige Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus inklusive aller Produktlebensphasen, um eine Vernachlässigung von nachhaltigkeitsrelevanten Wirkungen, beispielsweise bei der Extraktion von Ressourcen, zu vermeiden. Dabei sollen auch die mit dem eigentlichen Produkt verbundenen bzw. notwendigen Systeme betrachtet werden. Die Nachhaltigkeit der zu entwickelnden Produktsysteme wird in allen drei Dimensionen – Ökologie, Soziales und Ökonomie – bewertet, da diese nur umfassend betrachtet eine nachhaltige Entwicklung ermöglichen. Die Arbeit fokussiert sich auf das Produkt inklusive dem zugehörigen Geschäftsmodell sowie die direkt damit verbundenen Systeme und Auswirkungen, schließt jedoch eine Betrachtung der Managementebene aus.

**Tabelle 1-1: Inhaltliche Abgrenzung dieser Arbeit**

In Scope	Out of Scope
Technische Produkte	Textilien, Lebensmittel, Gebäude, Software, digitale Produkte, reine Dienstleistungen, Finanzen
Methoden, Prozesse, Normen, Werkzeuge	Organisationsebene
Produktlebenszyklus: Produktplanung, Produktentwicklung Produktion, Produktionssystemplanung, Serienfertigung, Montage, Markteinführung, Vertrieb, Nutzung, Entsorgung	Beschränkung auf einzelne Produktlebensphasen
Systembetrachtung	Beschränkung auf Produkt
Ökologische, soziale, ökonomische Nachhaltigkeit	-
Produkt- und Geschäftsmodellebene	Managementebene
Backcasting-Ansatz	Forecasting-Ansatz

Abschließend ist zu erwähnen, dass das erarbeitete Produktentstehungsmodell nicht darauf abzielt, sofort vollständig umsetzbar zu sein, sondern vielmehr als visionäre Grundlage für künftige Entwicklungen dient. Bei einer Weiterentwicklung können zwei grundsätzliche Vorgehensweisen unterschieden werden: Forecasting und Backcasting [Holm98, MSGH17]. Der Forecasting-Ansatz versucht vom aktuellen Status Quo aus schrittweise eine Verbesserung zum angestrebten

Zielzustand zu erreichen. Im Gegensatz dazu wird beim **Backcasting-Ansatz** zunächst der gewünschte Zielzustand in der Zukunft skizziert, um dann die erforderlichen Schritte rückwärts in die Gegenwart abzuleiten. Es soll also ein Modell entwickelt werden, das Produkte entstehen lässt, die einen positiven Effekt auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft haben, auch wenn dies aktuell aufgrund verschiedener Rahmenbedingungen gegebenenfalls noch nicht umfassend möglich sein sollte. Nähere Erläuterungen zu dieser Vorgehensweise werden im Rahmen der Beschreibung des Modells in Kapitel 5.1 gegeben.

Folglich lässt sich die Zielsetzung dieser Arbeit zusammenfassen:

***Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Produktentstehungsmodells für Produktsysteme mit netto-positiver Nachhaltigkeitswirkung auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft.***

### 1.2.2 Definition der Forschungsfragen

Basierend auf den beschriebenen Zielen und der inhaltlichen Abgrenzung dieser Arbeit können die Forschungsfragen dieser Dissertation formuliert werden. Die übergreifende Forschungsfrage lautet:

- 1.) Wie können Produktsysteme so gestaltet werden, dass sie positive Nachhaltigkeitswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft haben?**

Diese kann in folgende Unterfragen gegliedert werden:

- 2.) Wie lässt sich die Nachhaltigkeitswirkung von Produktsystemen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft bestimmen?**
- 3.) Wie können (netto-)positive Nachhaltigkeitswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft durch Produktsysteme entstehen?**
- 4.) Wie lässt sich die Entstehung positiver Nachhaltigkeitswirkungen in den Produktentstehungsprozess integrieren?**

In der Arbeit werden die Unterfragen sukzessive beantwortet, da ihre Klärung die Grundlage für die Beantwortung der Hauptforschungsfrage bildet. Eine erste partielle Beantwortung erfolgt daher in Kapitel 4.2 im Anschluss an die Darstellung und Bewertung des Forschungsstands. Die abschließende Diskussion aller Fragen erfolgt in Kapitel 7.3 nach der Präsentation des Modells und seiner Validierung.

### 1.3 Vorgehensweise

Um die beschriebene Fragestellung möglichst systematisch zu bearbeiten, ist die Vorgehensweise dieser Arbeit nach der „Design Research Methodology“ (DRM) von [BCh09] strukturiert. Dazu werden vier Phasen nach DRM definiert, deren Bearbeitung iterativ erfolgt. In Abbildung 1-3 ist ein Überblick der Vorgehensweise veranschaulicht.

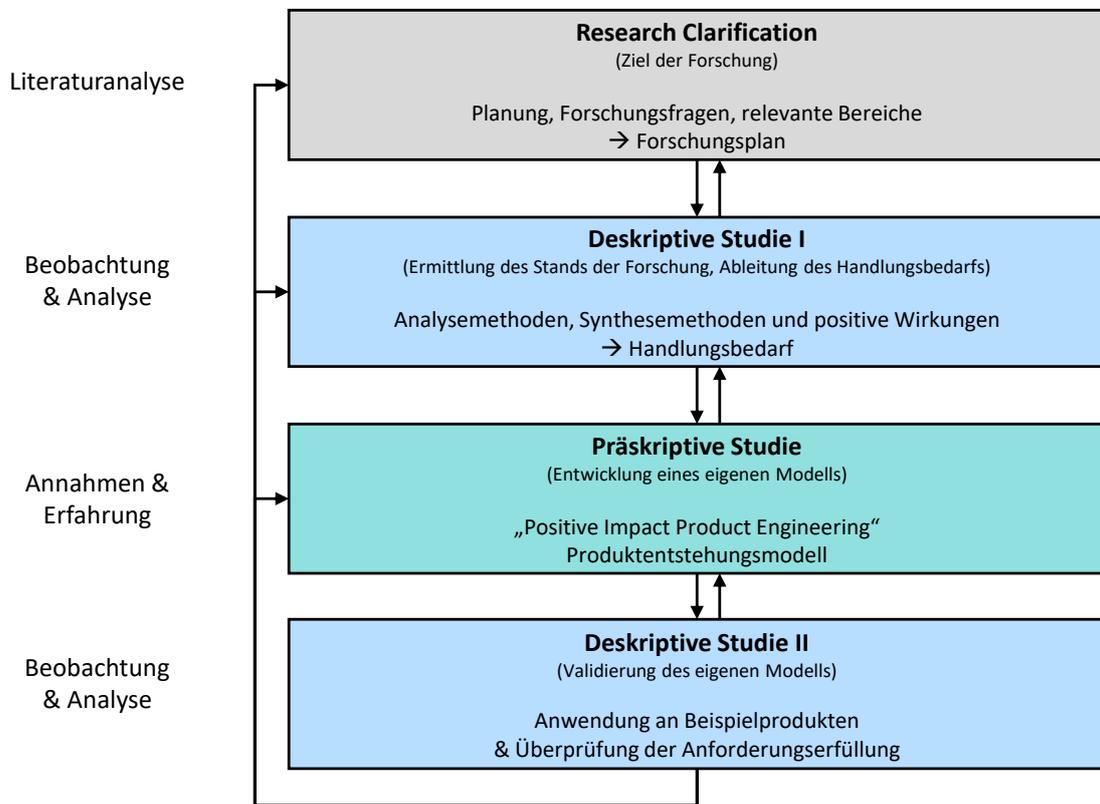


Abbildung 1-3: Design Research Methodology nach [BCh09] im Kontext dieser Arbeit

In der ersten Phase „**Research Clarification**“ wird das Ziel der Forschung beschrieben, relevante Disziplinen und Forschungsbereiche identifiziert und die entsprechenden Forschungsfragen definiert. Im Laufe des Forschungsvorhabens können diese stetig aktualisiert werden. Als Ergebnis der ersten Phase kann somit ein Gesamtforschungsplan erstellt werden, der ebenfalls einen Zeitplan enthält.

Die „**Deskriptive Studie I**“ bildet die zweite Phase der DRM, in der durch Beobachtung und Analyse der aktuelle Stand der Forschung ermittelt wird. Basierend auf den in der ersten Phase definierten Bereichen, kann durch den Abgleich der vorhandenen Literatur mit den Forschungsfragen ein notwendiger Handlungsbedarf abgeleitet werden. Dieser Handlungsbedarf dient als Grundlage für die folgende Phase.

In der dritten Phase „**Präskriptive Studie**“ soll ein eigenes Modell entwickelt oder ein bestehendes Modell so verändert werden, dass die identifizierten Punkte abgedeckt sind. Das neuartige Modell wird anschließend vollständig beschrieben und die Anwendung des Modells erläutert.

Um zu überprüfen, ob das beschriebene Modell auch dem identifizierten Handlungsbedarf gerecht werden kann, wird es in der vierten und letzten Phase „**Deskriptive Studie II**“ beispielhaft

---

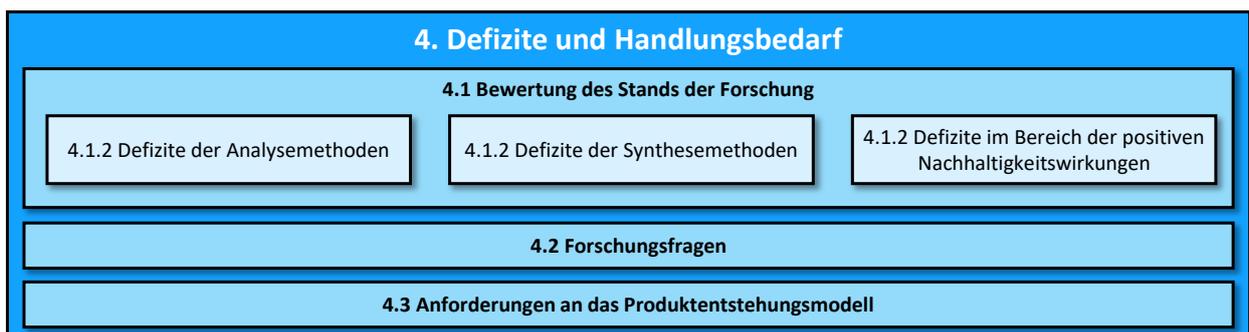
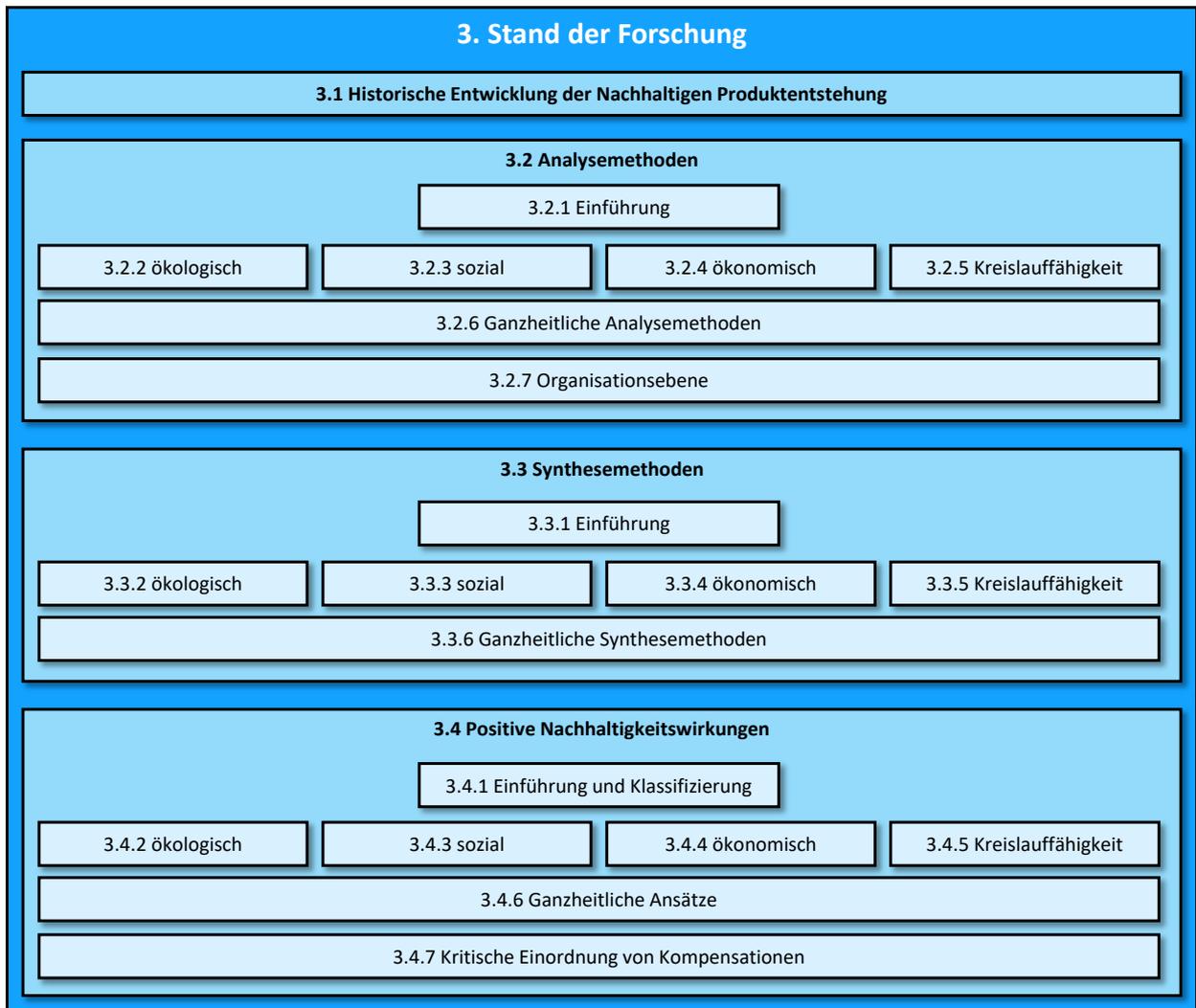
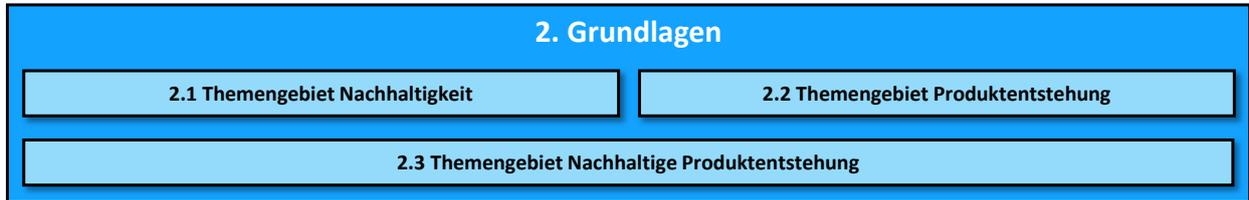
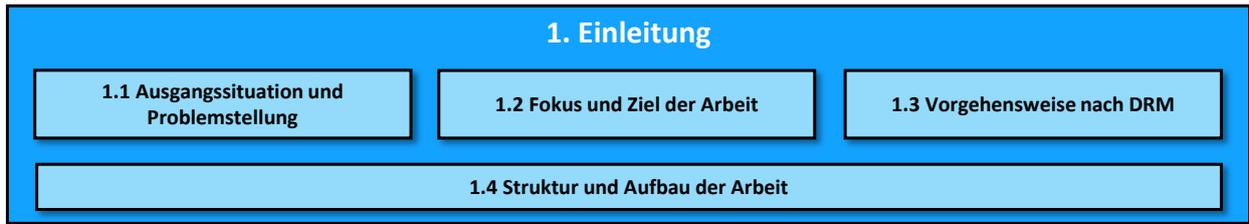
angewendet. Durch die Beobachtung und Analyse der Anwendung des Modells und der daraus resultierenden Ergebnisse kann überprüft werden, ob oder inwiefern eine Verbesserung der in der zweiten Phase identifizierten Problemstellungen durch das Modell erfolgt ist. Somit können die Forschungsfragen abschließend beantwortet werden.

## 1.4 Struktur und Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1-4 dargestellt und untergliedert sich in insgesamt acht Kapitel. In **Kapitel 1** werden nach einer einleitenden Motivation das Ziel der Arbeit und die Forschungsfragen definiert sowie die Vorgehensweise und die Struktur dieser Arbeit vorgestellt. Im Anschluss werden in **Kapitel 2** die relevanten Grundlagen betrachtet und die zentralen Begrifflichkeiten für die Themengebiete Nachhaltigkeit, Produktentstehung und deren Zusammenführung in der *Nachhaltigen Produktentstehung* definiert. Darauf aufbauend wird in **Kapitel 3** ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung im Bereich der *Nachhaltigen Produktentstehung*, gegliedert in Analyse- und Synthesemethoden sowie positive Nachhaltigkeitswirkungen, gegeben. **Kapitel 4** leitet auf Basis der ersten drei grundlegenden Kapitel den konkreten Handlungsbedarf ab, der sich aus den Defiziten des aktuellen Forschungsstands ergibt. Daraufhin werden als Abschluss der ersten deskriptiven Studie die Forschungsfragen näher beschrieben und die Anforderungen an das zu entwickelnde Modell festgehalten.

**Kapitel 5** präsentiert das entwickelte Produktentstehungsmodell und bildet damit die präskriptive Studie dieser Arbeit. Nach der Einordnung des Modells werden die drei zentralen Elemente detailliert beschrieben. In **Kapitel 6** wird das Modell im Rahmen der zweiten deskriptiven Studie anhand zweier Fallstudien zur Produktentstehung eines Kinderlaufrads und eines e-Bikes angewendet.

Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt in **Kapitel 7**, wobei das Produktentstehungsmodell und dessen beispielhafte Anwendung kritisch betrachtet werden, um die Erfüllung des Handlungsbedarfs prüfen und die Forschungsfragen abschließend beantworten zu können. Das letzte **Kapitel 8** fasst schließlich die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf potenzielle weitere Forschungsschwerpunkte sowie notwendige Entwicklungen im Kontext der untersuchten Thematik.



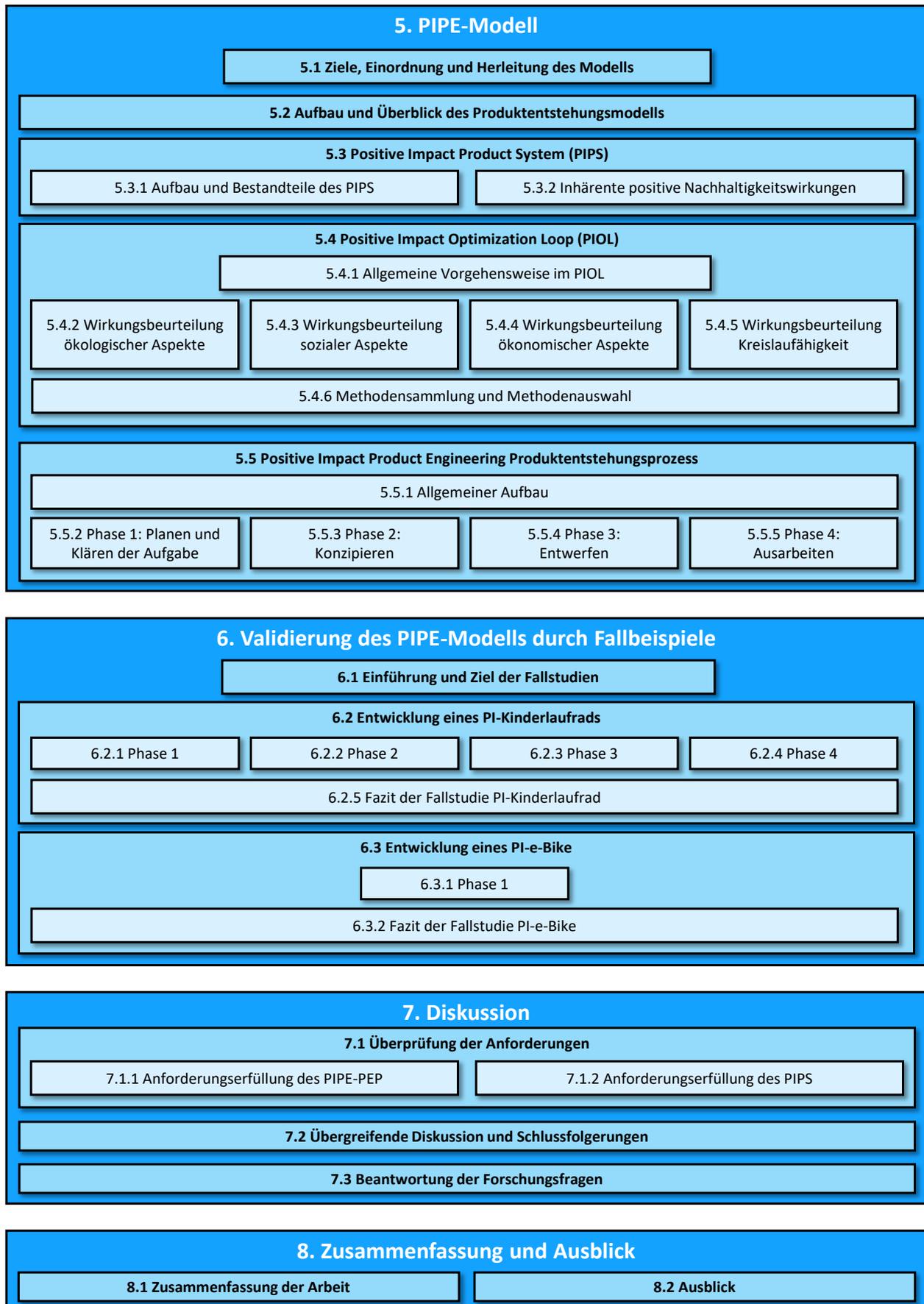


Abbildung 1-4: Struktur der Arbeit



## 2 Grundlagen

Im zweiten Kapitel werden die relevanten Grundlagen für diese Arbeit erörtert. Dazu gilt es zunächst die grundsätzlichen Begriffe zu definieren. Dies erfolgt erst separat für die Themenbereiche Nachhaltigkeit (Kapitel 2.1) und Produktentstehung (Kapitel 2.2) und abschließend als Fusion der beiden Themengebiete im Rahmen der *Nachhaltigen Produktentstehung* (Kapitel 2.3).

Es ist an dieser Stelle festzuhalten, dass es in der Fachliteratur oftmals mehrere Definitionen zu Begriffen gibt und diese je nach Kontext unterschiedlich verwendet werden. Umso wichtiger ist es, diese im Rahmen dieser Arbeit einzuordnen und klar zu bestimmen. Außerdem existieren neben den beschriebenen Begrifflichkeiten noch zahlreiche andere oder überschneidende Begriffe mit Bezug zur *Nachhaltigen Produktentstehung*, die zu Gunsten der Übersichtlichkeit in den folgenden Kapiteln nicht näher erläutert werden.

### 2.1 Grundlagen im Themengebiet Nachhaltigkeit

Im ersten Themengebiet werden zunächst die Grundlagen des Begriffs der Nachhaltigkeit sowie der damit verbundenen nachhaltigen Entwicklung erläutert. Anschließend erfolgt eine detaillierte Betrachtung der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit: Ökologie, Soziales und Ökonomie. Ein weiterer Abschnitt widmet sich den grundlegenden Konzepten der Kreislaufwirtschaft.

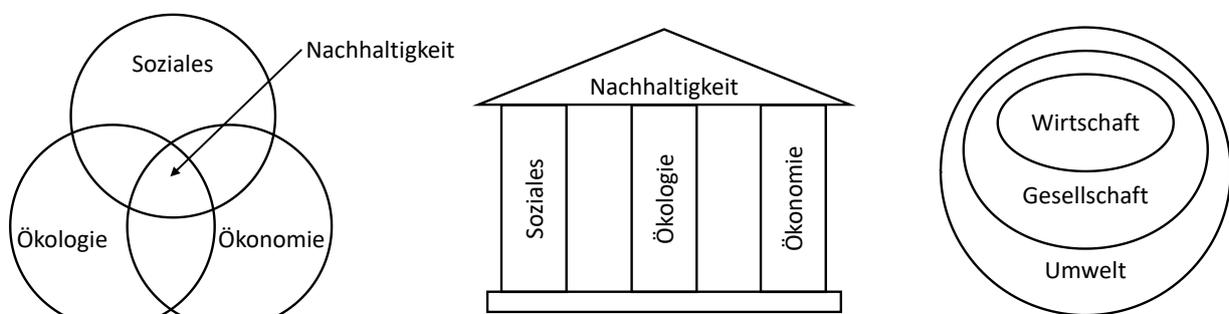
#### 2.1.1 Nachhaltigkeit und nachhaltige Entwicklung

Wie bereits einleitend in dieser Arbeit beschrieben, ist der Begriff der **Nachhaltigkeit** aktuell fester Bestandteil des öffentlichen, politischen und wissenschaftlichen Diskurses. Trotz der Aktualität und der fast schon inflationären Verwendung ist die begriffliche Definition nicht eindeutig [Röde13]. Im Universalwörterbuch Duden wird Nachhaltigkeit zunächst als „längere Zeit anhaltende Wirkung“ beschrieben [DuBi15]. Die Ursprünge des Nachhaltigkeitsgedanken haben nach Radkau [Radk02] in der deutschen Forstwirtschaft eine jahrhundertelange Geschichte, bereits bevor der Begriff Nachhaltigkeit in seiner heutigen Form verwendet wurde. Die erste schriftliche Verwendung wird zumeist Hans Carl von Carlowitz im Jahre 1713 in seinem Buch „*Sylvicultura oeconomica*“ [Carl13], einer Anweisung zur wilden Baumzucht, in folgendem Satz zugeordnet: „eine sothane Conservation und Anbau des Holzes anzustellen, dass es eine continuierliche, beständige und nachhaltige Nutzung gebe.“ [Carl13] Auch wenn von Carlowitz damit wichtige Grundlagen der Nachhaltigkeit festgehalten und die „nachhaltende Nutzung“ erstmals erwähnt hat, scheint die Stilisierung als „Erfinder der Nachhaltigkeit“ übertrieben [CaHG12]. In Mangel einer eindeutigen Definition des Begriffs Nachhaltigkeit, kann dieser eher als ein offenes Konzept mit unzähligen Interpretationen und kontextspezifischem Verständnis betrachtet werden [PuMR19]. Nachhaltigkeit kann somit auch als eine Art zu erreichender Zielzustand gesehen werden, der eine – oft synonym verwendete – nachhaltige Entwicklung erfordert.

Erstmals auf politischer Ebene definiert wurde der Begriff der **nachhaltigen Entwicklung** in dem sogenannten Brundtland-Bericht „Our Common Future/Unsere gemeinsame Zukunft“ [Unit87] im Jahr 1987. Hier heißt es (frei aus dem Englischen übersetzt): „Die Menschheit ist in der Lage,

die Entwicklung nachhaltig zu gestalten, um sicherzustellen, dass sie die Bedürfnisse der Gegenwart erfüllt, ohne die Fähigkeit künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen. Das Konzept der nachhaltigen Entwicklung impliziert Grenzen - keine absoluten Grenzen, sondern Grenzen, die sich aus dem gegenwärtigen Stand der Technik und der sozialen Organisation für die Umweltressourcen und aus der Fähigkeit der Biosphäre ergeben, die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten zu absorbieren.“ [Unit87] Die nachhaltige Entwicklung kann also als globale Herausforderung betrachtet werden und zielt darauf ab, die Entwicklung dahingehend zu beeinflussen, dass jetzige und zukünftige Generationen dauerhaft auf dem Planeten Erde in Würde leben können. Seit der „Agenda 21“ [Unit92a], die 1992 in Rio de Janeiro in Folge einer UN-Konferenz verabschiedet wurde, wird die „nachhaltige Entwicklung als globales Leitprinzip international akzeptiert“ [Bmzb23]. Wie bereits in Kapitel 1.1 gezeigt, haben die Vereinten Nationen mit den 17 „Sustainable Development Goals – SDGs“ (siehe Abbildung 1-2) der „Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung“ [Unge15] den Begriff nochmals erweitert und für mehrere Zielbereiche konkretisiert. Diese Arbeit orientiert sich an dem Konsens aus der VDI-Richtlinie 4605, „dass unter nachhaltiger Entwicklung eine Entwicklung hin zu einer „bestmöglichen Lebensqualität“ zu verstehen ist, die dauerhaft aufrechterhalten werden kann und auf die gesamte Menschheit ausdehnbar sein sollte.“ [VDI17a]

Verbunden mit dem kontinuierlichen Wandel der Interpretationen der Begriffe Nachhaltigkeit und nachhaltige Entwicklung, etablierten sich für das elementare Verständnis die sogenannten **drei Dimensionen der Nachhaltigkeit** mit den Bestandteilen **Ökologie, Soziales und Ökonomie**. Die Ursprünge dieses Modells sind nicht eindeutig zu bestimmen, und es gibt zahlreiche Interpretationen und nahezu synonyme Begrifflichkeiten, wie die drei Nachhaltigkeitssäulen, -grundpfeiler, -perspektiven, -komponenten, etc. [Klei09, PuMR19]. Abbildung 2-1 zeigt drei verschiedene Darstellungen dieses Modells, die auf unterschiedliche Art beschreiben sollen, dass Nachhaltigkeit diese drei Teilbereiche vereinen soll. Während das Schnittmengenmodell (links) und das Säulenmodell (mittig) eine gleichrangige Wertigkeit im Konzept der sogenannten **schwachen Nachhaltigkeit** implizieren, unterteilt das Vorrangmodell (rechts) die Bestandteile in eine dreistufige Wertigkeit [Step22].



**Abbildung 2-1: Verschiedene Darstellungen der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit nach [PuMR19]**

In diesem Konzept der **starken Nachhaltigkeit** wird davon ausgegangen, dass die Ökologie die langfristigen Lebensgrundlagen für die Gesellschaft (das Soziale) bildet und eine intakte

Gesellschaft schließlich die Grundvoraussetzung für eine funktionierende Wirtschaft darstellt, wodurch ökonomische Ziele den sozialen und diese wiederum den ökologischen Zielen untergeordnet werden [Step22].

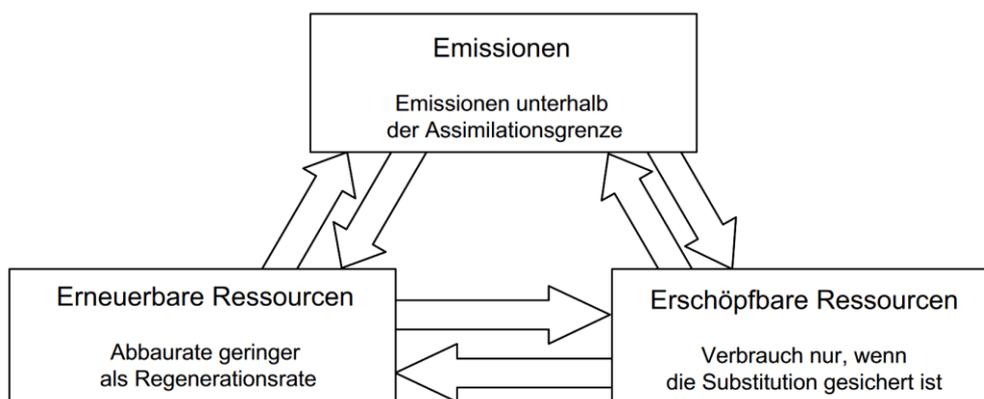
In dieser Arbeit werden die drei Bestandteile als die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit bezeichnet, in denen jeweils unterschiedliche **Aspekte** relevant sein können. Jeder Aspekt repräsentiert eine spezifische Facette der jeweiligen Dimension und trägt somit zur ganzheitlichen Betrachtung der Nachhaltigkeit bei. Die Unterteilung in Ökologie, Soziales und Ökonomie dient ebenfalls als Unterteilung der Folgekapitel, in denen die Dimensionen zueinander abgegrenzt und die damit verbundenen Unterbegriffe erläutert werden. Eine spezifischere Beschreibung des Nachhaltigkeitskonzepts im Rahmen der *Nachhaltigen Produktentstehung* findet in Kapitel 2.3 als Fusion der Grundlagen von Nachhaltigkeit und Produktentstehung statt.

### 2.1.2 Ökologische Dimension

Das Forschungsfeld der **Ökologie** untersucht als Teilgebiet der Biologie die „Wechselbeziehungen zwischen den Lebewesen und ihrer Umwelt“ [DuBi15]. Im Nachhaltigkeitskontext werden in der ökologischen Dimension die Wechselwirkungen und Auswirkungen von Systemen oder Organisationen auf die Umwelt betrachtet. Die ISO 14001 definiert dabei **Umwelt** als die „Umgebung, in der eine Organisation tätig ist, einschließlich Luft, Wasser, Boden, natürliche Ressourcen, Flora, Fauna, Menschen und deren wechselseitige Beziehungen“ [DIN15]. In der vorliegenden Arbeit wird diese Definition mit der Anmerkung übernommen, dass die Wechselwirkungen der Menschen untereinander zwar per Definition ebenfalls zur Umwelt zählen, aber separat in der sozialen Dimension (siehe Kapitel 2.1.3) der Nachhaltigkeit untersucht werden. In Abgrenzung hierzu wird in der ökologischen Dimension vorrangig die anthropogene „Veränderung der Umwelt, ob günstig oder ungünstig“ [DIN15] betrachtet, welche als **Umweltauswirkung** bezeichnet wird. Ebenso vielfältig wie die Umwelt selbst, können die Auswirkungen menschlichen Handelns auf diese sein. Die Gesamtheit der Auswirkungen über die Zeit sind dabei heute bereits so groß, dass praktisch alle Ökosysteme des Planeten als anthropogen beeinflusst oder geformt betrachtet werden müssen [CFBL98]. Beispiele für negative Umweltauswirkungen sind die Emission von Schadstoffen in die Luft, die Entnahme von Wasser aus natürlichen Gewässern, die Abgabe von Abwärme an die Umwelt oder die Umwandlung von natürlichen Lebensräumen zur menschlichen Nutzung. Wenn auch seltener vorhanden, existieren auch positive Umweltauswirkungen durch den Menschen, welche allerdings meist nur die bestehenden anthropogenen Auswirkungen zu reduzieren versuchen. Dazu gehören beispielsweise die Renaturierung von Industrieflächen, die Entgiftung von Gewässern oder der aktive Artenschutz. Eine detailliertere Klassifizierung der ökologischen Auswirkungen für diese Arbeit ist in Kapitel 3.2.2 zu finden. Durch die anthropogenen Umweltauswirkungen der Vergangenheit sind bereits eine Vielzahl von irreversiblen Veränderungen unserer Ökosysteme entstanden, wie z.B. der Verlust vieler Tier- und Pflanzenarten [CFBL98].

Innerhalb der 17 Nachhaltigkeitsziele [Unde15] finden sich auch Ziele, die die ökologische Dimension widerspiegeln. Hierzu gehören Leben unter Wasser (14), Leben an Land (15), Bezahlbare und saubere Energie (7), Maßnahmen zum Klimaschutz (13), Nachhaltiger Konsum und Produktion (12) sowie Sauberes Wasser und sanitäre Einrichtungen (6).

Da die Umwelt mit der Bereitstellung von essenziellen Ressourcen wie Nahrung, Wasser oder Sauerstoff eine wesentliche Grundlage für menschliches Leben bildet, stellt die unkontrollierte Veränderung dieser grundsätzlich ein Risiko für die dauerhafte Versorgung mit diesen natürlichen Ressourcen dar [HaKI09]. Umso wichtiger ist also ein bewusster Umgang mit der Umwelt sowie die Reduzierung der bereits vorhandenen und zukünftigen negativen Umweltauswirkungen. Da anthropogene Einflüsse unvermeidbar sind, solange der Mensch Teil der Umwelt ist, wird es notwendig, eine wissenschaftliche Definition eines verträglichen Maßes an Veränderungen zu finden. Auch wenn die Abläufe, Wechselwirkungen und Regenerationspotenziale innerhalb der verschiedenen betroffenen Ökosysteme komplex sind, wird versucht, eine Definition für einen **ökologisch nachhaltigen** Umgang mit der Umwelt zu erarbeiten. In Anlehnung an Daly [Daly90] hat von Hauff hierzu die in Abbildung 2-2 dargestellten „Handlungsregeln für eine nachhaltige Entwicklung“ [Hauf21, Klei09] entwickelt.



**Abbildung 2-2: Handlungsregeln für eine nachhaltige Entwicklung [Hauf21] in Anlehnung an [Daly90]**

Hierbei werden Regeln für den Umgang mit Emissionen und Ressourcen festgelegt. Für einen nachhaltigen Umgang mit unserer Umwelt sollten die Emissionen unterhalb der Assimilationsgrenze liegen. Die „Aufnahmefähigkeit der Natur als Senke für Emissionen“ [Hauf21] aller Art darf nicht überschritten werden (**Assimilationsregel**). Hinsichtlich der Ressourcen wird zwischen erneuerbaren und erschöpfbaren Ressourcen differenziert. So dürfen den Grundsätzen von Carlowitz [Carl13] entsprechend die erneuerbaren Ressourcen nicht stärker abgebaut werden, als sie sich natürlich regenerieren (**Regenerationsregel**). Erschöpfbare Ressourcen hingegen dürfen nur verbraucht werden, wenn deren Substitution gesichert ist (**Substitutionsregel**). Kleine [Klei09] erweitert die drei Regeln um weitere Vorschläge aus der Enquête-Kommission [CFBL98]. So soll die **Reaktionsregel** das „zeitliche Reaktionsvermögen der Umwelt angemessen berücksichtigen“ [Klei09], um Umweltauswirkungen durch menschliches Handeln auch langfristig bewerten zu können. Weiterhin sollen durch die **Gefahren-/Risikoregel** „Gefahren und unvermeidbare Risiken

für die menschliche Gesundheit durch anthropogene Einwirkungen“ [CFBL98] vermieden werden.

In dieser Arbeit dienen die genannten Regeln als Grundlage für nachhaltiges Handeln innerhalb der ökologischen Dimension. Eine detaillierte Eingrenzung auf das Gebiet der *Nachhaltigen Produktentstehung* und das zu entwickelnde Produktentstehungsmodell findet in Kapitel 2.3 und Kapitel 5 statt.

### 2.1.3 Soziale Dimension

Als zweite der drei Nachhaltigkeitsdimensionen wird nun die soziale Dimension betrachtet. In dieser werden die gesellschaftlichen Auswirkungen untersucht. Dabei versteht sich eine **Gesellschaft** als „Gesamtheit der Menschen, die zusammen unter bestimmten politischen, wirtschaftlichen und sozialen Verhältnissen leben“ [DuBi15]. Wie bereits in der bisherigen Nachhaltigkeitsbetrachtung verdeutlicht, sollte in dieser Dimension die **Gesamtheit aller Menschen** des Planeten als soziale Gemeinschaft betrachtet werden und nicht auf einzelne Gesellschaftsteile eingeschränkt werden. **Soziale Aspekte** bezeichnen in dieser Arbeit jene, die das Zusammenleben der Menschen in der Gesellschaft und den Staat betreffen. Dazu zählen beispielsweise die allgemeinen Lebensbedingungen, Gleichberechtigung, Bildungsmöglichkeiten oder die Deckung der Grundbedürfnisse. Hierbei stehen die immateriellen Lebensgrundlagen im Fokus, mit dem Ziel eine stabile Gesellschaft in Freiheit, Gerechtigkeit, Humanität und gleichverteiltem Wohlstand zu erreichen [Hauf21, Pich20]. Genuin sind diese sozialen Aspekte stark mit denen der ökonomischen Dimension verbunden (siehe Kapitel 2.1.4). Eine Abgrenzung dazu und eine detailliertere Klassifizierung der für diese Arbeit relevanten, sozialen Aspekte im Bereich der Produktentstehung sind in Kapitel 3.2.3 zu finden.

Auch wenn historisch betrachtet die soziale Dimension im Nachhaltigkeitsdiskurs zunächst eine untergeordnete Rolle spielt, hat sich seit den Millennium Goals [Unge00] aus dem Jahr 2000 ihre Bedeutung intensiviert. In den 17 Nachhaltigkeitszielen [Unde15] spiegelt sich die soziale Dimension in mehreren Zielen wider. Dazu gehören Keine Armut (1), Kein Hunger (2), Gesundheit und Wohlergehen (3), Hochwertige Bildung (4), Geschlechtergleichheit (5), Menschenwürdige Arbeitsbedingungen (8), Weniger Ungleichheiten (10), Nachhaltige Städte und Gemeinden (11), Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen (16). Der große Anteil an den Nachhaltigkeitszielen zeigt, wie breit gefächert die soziale Dimension betrachtet werden sollte. Erschwerend kommt hinzu, dass in einer Welt mit unterschiedlichen Wertevorstellungen und vielzähligen Perspektiven, insbesondere die der zukünftigen Generationen, es keine eindeutige Bestimmung von sozial nachhaltigem Handeln geben kann. So divergieren die sozialen Bewertungskriterien innerhalb der Gesamtgesellschaft und sind global betrachtet nicht homogen, wodurch Indikatoren teilweise objektiv und teilweise subjektiv einzuordnen sind [EmWe02, EmWe99].

#### 2.1.4 Ökonomische Dimension

Die dritte Nachhaltigkeitsdimension untersucht die Wechselwirkungen **zur Ökonomie oder Wirtschaft**, also der „Gesamtheit der Einrichtungen und Maßnahmen, die sich auf Produktion und Konsum von Wirtschaftsgütern beziehen“ [DuBi15]. Hierbei dienen Wirtschaftsgüter grundsätzlich der Befriedung menschlicher Bedürfnisse, um eine gewisse Lebensqualität zu gewährleisten und das menschliche Wohlbefinden zu fördern. Das **Wirtschaftssystem** ist das „System, mit dem eine Gesellschaft ihre Ressourcen organisiert und verteilt“ (frei aus dem Englischen übersetzt) [ISO24a]. Die ökonomische Dimension stellt analog zu den anderen beiden Dimensionen, insbesondere global betrachtet, ein ausgesprochen komplexes Untersuchungsgebiet dar, das vielfältige Wechselwirkungen in die Ökologie und das Soziale hat. Beispiele hierfür sind die Verteilung des Einkommens oder des Wohlstands, die einen direkten Bezug zur sozialen Dimension aufweisen.

Gemäß dem Brundtland-Bericht [Unit87], sollte eine nachhaltige Wirtschaft die Fähigkeit besitzen, über einen **längeren Zeitraum** hinweg zu existieren, um **Lebensqualität und Wohlstand** zu gewährleisten, ohne dabei die Umwelt zu schädigen oder Ressourcen zu erschöpfen. Bereits seit Jahrzehnten wird dabei die Frage diskutiert, ob dies möglich sei, auf einem Planeten mit endlichen Ressourcen und einem Wirtschaftssystem, das - meist gemessen am Bruttoinlandsprodukt - stetig wachsen muss, um langfristig zu funktionieren [Boul66, McCl72]. Dabei wird auch das Bruttoinlandsprodukt als richtige Messgröße für wirtschaftlichen und sozialen Wohlstand häufig in Frage gestellt [East74, EMSS10, Göpe16]. Als Folge daraus sind zahlreiche Ansätze und Wirtschaftsmodelle entstanden, die beispielsweise versuchen, den Ressourcenverbrauch oder die Umweltauswirkungen vom Wirtschaftswachstum zu entkoppeln [Howa15] oder die Prämisse des notwendigen Wachstums außer Kraft zu setzen [Lang18, Vict12]. Bisher hat sich jedoch keiner der Ansätze als universelle und umsetzbare Lösung hervorheben können, weswegen **Wirtschaftswachstum** als achttes Ziel auch in den 17 Nachhaltigkeitszielen der UN weiterhin vorausgesetzt wird [Unde15]. Darüber hinaus wird die ökonomische Dimension durch Ziele wie menschenwürdige Arbeit (ebenfalls 8), Industrie, Innovation und Infrastruktur (9), sowie die Förderung von Partnerschaften zur Erreichung der Ziele (17) repräsentiert.

Eine trennscharfe Definition von ökonomischer Nachhaltigkeit wird zusätzlich durch die **Vielzahl an Perspektiven** erschwert, die von individuellen über regionale und nationale bis hin zu globale Ebenen innerhalb eines Wirtschaftssystems reichen können. So kann etwa ein Unternehmen langfristig erfolgreich am Markt existieren, gleichzeitig aber die Angestellten finanziell ausbeuten oder der Gesamtwirtschaft sogar schaden. Da die Debatte um die ökonomische Nachhaltigkeit das Fachgebiet dieser Arbeit lediglich tangiert, wird an die oben genannte Definition aus dem Brundtland-Bericht angeknüpft. Die relevanten ökonomischen Aspekte im Bereich der Produktentstehung sind in Kapitel 3.2.4 nochmal näher beschrieben. Eine besondere Ausprägung der Wirtschaft stellt die Kreislaufwirtschaft dar, die insbesondere im Bereich der nachhaltigen Entwicklung ein großes Potential bietet. Daher wird im folgenden Kapitel gesondert auf das Thema Kreislaufwirtschaft eingegangen.

### 2.1.5 Grundlagen der Kreislaufwirtschaft

Die aktuellen Wirtschaftssysteme und folglich das globale Wirtschaftssystem können überwiegend als **lineare Wirtschaften** bezeichnet werden, die darauf basieren Ressourcen zu entnehmen, daraus zu produzieren und diese Ressourcen nach der Nutzung zu entsorgen [ISO24a]. Dieses lineare Vorgehen führt langfristig einerseits zu einer Erschöpfung der vorhandenen Ressourcen und andererseits zu negativen Umweltauswirkungen wie beispielsweise Umweltverschmutzung durch Abfalldeponien. Um dem entgegenzuwirken, wird auf politischer Ebene ein Übergang zu einer stärker zirkulären Wirtschaft, die auf einem zirkulären Ressourcenfluss basiert, angestrebt (vgl. SDGs Ziel 12 – Nachhaltiger Konsum und Produktion [Unde15]). Seit 2015 gibt es daher seitens der Europäischen Kommission Aktionspläne für die sogenannte **Kreislaufwirtschaft** [Euro15, Euro20a]. Die Normenreihe ISO 59000 definiert dabei die Kreislaufwirtschaft als „Wirtschaftssystem, das einen systemischen Ansatz verfolgt, um den Kreislauf der Ressourcen aufrechtzuerhalten, indem es ihren Wert zurückgewinnt, bewahrt oder steigert und gleichzeitig zu einer nachhaltigen Entwicklung beiträgt“ (frei aus dem Englischen übersetzt [ISO24a]). Geissdoerfer et al., die den Begriff der Kreislaufwirtschaft im Kontext der Nachhaltigkeit einordnen, konkretisieren die Definition der Kreislaufwirtschaft „als ein regeneratives System, in dem Ressourceneinsatz und Abfall, Emissionen und Energieverluste durch **Verlangsamung, Schließung und Verkleinerung** von Material- und Energiekreisläufen minimiert werden.“ (frei aus dem Englischen übersetzt [GSBH17]). Als Maßnahmen zur Umsetzung dieses Konzept werden langlebiges Design, Wartung, Reparatur, Wiederverwendung, Wiederaufbereitung, Instandsetzung und Recycling genannt [GSBH17], welche in Abbildung 2-3 visualisiert sind. Eine genauere Erläuterung dieser Ansätze im Bereich der Produktentstehung sind im Stand der Forschung in Kapitel 3.2.5 und 3.3.5 zu finden.

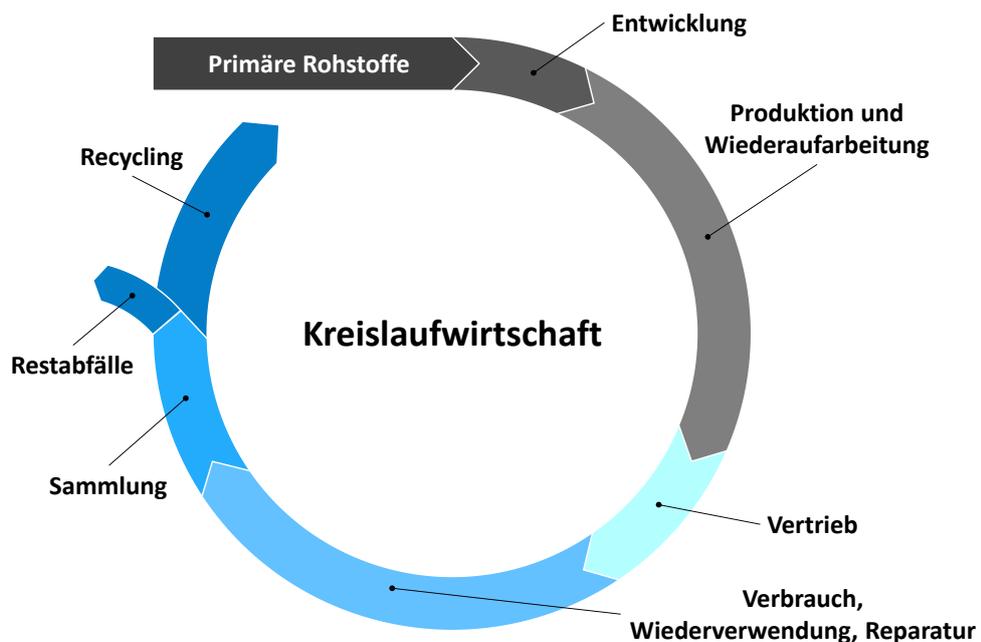


Abbildung 2-3: Grafische Darstellung der Kreislaufwirtschaft nach [Bund18]

## 2.2 Grundlagen im Themengebiet Produktentstehung

Die grundlegenden Begriffe im Themengebiet der **Produktentstehung** werden im folgenden Kapitel im Allgemeinen geklärt, zu Beginn ohne Bezug zur Nachhaltigkeit. Nachdem die wichtigsten Begrifflichkeiten definiert sind, werden anschließend die für diese Arbeit essenziellen Modelle im Bereich der Problemlösung (Kapitel 2.2.1) und der Produktentstehung selbst (Kapitel 2.2.2) vorgestellt.

Die VDI 2221 definiert **Produkt** als „Erzeugnis oder Leistung materieller wie immaterieller Art, das oder die allein oder als System angeboten wird, um den Bedarf am Markt sowie die Bedürfnisse von Nutzern zielgruppengerecht zu befriedigen“ [VDI19a]. Darunter können sowohl Waren (z.B. mechanisches Bauteil einer Maschine), als auch Dienstleistungen (z.B. Transport oder Software) verstanden werden [ISO02]. Das Produkt gilt dabei als Ergebnis des sogenannten **Produktentstehungsprozess (PEP)**. Laut [ISO02] ist ein **Prozess** ein „Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt“. Zum PEP zählen also alle Tätigkeiten, die für die Entwicklung und Realisierung eines Produkts erforderlich sind. Naefe et al. [NaLu16] ordnen darüber hinaus den Begriff der **Produktentwicklung** als Teil des PEP im Anschluss an die **Produktplanung** und vorgelagert zur **Herstellung** des Produkts ein. Wie in Abbildung 2-4 zu sehen, kann der PEP als Teil des gesamten Produktlebenszyklus aus prozessorientierter Sicht betrachtet werden.

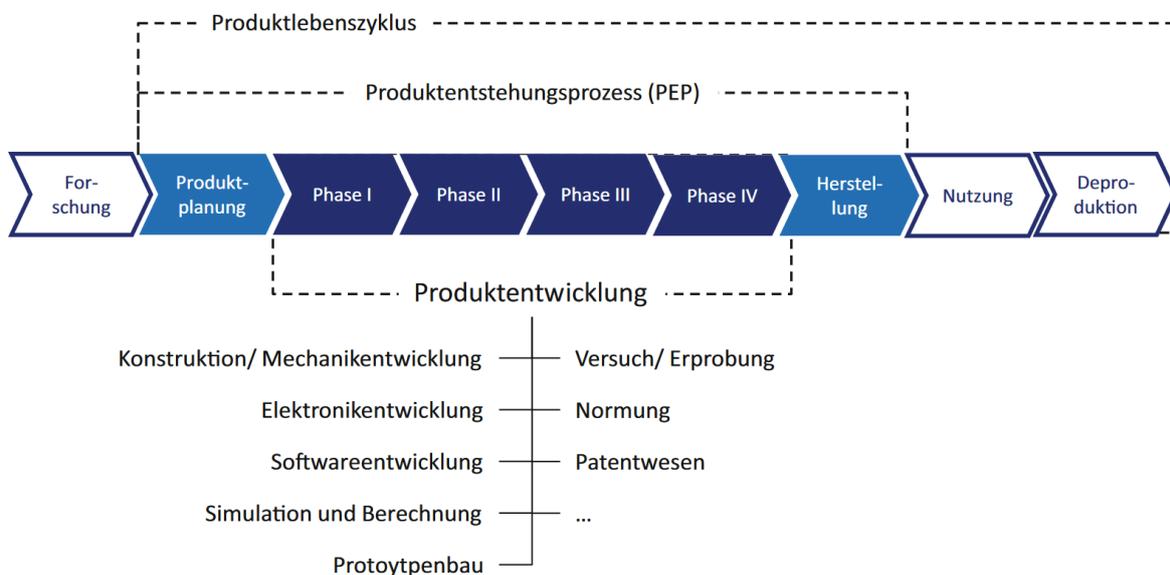


Abbildung 2-4: Produktlebenszyklus, Produktentstehungsprozess und Produktentwicklung aus [NaLu16]

Der **Produktlebenszyklus** ergänzt den PEP mit den beiden Phasen der **Nutzung** und **Deproduktion** des Produkts. Auch die VDI 2221 [VDI19a] sieht die Produktentstehung als Teil des technischen Produktlebenszyklus mit den Phasen Produktplanung, Produktentwicklung und Realisierung/Produktion. Vergleichbar zu Naefe et al. folgen darauf die beiden Phasen Produktnutzung und **Ende des Produktlebens** (englisch: **End of Life (EoL)**).

Da Produkte stetig komplexer werden und in der Regel mehrere Fachbereiche wie Maschinenbau, Elektrotechnik oder Informatik an der Produktentstehung beteiligt sind, hat sich neben dem Begriff der Produktentstehung auch der englische Begriff Systems Engineering (deutsch: Systemtechnik) etabliert. Ein **System** kann als ein „Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Elementen“ [DIN05a] bezeichnet werden. Die interagierenden Elemente des Systems sind dabei so organisiert, dass ein oder mehrere festgelegte Absichten oder Ziele erreicht werden [Isoi15]. Der Systemgedanke kann dabei den Begriff des Produkts wirksam erweitern. Das **Produktsystem** ist die „Zusammenfassung von Prozessmodulen mit Elementar- und Produktflüssen, die den Lebensweg eines Produktes modelliert und die eine oder mehrere festgelegte Funktionen erfüllt“ [ISO06a]. Je nach Produkt kann das Produktsystem zu einem umfangreichen und komplexen System werden, das als ein „**System of Systems**“ (frei übersetzt: System von Systemen) [KRUD03] aus mehreren **Subsystemen**, wie etwa dem Produktionssystem, bestehen kann. Der Umfang des Systems wird dabei durch die **Systemgrenze** festgelegt, einem „Satz von Kriterien zur Festlegung, welche Prozessmodule Teil eines Produktsystems sind“ [ISO06a]. Habermüller et al. sehen darin eine mehr oder weniger willkürliche Grenze zwischen dem System und seiner Umgebung oder der Umwelt, in die es eingebettet ist [HDFV19]. Dabei stehen die Elemente des Systems nicht nur untereinander, sondern auch mit ihrer Umgebung in Beziehung [HDFV19]. Dies wird im Kontext der *Nachhaltigen Produktentstehung* in dieser Arbeit von besonderer Bedeutung sein. Daher sind die wichtigsten Begriffe des Systemgedankens in Abbildung 2-5 dargestellt.

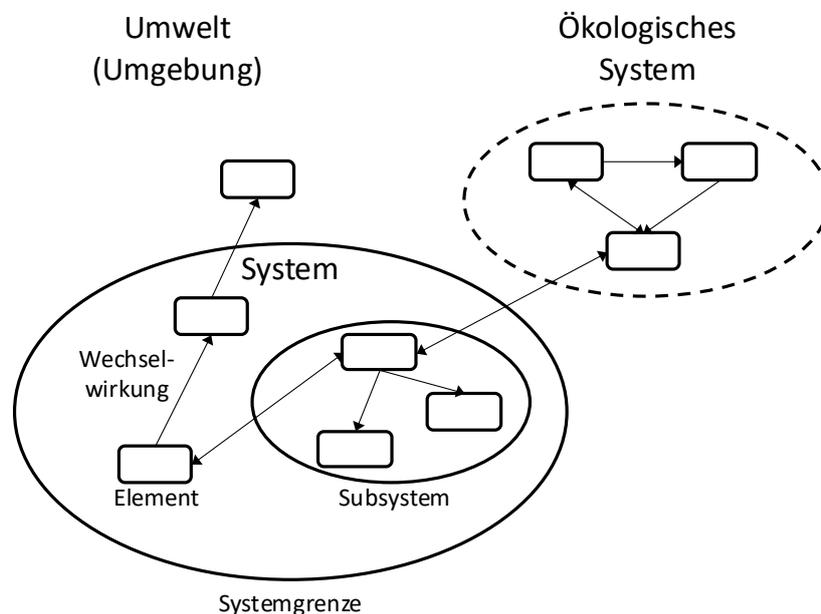


Abbildung 2-5: Grundbegriffe des Systemgedankens in Anlehnung an [HDFV19]

Demzufolge zielt **Systems Engineering** auf die ingenieurtechnische Entstehung solcher Systeme ab. Die ISO 15288 definiert Systems Engineering als „interdisziplinärer Ansatz, der den gesamten technischen und verwaltungstechnischen Aufwand regelt, der erforderlich ist, um eine Reihe von Bedürfnissen, Erwartungen und Randbedingungen der Beteiligten in eine Lösung umzusetzen

und diese Lösung während ihrer gesamten Lebensdauer zu unterstützen“ [Isoi15]. Vergleichbar definiert das International Council on Systems Engineering (INCOSE) den Begriff als „ein transdisziplinärer und integrativer Ansatz, der die erfolgreiche Realisierung, Nutzung und Stilllegung von technischen Systemen unter Verwendung von Systemprinzipien und -konzepten sowie von wissenschaftlichen, technologischen und Managementmethoden ermöglicht“ (frei aus dem Englischen übersetzt [Waln23]). Die Definitionen verdeutlichen, dass das Fachgebiet des Systems Engineering über die Tätigkeit der reinen Produktentwicklung hinausgeht. Um den Lebenszyklus des gesamten Systems abzubilden, werden neben den technischen Prozessen der Produktentwicklung zusätzliche Prozesse beschrieben. Dazu gehören Vereinbarungsprozesse, organisatorische Projektprozesse, wie zum Beispiel Qualitätsmanagement, und technische Managementprozesse [Isoi15]. Wie in Kapitel 1.2.1 beschrieben sind diese in erster Linie organisatorischen Elemente nicht Fokus dieser Arbeit, weswegen die folgenden Erläuterungen sich auf die technischen Prozesse des Systems Engineerings und damit dem Forschungsbereich der Produktentstehung konzentrieren.

Im Laufe der vergangenen Jahrzehnte sind in der Forschung, Lehre und der industriellen Praxis zahlreiche Modelle im Forschungsgebiet der Produktentstehung, respektive Systems Engineering, entstanden [WyCl18, WyEC19]. Zur besseren Übersichtlichkeit werden in diesem Kapitel in erster Linie das Modell nach Pahl/Beitz [BeGe21, FeGr13, PaBe77, PBF07], Ehrlenspiel [EhMe13, Ehr95] und der VDI 2221 [VDI19a] verwendet, um eine möglichst allgemeingültige und dennoch vollständige Grundlage zu bieten. Diese Werke sind stetig aktualisiert worden, um neue technische Möglichkeiten zu integrieren und den sich wandelnden Kontext zu berücksichtigen, auch wenn die grundlegenden Zusammenhänge nicht wesentlich verändert wurden.

### 2.2.1 Problemlösungsprozess

In Anlehnung an Ehrlenspiel kann der PEP auch als **Problemlösungsprozess** betrachtet werden [EhMe13]. Ein **Problem** wird definiert als „Aufgabe oder Fragestellung, deren Lösung nicht offensichtlich ist und auch nicht direkt mit bekannten Mitteln angegeben werden kann“ [VDI19a]. Transferiert auf den PEP ist es also die Aufgabe des Ingenieurs bzw. des Produktentwicklers, Bedürfnisse oder Probleme in der Gesellschaft zu erkennen und Lösungen in Form von Produkten zu schaffen. Insbesondere bei komplexen Problemen läuft dieser Prozess in der Regel nicht linear ab, sondern in iterativen Zyklen. In Abbildung 2-6 ist der Regelungszyklus zwischen Zielen, Aktivitäten und Ergebnissen dargestellt.

Dieser Regelungszyklus ist nicht nur grundlegend für die Problemlösung allgemein und damit den PEP, sondern wird auch ein fundamentaler Bestandteil des in dieser Arbeit vorgestellten Modells sein (Kapitel 5).

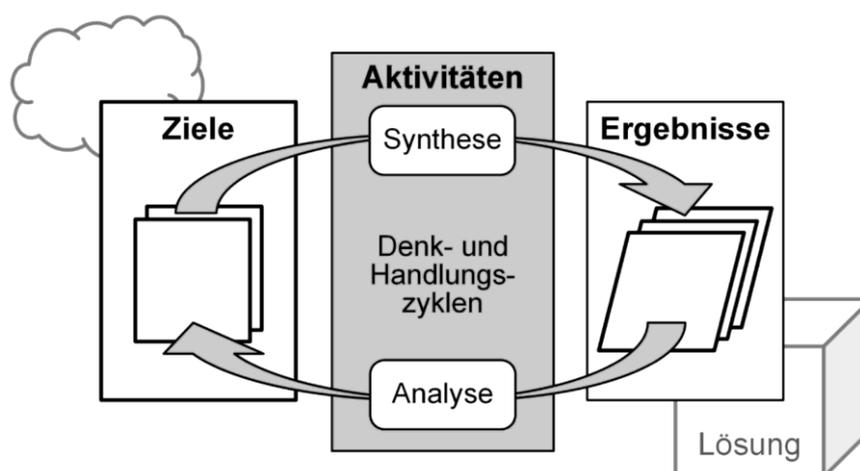


Abbildung 2-6: Regelungszyklus zwischen Zielen, Aktivitäten und Ergebnissen [VDI19a]

Basierend auf den Modellvorstellungen menschlichen Denkens und Handelns beschreibt der Zyklus aus Abbildung 2-6, wie von dem zunächst vagen Problem (Wolke) erste Ziele abgeleitet werden [VDI19a]. Von diesen ausgehend werden durch verschiedene Aktivitäten erste Ergebnisse erzeugt, weswegen diese als Aktivitäten der **Synthese** bezeichnet werden [VDI19a]. Diese Ergebnisse werden durch Aktivitäten der **Analyse** im nächsten Schritt mit den Zielen abgeglichen, wodurch ein fortlaufender Regelzyklus entsteht, der so lange fortgeführt werden kann, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis in Form einer Lösung für das Problem erreicht ist [VDI19a]. Unter **Analyse** wird in dieser Arbeit grundsätzlich die systematische Untersuchung der Eigenschaften eines Objekts durch die Zerlegung in seine Bestandteile zum Zwecke der Informationsgewinnung verstanden (vgl. [DuBi15, PBF07]). Hierfür muss also bereits ein Objekt bzw. System vorhanden sein, das analysiert werden kann. Im Gegensatz dazu zielt die Synthese auf das Generieren bzw. Bilden von neuen Objekten oder Systemen ab. Daher wird **Synthese** für diese Arbeit als Informationsverarbeitung (meist auf Basis einer zuvor durchgeführten Analyse) zur Generierung von Objekten bzw. Ergebnissen durch Kombinieren und Bildung von Verbindungen definiert (vgl. [PBF07]). Beide Verfahren ergänzen sich gegenseitig und wirken im Gesamtprozess alternierend zusammen. Auf diese Weise können auch komplexe Probleme wie eine Produktentstehung durch iteratives Vorgehen und das Einteilen in Zwischenschritte gelöst werden. Auf eine detailliertere Beschreibung des Problemlösungsprozesses wird an dieser Stelle verzichtet und lediglich auf weiterführende Literatur wie [SeSc02, EhMe13] oder [VDI19a] verwiesen.

### 2.2.2 Produktentstehungsmodelle

Viele der derzeit geläufigen Produktentstehungsmodelle basieren auf den Modellen zur Konstruktionslehre, die in den 1960er und 70er Jahren entstanden sind, wie beispielsweise von den Autoren Hansen [Hans65, Hans74], Pahl und Beitz [PaBe77] oder Koller [Koll79, Koll98]. Diese Werke zielten zunächst auf den klassischen Maschinen- und Anlagenbau ab. Der Fokus verallgemeinerte sich anschließend in Richtung der Produktentwicklung, wie in der ersten Auflage der **VDI-Richtlinie 2221** von 1986 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ [VDI86] zu erkennen ist. Sie stellte erstmals ein allgemeingültiges Prozessmodell

zum Entwickeln und Konstruieren bereit [FeGr13]. Ehrlenspiel erweiterte die Sicht auf die Produktentwicklung nochmals grundlegend um Schwerpunkte wie die integrierende Denkweise, die Anwendung von Methoden und die empirische Konstruktionslehre in seinem Werk „**Integrierte Produktentwicklung**“ [Ehr195]. Diese sind auch in der aktuellen Auflage der VDI 2221 [VDI19a] von 2019 verankert.

Hauptziel des PEP und dessen Modelle ist es, systematisch und damit möglichst effizient funktionsfähige und herstellbare Produkte, die einen bestimmten Bedarf am Markt decken oder einen Auftrag erfüllen, entstehen zu lassen (vgl. [VDI19a]). Da diese Prozesse immer individuell und vielfältig sind, müssen die Modelle allgemeingültig anwendbar sein. Laut [GaLS12] ist eines der wichtigsten Unterscheidungsmerkmale zwischen den Modellen, deren Fokus entweder auf die gesamte Produktentstehung oder auf die reine Produktentwicklung ohne die Produktplanung und Herstellung (siehe oben und Abbildung 2-4) zu legen. Da die beiden Begriffe Produktentstehung und Produktentwicklung in den zu Grunde liegenden Werken und deren verschiedenen Auflagen oftmals bedeutungsgleich verwendet werden, wird im Folgenden zur Vereinfachung der umfassendere Begriff der Produktentstehung verwendet.

Den Modellen ist gemein, dass sie einen strukturierten Ablauf darstellen, der den PEP in verschiedene Phasen gliedert. Diese können unterschiedlich benannt und auch unterschiedlich detailliert sein, also in einer größeren Anzahl vorhanden sein. Die klassischen **vier Hauptphasen nach Pahl und Beitz** [PaBe77, PBFG07, BeGe21] lauten:

- Planen und Klären der Aufgabe
- Konzipieren
- Entwerfen
- Ausarbeiten

Mit dem Ziel näher am Prozess orientiert zu sein, sind diese in der VDI 2221 durch spezifische Aktivitäten näher präzisiert, wie in Abbildung 2-7 dargestellt. Hier sind die vier Hauptphasen nach Pahl und Beitz und das Modell aus der VDI 2221 gemeinsam visualisiert. Die Entwicklungstätigkeit wird im Vorgehensmodell in logische Phasen (rechts) gegliedert, die sich jeweils durch **Ziele, Aktivitäten und Ergebnissen** (links) unterscheiden. Hier ist der Regelungszyklus aus Abbildung 2-6 wiederzufinden. Wie dort bereits beschrieben, werden ausgehend von Zielen durch Syntheseaktivitäten erste Ergebnisse erzielt, die im Anschluss mittels Analyseaktivitäten durch Abgleich mit den Ergebnissen abgesichert werden. Unterstützt werden kann dieser Prozess durch verschiedene **Methoden**, die als „planmäßiges Vorgehen in einer Abfolge von Tätigkeiten zum Erreichen eines bestimmten Ziels“ [EhMe13, VDI19a] definiert sind. Je nach Phase im PEP und abhängig von der jeweiligen Entwicklungsaufgabe gibt es eine Vielzahl von Methoden, die für spezifische Entwicklungsziele als eine Art Werkzeug im PEP eingesetzt werden können (siehe auch Kapitel 3.2 und 3.3).

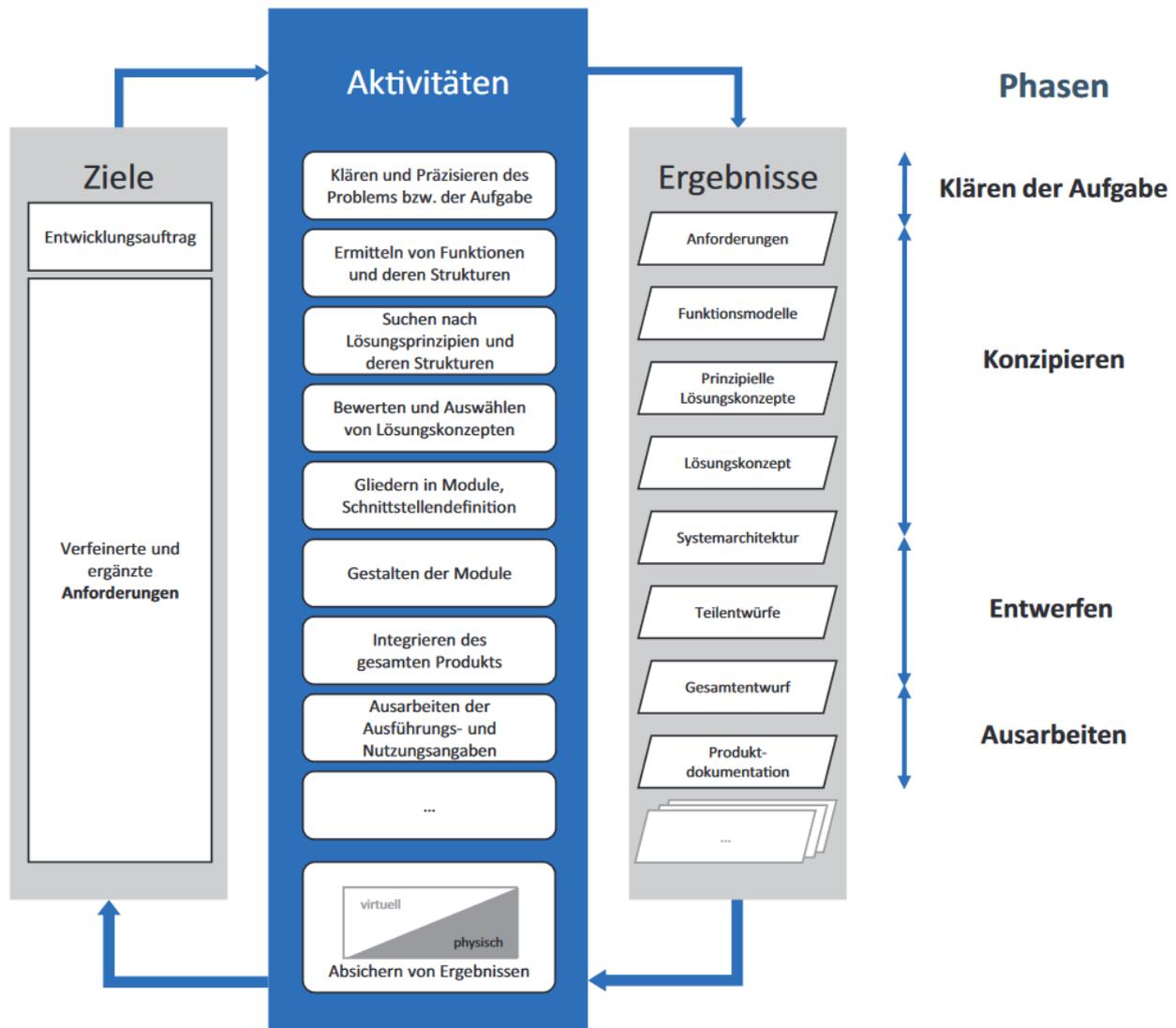


Abbildung 2-7: Allgemeines Vorgehensmodell der Produktentwicklung aus [BeGe21]

Die erste Phase „**Planen und Klären der Aufgabe**“ dient dazu, das Ziel der Produktentstehung genauer zu verstehen und zu präzisieren. Dabei kann zu Beginn ein Problem, das durch ein Produkt gelöst werden soll, oder bereits eine konkrete Aufgabe, beispielsweise in Form eines Entwicklungsauftrags, vorliegen. In beiden Fällen sollen durch die ersten Aktivitäten der Ausgangspunkt kontinuierlich detailliert und entsprechende Anforderungen für die weitere Entwicklung als erstes Zwischenergebnis abgeleitet werden.

Darauf folgt die zweite Phase „**Konzipieren**“, in der zunächst die notwendigen Funktionen und deren Strukturen ermittelt werden, um im Anschluss potenzielle Lösungsprinzipien zu suchen. Die so generierte Auswahl an möglichen Lösungsprinzipien wird durch die folgende Aktivität bewertet, woraufhin geeignete Lösungsprinzipien ausgewählt werden. Diese ergeben das sogenannte Lösungskonzept, welches nun in einzelne Module gegliedert wird. Zwischen den Modulen werden die erforderlichen Schnittstellen definiert, wodurch die Konzeptphase als abgeschlossen gilt.

In der Phase „**Entwerfen**“ werden die festgelegten Module in der Regel separat gestaltet und anschließend zum gesamten Produkt integriert. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass die

einzelnen Module zusammenpassen und das Gesamtprodukt die gewünschten Funktionen erfüllt.

In der finalen Phase „**Ausarbeiten**“ wird der erstellte Gesamtentwurf sukzessive bis zum endgültigen Produkt und dessen erforderlichen Dokumenten konkretisiert. Darunter fallen unter anderem auch Aktivitäten zur Ausarbeitung, die zur fertigungstechnischen Umsetzung und zum späteren Gebrauch des Produkts nötig sind.

Abschließend ist zu betonen, dass diese Phasen und ebenso die Aktivitäten in der Realität nicht strikt nacheinander umgesetzt werden, auch wenn sie oft, wie in Abbildung 2-7, sequenziell dargestellt sind. Im realen PEP werden diese meist „iterativ sowie (teil-)parallelisiert durchlaufen“ [VDI19a]. Hierdurch erfolgt eine kontinuierliche Konkretisierung, bei der auch Anpassungen in vorherigen Phasen umgesetzt werden können, wenn solche durch den Regelungszyklus angesichts neuer Erkenntnisse in einer späteren Phase notwendig werden. Auch wenn in der Forschung und Industrie noch zahlreiche weitere relevante Modelle des PEP (wie beispielsweise [VDI21, Waln23, ARBR16, LeLL18]) vorhanden sind, sollen diese grundlegenden Modelle ausreichen, um im folgenden Kapitel näher auf die relevanten Grundlagen im Bereich der Entstehung nachhaltiger Produkte einzugehen.

### 2.3 Grundlagen im Themengebiet Nachhaltige Produktentstehung

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Begrifflichkeiten und Grundsätze der *Nachhaltigen Produktentstehung* als Zusammenführung der einzelnen Themengebiete aus Kapitel 2.1 und 2.2 erläutert, während die historische Entstehung und Entwicklung des Fachgebiets separat in Kapitel 3.1 dargelegt werden.

Grundsätzlich unterscheidet diese Arbeit die **Art der Aktivitäten** in der *Nachhaltigen Produktentstehung* in Anlehnung an Abbildung 2-6 in Analyse- und Syntheseaktivitäten. Dabei zielen die Analyseaktivitäten darauf ab, die Nachhaltigkeit von Produkten und Systemen messen und bewerten zu können (Kapitel 3.2.1). Syntheseaktivitäten hingegen dienen dazu, möglichst nachhaltige Produkte und Systeme im PEP zu entwickeln (Kapitel 3.3.1). Bei der Umsetzung der Aktivitäten kann jeweils ein unterschiedlicher **Nachhaltigkeitsfokus** gewählt werden. Auch wenn im Sinne der Nachhaltigkeit grundsätzlich eine ganzheitliche Vorgehensweise zu bevorzugen ist, kann der Fokus auch teilweise nur auf einer oder zwei der drei Dimensionen oder beispielsweise partiell auf der Kreislaufwirtschaft liegen. Innerhalb der Dimensionen zielt die vollständige **Wirkungsbetrachtung** darauf ab, alle Wechselwirkungen mit Bezug zur Nachhaltigkeit zu studieren. Die Vielfältigkeit der Wirkungen wird in Kapitel 3.2 im Rahmen der Analysemethoden deutlich werden. Ein zentraler Grundsatz im Bereich der *Nachhaltigen Produktentstehung* ist das sogenannte **Lebenszyklusdenken** (englisch: life cycle thinking) oder die **Lebenswegbetrachtung**. Unter dem **Lebensweg** (englisch: life cycle) bzw. **Lebenszyklus** oder **Produktlebenszyklus** werden die aufeinander folgenden und miteinander verbundenen Stufen „von der Rohstoffgewinnung und -erzeugung über die Energieerzeugung und Materialherstellung bis zur Anwendung, Abfallbehandlung und endgültigen Beseitigung“ [DIN21a] eines Produkts oder Systems verstanden.

Um die Nachhaltigkeitsaspekte vollständig zu berücksichtigen und eine Verlagerung der Auswirkungen in eine andere Lebenszyklusphase zu vermeiden, sollte stets der gesamte Produktlebenszyklus (vergleiche Abbildung 2-4) eingeschlossen werden [Mazz20]. Dies ist das Ziel der vollständigen Lebenswegbetrachtung. Eng damit verbunden ist auch der Begriff des Life Cycle Engineering, der in Kapitel 3.3.6 weiter beschrieben wird. Außerdem gilt die **Systembetrachtung** oder das **Systemdenken** (englisch: systems thinking) als weiterer Grundsatz der *Nachhaltigen Produktentstehung*. Onat et al. definieren systems thinking als „die Fähigkeit, die Teile größerer Mechanismen zu sehen, Muster und Zusammenhänge zu erkennen und diese Zusammenhänge auf effektivere und effizientere Weise umzustrukturieren“ (frei aus dem Englischen übersetzt [OKHC17]). Insbesondere bei komplexen technischen Produkten kann der Produktlebenszyklus aus mehreren Lebenszyklen der einzelnen Komponenten bestehen. Dahingehend können noch zahlreiche weitere Systeme wie Infrastruktur oder Energieversorgung eng mit dem Produkt und damit den Nachhaltigkeitsaspekten verbunden sein. Die *Nachhaltige Produktentstehung* sollte durch eine umfassende Systembetrachtung sowohl direkte als auch indirekte Wechselwirkungen durch verbundene Systeme entlang der notwendigen Wertschöpfungskette in Betracht ziehen. Dazu zählen auch das Geschäftsmodell des Produktes, die verbundenen Stakeholder und die notwendigen Subsysteme.

Werden die beschriebenen Grundsätze befolgt, erweitert sich der Begriff des Produkts zum **Produktsystem**, das in Abbildung 2-8 rechts modelliert ist und bereits in Kapitel 2.2 definiert wurde. Über das eigentliche Produkt hinaus beschreibt das Produktsystem den kompletten Produktlebenszyklus mit den einzelnen Phasen, das Geschäftsmodell oder mehrere Geschäftsmodelle und alle weiteren Systeme, die mit dem Produkt verbunden sind. Das Produktsystem kann als Ergebnis der Produktentstehung bzw. des PEP betrachtet werden (Abbildung 2-8) und stellt die umfassende Systemgrenze mit allen relevanten Elementen, Prozessen und Phasen zur ganzheitlichen Betrachtung der Nachhaltigkeitsaspekte mit allen entsprechenden Wirkungen dar.

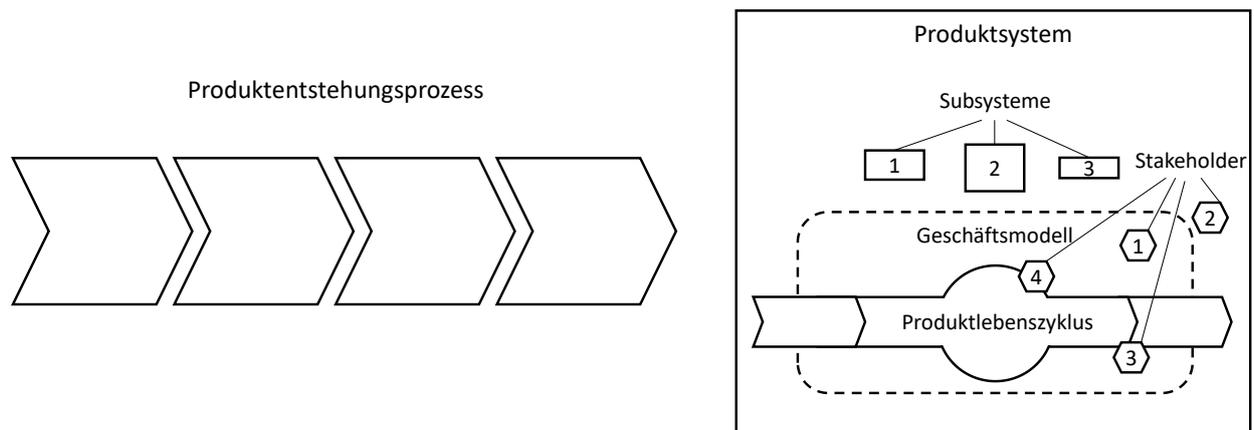


Abbildung 2-8: Das Produktsystem als Ergebnis des Produktentstehungsprozess

### 2.3.1 Nachhaltigkeitsstrategien

Die *Nachhaltige Produktentstehung* zielt darauf ab den Entwicklungsprozess so auszurichten, dass ein möglichst nachhaltiges Produktsystem entsteht. Über die Aktivitäten und einzelnen Methoden, die in Kapitel 3 erläutert werden, bestehen übergreifende **Nachhaltigkeitsstrategien**, die zur strategischen Umsetzung der *Nachhaltigen Produktentstehung* dienen können und auch in anderen Fachgebieten oder auf politischer Ebene angewendet werden. Diese Strategien werden im Folgenden beschrieben und voneinander abgegrenzt.

Huber unterscheidet drei grundlegende Ansätze für „Nachhaltige Entwicklung durch Suffizienz, Effizienz und Konsistenz“ [HFBL95]. Historisch betrachtet wurden diese in erster Linie zur Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit genutzt und können nach Lüdeke-Freund auch als Transformationsstrategien für diese Verbesserung bezeichnet werden [Lüde10]. Die Umsetzung der ökologisch orientierten Strategien unterliegen Wechselwirkungen mit den anderen beiden Nachhaltigkeitsdimensionen, wie beispielsweise der sozialen Anschlussfähigkeit oder der ökonomischen Tragfähigkeit.

Die erste Strategie der **Suffizienz** zielt nicht direkt auf die technische Gestaltung von Produkten oder Systemen ab, sondern „richtet sich auf einen geringeren Verbrauch von Ressourcen durch eine Verringerung der Nachfrage nach Gütern“ [Linz04]. Sie bezweckt also eine Veränderung der bestehenden Konsummuster hin zur Befriedigung grundlegender Bedürfnisse, anstatt zur Förderung übermäßigen Konsums [KöVi24]. Heyen et al. beschreiben mit Suffizienz „Änderungen in Konsummustern, die helfen, innerhalb der ökologischen Tragfähigkeit der Erde zu bleiben, wobei sich Nutzenaspekte des Konsums ändern“ [HFBB13], weswegen in manchen Werken auch von Öko-Suffizienz gesprochen wird [BeGK18, Linz04]. Vereinfacht soll Suffizienz also zur nachhaltigen Entwicklung beitragen, indem „weniger“ gebraucht, genutzt bzw. konsumiert wird [LiBB15, ScTi95].

Im Allgemeinen kann **Effizienz** als „Verbesserung des Input-Output-Verhältnisses“ beschrieben werden [BeGK18]. In Bezug zur ökologischen Nachhaltigkeit von Produkten wird die Strategie häufig auch als **Öko-Effizienz** (englisch: eco-efficiency) bezeichnet und beschreibt nach DIN EN ISO 14045 einen „Aspekt der Nachhaltigkeit, wobei die Umweltleistung eines Produktsystems mit dem zugehörigen Produktsystemnutzen in Beziehung gesetzt wird“ [DIN12]. Hauschild [Haus15] beschreibt diese Beziehung als das Verhältnis zwischen dem durch das Produktsystem geschaffenen Wert oder der erfüllten Funktion (Produktsystemnutzen) und den Kosten in Form des Ressourcenverbrauchs oder der verursachten (Umwelt-)Auswirkungen. Mittels der Effizienzstrategie soll dieses Verhältnis verbessert werden. Dies kann zum einen durch einen geringeren Ressourceneinsatz oder geringere Auswirkungen auf die Umwelt bei gleichem Produktsystemnutzen, zum anderen durch eine Vergrößerung des Produktsystemnutzens bei gleichem Ressourceneinsatz bzw. gleichen Auswirkungen erreicht werden. Daraus leiten sich auch beispielsweise spezialisiertere Strategien zur Verbesserung der „Ressourceneffizienz“ [VDI16] oder der „Energieeffizienz“ [Pehn10] ab. Zusammenfassend kann die Strategie der Effizienz mit dem Wort „besser“ [LiBB15, ScTi95] beschrieben werden.

Die dritte Nachhaltigkeitsstrategie wird **Konsistenz** oder oftmals auch **Öko-Effektivität** genannt [BeGK18]. Sie steht „für naturverträgliche Technologien, welche die Stoffe und die Leistungen der Ökosysteme nutzen, ohne sie zu zerstören“ [Linz04, Step22]. Durch den Schwerpunkt auf neue technologische Paradigmen sollen Technik und Industrie in Einklang mit den natürlichen Prinzipien und Prozessen gebracht werden [Lüde10]. Durch Konsistenz sollen Produkte und Systeme „anders“ gestaltet werden [LiBB15, ScTi95], um die Vereinbarkeit von natürlichen und technischen Systemen zu erreichen. In Abgrenzung zur Suffizienz ist nicht ein geringerer Konsum, sondern ein naturverträglicher Konsum das Ziel [Step22]. Diese Strategie wird häufig mit dem Konzept der Kreislaufwirtschaft [Step22] (siehe Kapitel 2.1.5) und dem später in Kapitel 3.3.5 erläuterten „Cradle-to-Cradle Prinzip“ [BrMB07, McBr02] in Verbindung gesetzt, worin eine klare Unterscheidung zur Effizienz beschrieben wird.

Während Öko-Effizienz darauf abzielt, die negativen Auswirkungen von Systemen durch Effizienzmaßnahmen zu reduzieren, geht Öko-Effektivität oder Konsistenz nach den Autoren Braungart und McDonough einen Schritt weiter [BrMB07, McBr02]: Systeme und Produkte sollen so gestaltet werden, dass sie keine negativen, sondern sogar positive Auswirkungen auf Menschen und Umwelt haben. Das Ziel ist, nicht nur weniger schlecht, sondern wirklich gut zu sein. Diese Unterscheidung wird in Abbildung 2-9 verdeutlicht, die zeigt, dass rein auf Effizienz ausgerichtete Ansätze kein regeneratives und nachhaltiges System schaffen können. Öko-Effizienz reduziert oder vermeidet lediglich negative Folgen, während Öko-Effektivität darauf abzielt, positive Beiträge zu leisten. Der Grundgedanke der Öko-Effektivität wird in dieser Arbeit noch eine grundlegende Rolle spielen (Kapitel 3.4.1). [BrMB07, McBr02]

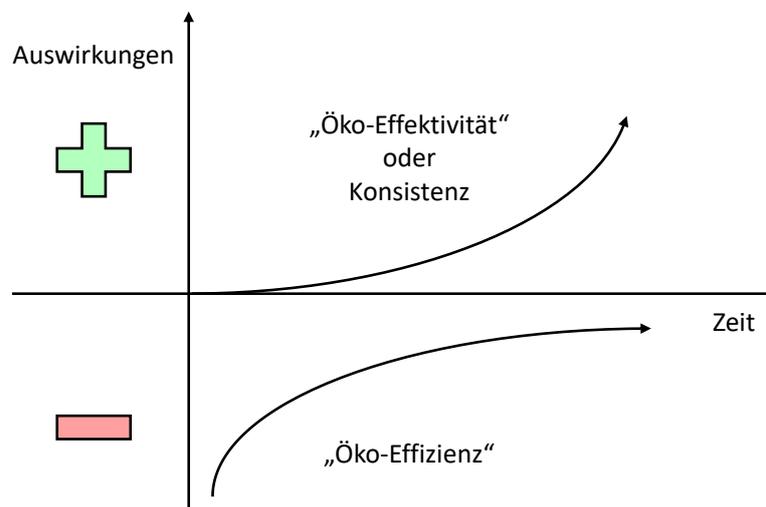


Abbildung 2-9: Öko-Effektivität und Öko-Effizienz in Anlehnung an [Epea24]

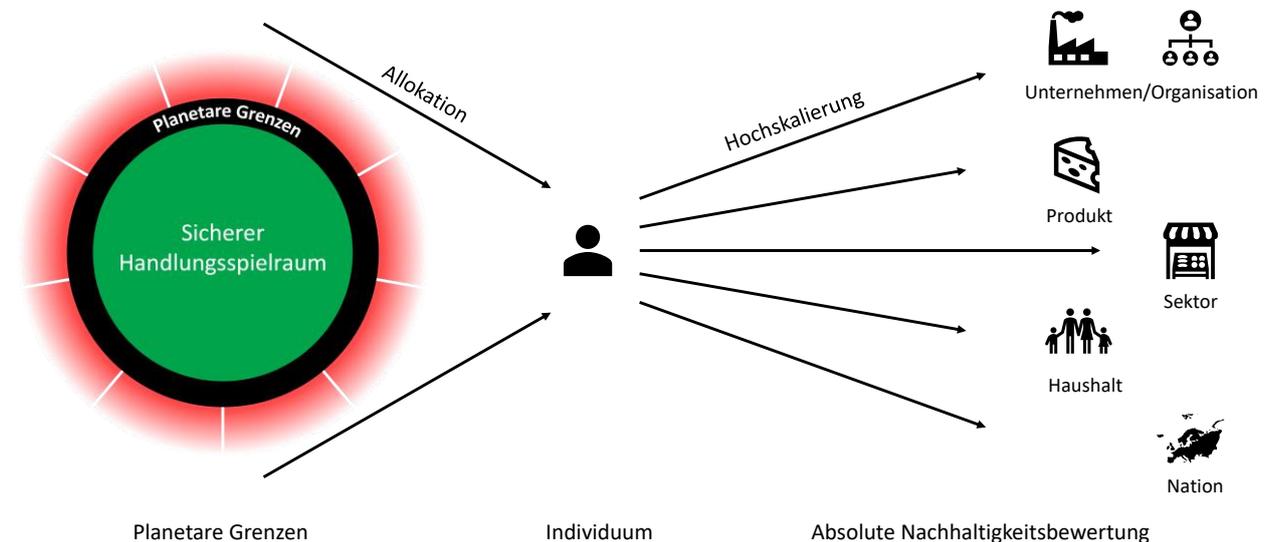
### 2.3.2 Absolute Nachhaltigkeit

Auch Hauschild kritisiert die Strategie der Öko-Effizienz, die trotz immenser Effizienzsteigerungen in einzelnen Technologien nicht die entgegenwirkenden Trends in der Zunahme der Bevölkerung, des Wohlstands und des Konsums bisher kompensieren kann [Haus15]. Er betont die Notwendigkeit einer absoluten Perspektive, um Entwicklungen effektiv in Richtung einer nachhaltigen

Produktion und eines nachhaltigen Konsums zu lenken [Haus15]. Diese wird durch die sogenannte IPAT-Gleichung repräsentiert, die die Abhängigkeit der Umweltauswirkungen (I) von den drei Faktoren der menschlichen Bevölkerung (P), des menschlichen Wohlstands (A – entspricht dem pro Kopf geschaffenen oder verbrauchten Wert) und des Technologie-Faktors (T – entspricht der Umweltbelastung pro geschaffenen Wert) beschreibt [Comm72, EhHo71, Haus15]:

$$I = P \times A \times T$$

Mit steigender Weltbevölkerung (P) und zunehmenden Wohlstand (A), müsste die Umweltbelastung pro geschaffenen Wert (T) entsprechend drastisch abnehmen, um das Niveau der Umweltauswirkungen lediglich konstant zu halten [Haus15]. Maßnahmen der Suffizienz könnten dazu beitragen den pro Kopf geschaffenen oder verbrauchten Wert (A) zusätzlich zu reduzieren [HaKR20]. Hauschild argumentiert weiter, dass es durch sogenannte Rebound- oder Backfire-Effekte, wie von Hertwich [Hert05] beschrieben, dazu kommen kann, dass durch die Effizienzsteigerungen der Konsum steigt und somit die Umweltauswirkungen absolut gesehen sogar zunehmen [Haus15]. Er fordert daher in dem Konzept der „**Absoluten Nachhaltigkeit**“ (englisch: absolute sustainability) [HaKR20, Haus15] die Einhaltung der neun planetaren Grenzen, die von Rockström et al. [RSNP09a, RSNP09b] und Steffen et al. [SRRC15] beschrieben werden (Abbildung 1-1). Die Grenzen umfassen Klimawandel, Verlust der Biodiversität, Flächenumwandlung, Süßwasserverknappung, Stickstoff- und Phosphorbelastung, Versauerung der Meere, chemische Umweltverschmutzung, Luftverschmutzung und den Rückgang der Ozonschicht [SRRC15]. Sie sind links in Abbildung 2-10 mit den Grenzen der Tragfähigkeit symbolisiert, wobei mittlerweile mehrere dieser Grenzen bereits als überschritten gelten [RSLB23].



**Abbildung 2-10: Verteilung des Handlungsspielraums der planetaren Grenzen im Konzept der absoluten Nachhaltigkeit (Eigene Darstellung nach [Geb122, HLAO21, Rawo18, SRRC15])**

Im Sinne des Vorrangmodells (Abbildung 2-1) und den „Handlungsregeln für eine nachhaltige Entwicklung“ [Hauf21, Klei09] (Abbildung 2-2) sollen diese Grenzen durch gesellschaftliche und wirtschaftliche Aktivitäten nicht überschritten werden, sondern innerhalb des sicheren

Handlungsspielraums (englisch: safe operating space) stattfinden. Im Konzept der absoluten Nachhaltigkeit wird dieser ökologische Handlungsspielraum in einem zweistufigen Prozess (Abbildung 2-10) auf einzelne Individuen verteilt und kann im Anschluss auf eine höhere Ebene wie eine Organisation, ein Produkt, eine Dienstleistung, ein Haushalt oder eine Nation übertragen werden [HaKR20, HLAO21]. Somit entstehen für ein Produkt absolute ökologische Grenzen, welche mit den analysierten ökologischen Auswirkungen des Produkts (siehe Kapitel 3.2) verglichen werden können. Folglich entsteht die Möglichkeit einzuschätzen, ob dieses Produkt absolut gesehen (ökologisch) nachhaltig ist, statt nur relative Verbesserungen einzelner Auswirkungen zu beschreiben.



### 3 Stand der Forschung

Nachdem im vorherigen Kapitel die wichtigsten Begrifflichkeiten und Grundlagen aus den Bereichen Nachhaltigkeit und Produktentstehung sowie deren Fusion im Fachgebiet der *Nachhaltigen Produktentstehung* behandelt wurden, wird nun im Stand der Forschung näher auf den aktuellen Kontext dieses Fachgebiets eingegangen. Auf Basis dieses Forschungsstands und identifizierter Defizite darin kann später ein Handlungsbedarf (Kapitel 4) für diese Arbeit abgeleitet werden. Dieses Kapitel unterteilt sich in mehrere Unterkapitel, wobei zunächst beleuchtet wird, wie Nachhaltigkeit historisch betrachten Einzug in die Produktentstehung gefunden hat (Kapitel 3.1). Dabei werden die verschiedenen Konzepte klassifiziert und deren wichtigste Grundprinzipien vorgestellt. Aufbauend darauf folgt eine Übersicht der gängigsten Methoden, separiert in Analyse- und Synthesemethoden (Kapitel 3.2 und 3.3), welche auch im später vorgestellten Modell genutzt werden. Ein weiteres Kapitel 3.4 behandelt gesondert die für diese Arbeit zentralen positiven Nachhaltigkeitswirkungen. Zur Unterscheidung der beiden grundlegenden Methodenarten der *Nachhaltigen Produktentstehung* werden in Tabelle 3-1 die jeweiligen Eigenschaften verglichen.

**Tabelle 3-1: Unterscheidung von Analyse- und Synthesemethoden in der Nachhaltigen Produktentstehung**

	Analysemethoden	Synthesemethoden
Ziel	Untersuchung und Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten eines Produkts	Entwicklung von nachhaltigen Lösungen für ein Produkt
Anwendung	Vorwiegend retrospektiv auf bestehende Produkte	Vorwiegend in den frühen Phasen des PEP
Beispiel	Ökobilanz (Life Cycle Assessment)	Ecodesign

Da insbesondere in jüngster Zeit sehr viele neue Ansätze und Methoden veröffentlicht wurden und das Fachgebiet keinesfalls als vollständig erforscht bezeichnet werden kann, ist das Ziel nicht die vollständige Beschreibung all dieser Ansätze. Anstelle dessen wird ein strukturierter Überblick über die für diese Arbeit relevantesten Vorgehensweisen gegeben.

#### 3.1 Historische Entwicklung der Nachhaltigen Produktentstehung

Der aktuelle Stand der Forschung im Bereich der *Nachhaltigen Produktentstehung* referenziert sich aus Quellen verschiedener Fachbereiche und Entwicklungen. Um einen historischen Überblick über die für diese Arbeit wichtigsten Ausgangspunkte zu geben, ist in Abbildung 3-1, Abbildung 3-2, Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 eine Auflistung dargestellt, die einen Ausschnitt der zeitgeschichtlichen Entwicklung von 1960 bis 2025 repräsentiert. Sie unterscheidet in den Spalten zum einen gesellschaftliche und politische Meilensteine auf internationaler Ebene und speziell in der Bundesrepublik Deutschland (BRD), die für den Einzug der Nachhaltigkeit in die Prozesse der Produktentstehung relevant waren. Zum anderen werden bedeutende Publikationen und Ereignisse im Bereich der Analyse- und Synthesemethoden nach ihrem Veröffentlichungsjahr geordnet aufgelistet.

Gesellschaftliche und politische Meilensteine (International)	Gesellschaftliche und politische Meilensteine (BRD)	Literatur und Methoden im Bereich Analyse	Literatur und Methoden im Bereich Synthese
---	---	---	--

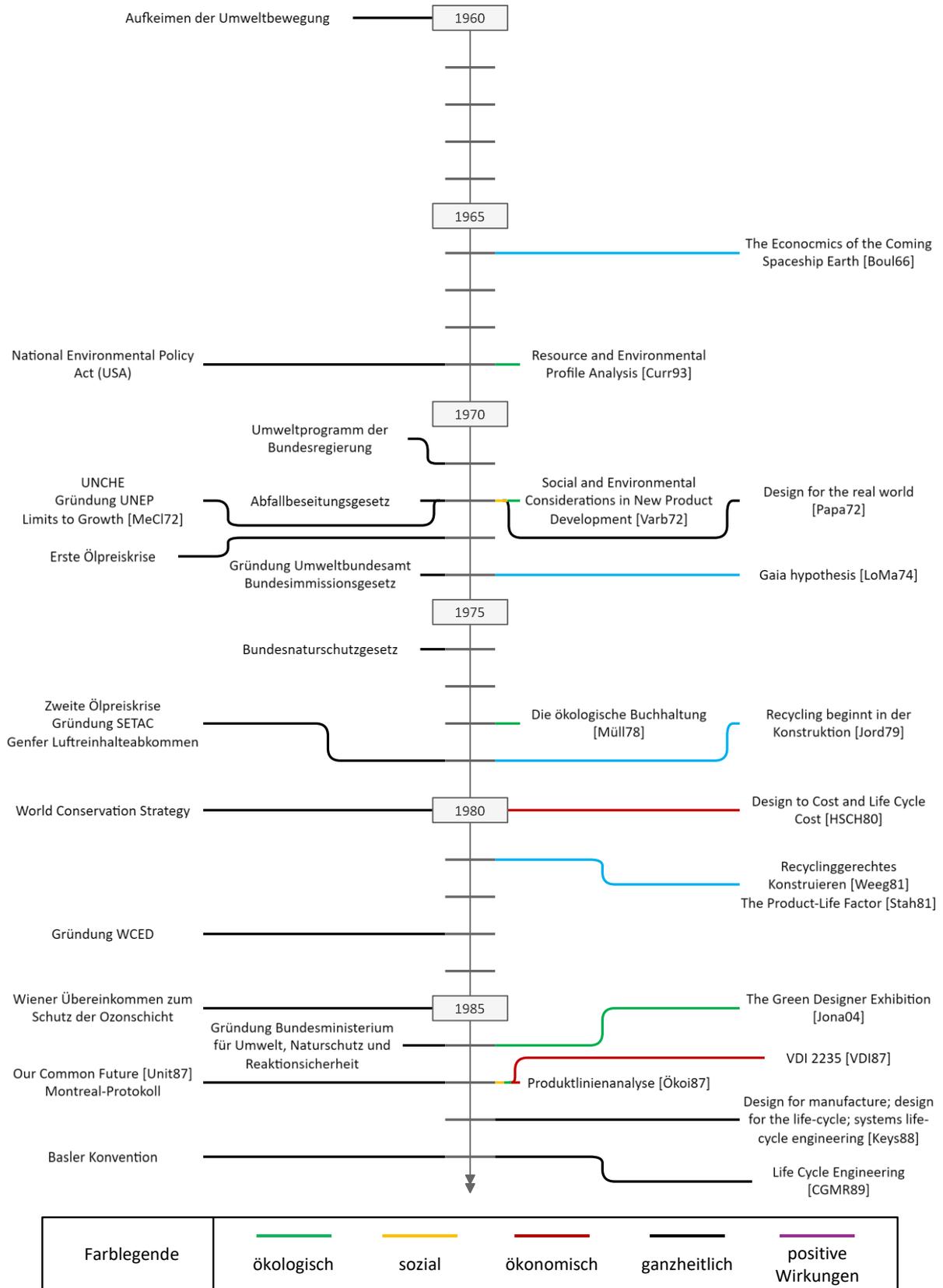


Abbildung 3-1: Historische Entwicklung der Nachhaltigen Produktentstehung 1960-1989

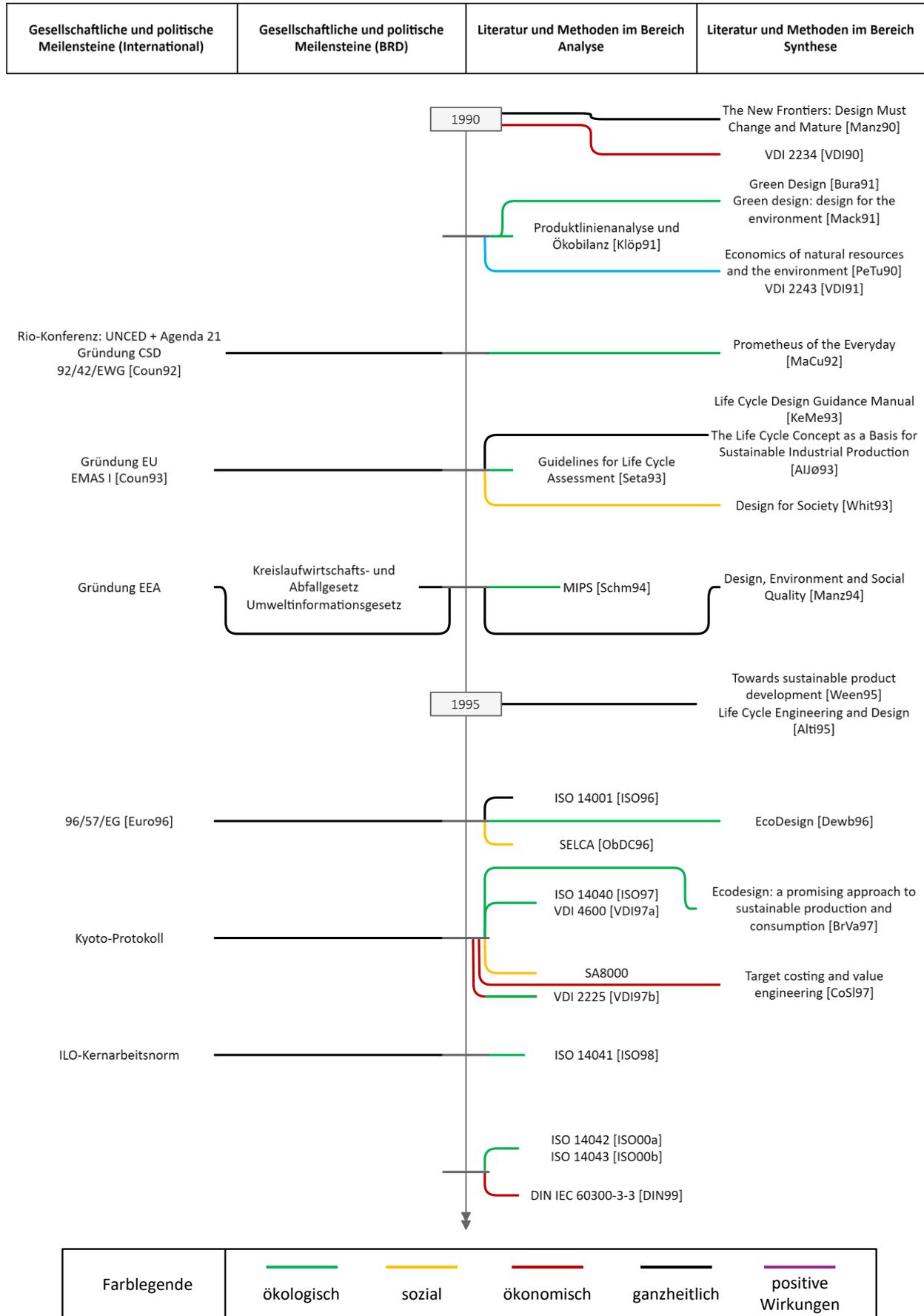


Abbildung 3-2: Historische Entwicklung der Nachhaltigen Produktentstehung 1990-1999

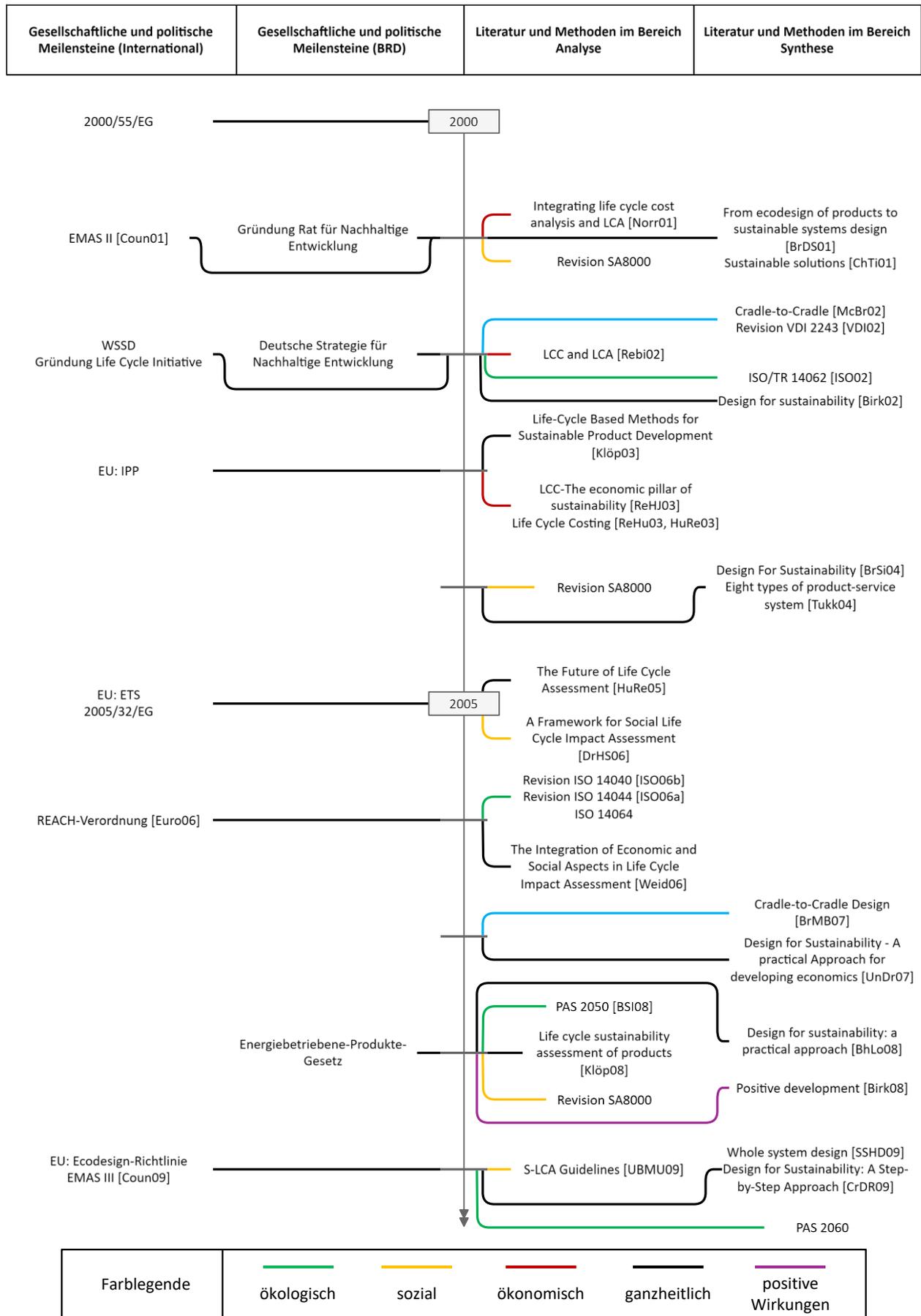


Abbildung 3-3: Historische Entwicklung der Nachhaltigen Produktentstehung 2000-2009

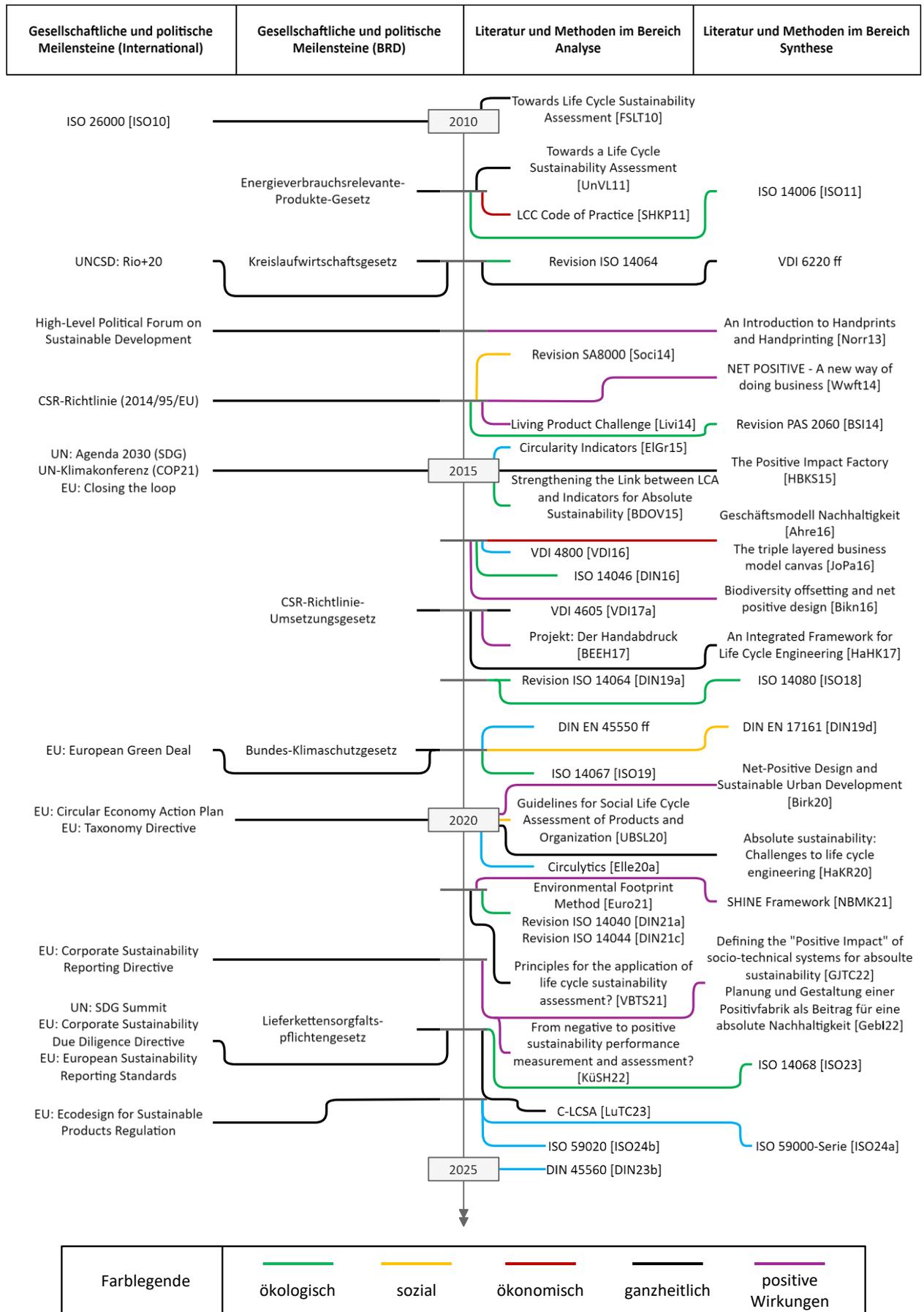


Abbildung 3-4: Historische Entwicklung der Nachhaltigen Produktentstehung 2010-2025

Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass dabei die Einordnung in die Methodenarten nicht immer trennscharf erfolgt. Ebenso wird die Zuordnung zu den vier gewählten Zeitabschnitten 1960-1989 (Kapitel 3.1.1), 1990-1999 (Kapitel 3.1.2), 2000-2009 (Kapitel 3.1.3) und 2010-heute (Kapitel 3.1.4) zum besseren Verständnis der thematischen Zusammenhänge nicht immer strikt eingehalten. Ziel ist es, eine nachvollziehbare Reflexion der historischen Entwicklung der relevantesten Publikationen für die folgenden Kapitel der Arbeit zu geben und zu zeigen, aus wie vielen Ansätzen verschiedener Herkunft der heutige Stand evolviert ist. Die gesellschaftlichen und politischen Ereignisse gelten als allgemein bekannte Tatsachen und werden daher nicht mit Quellen belegt. Außerdem werden spezifische Publikationen im Bereich der ökologischen Nachhaltigkeit (grün), der sozialen Nachhaltigkeit (gelb), der ökonomischen Nachhaltigkeit (rot) und der Kreislaufwirtschaft (blau) farblich anhand der Verbindungslinien unterschieden. Beiträge mit Bezug zu positiven Nachhaltigkeitswirkungen sind lila hervorgehoben. Werden mit einer Publikation ganzheitlich die Dimensionen der Nachhaltigkeit angesprochen, sind die Verbindungslinien schwarz dargestellt. Auch hier kann es zu Überschneidungen oder nicht eindeutigen Zuordnungen kommen. Im Folgenden sollen die Abbildungen näher erläutert werden.

Da die historische Entwicklung für das Verständnis des Modells dieser Arbeit nicht zwangsläufig notwendig ist und die grundlegenden Methoden in Kapitel 3.2, 3.3 und 3.4 separat vorgestellt werden, ist es an dieser Stelle auch möglich, direkt zu Kapitel 3.1.5 überzugehen, wo die wichtigsten Schlussfolgerungen des historischen Überblicks zusammengefasst sind.

### 3.1.1 Historische Entwicklung von 1960 bis 1989

Die Auflistung der historischen Entwicklung in Abbildung 3-1 beginnt im Jahr 1960, welches sowohl national als auch international gesehen für das **Aufkeimen der Umweltbewegung** steht, die sich über die folgenden beiden Jahrzehnte stetig weiterentwickeln sollte. Diese Phase fiel mit der sogenannten „Großen Beschleunigung“ [KAPS17] zusammen, einem Zeitraum, in dem sich viele gesellschaftliche, wirtschaftliche und ökologische Prozesse dramatisch beschleunigten. Während dieser Beschleunigung erlebte die Industrie eine rasante Expansion, insbesondere durch die Massenproduktion von Konsumgütern. Diese Entwicklungen führten zu einem deutlichen Anstieg des Ressourcenverbrauchs und der Umweltbelastungen. In Reaktion auf diese Veränderungen entwickelte sich ein gesteigertes Umweltbewusstsein und der damit verbundene Wunsch nach mehr Schutz für die Umwelt. Von den zivilgesellschaftlichen Forderungen und vielfältigen ökologischen Krisen ausgehend wurden auch erste politische Maßnahmen getroffen, wie der „**National Environmental Policy Act**“ in den USA 1969, das erste „**Umweltprogramm der Bundesregierung**“ 1971 oder das „**Abfallbeseitigungsgesetz**“ 1972. Parallel dazu entstanden bereits erste wissenschaftlich orientierte Ansätze und Veröffentlichungen. In „**The Economics of the Coming Space-ship Earth**“ [Boul66] prägte Kenneth E. Boulding den Begriff des "Raumschiff Erde", um die begrenzten Ressourcen unseres Planeten und die Notwendigkeit einer nachhaltigen Wirtschaftsweise zu betonen, weswegen das Werk als ein grundlegender Beitrag zur Entwicklung der Kreislaufwirtschaft beschrieben wird. Durch die ersten Gesetzgebungen wurden auch produzierende

Unternehmen motiviert ihre Umweltauswirkungen näher zu betrachten. So gilt die „**Resource and Environmental Profile Analysis (REPA)**“, die Forscher des Midwest Research Institute in Kansas City (Missouri) für die Coco-Cola Company im Jahr 1969 durchgeführt haben, als eine der ersten ökologischen Analysen von Produkten [Curr93, HuFH96]. Das Jahr 1972 beinhaltet insbesondere auf internationaler Ebene bedeutsame Ereignisse. Neben der Gründung des „**United Nations Environmental Programm**“ (UNEP) bei der „**United Nations Conference on the Human Environment**“ (UNCHE) in Stockholm wurde auch der Bericht des **Club of Rome „Limits to Growth“** [MeCl72] veröffentlicht. In diesem häufig zitierten Werk veröffentlichten die Autoren unter anderem Ergebnisse aus dem kybernetischen Computersimulationsmodell „World3“. Dieses sollte das langfristige Verhalten von Systemen modellieren, die Umweltressourcen nutzen und beeinflussen. Die Ergebnisse legten nahe, dass es Grenzen für das Wachstum geben und dass die Menschheit eine nachhaltige Entwicklung anstreben muss, die die Begrenzungen der Erde berücksichtigt. Auch wenn dieses Modell nicht ohne Kritik blieb [CoJF73], zählt es als eine der wichtigsten Beiträge zur Diskussion über die Zukunft der Menschheit und des Planeten. Zur gleichen Zeit argumentiert Varble in „**Social and Environmental Considerations in New Product Development**“ [Varb72], dass traditionelle Analyse- und Bewertungsverfahren für neue Produkte angepasst werden sollten, um soziale und ökologische Aspekte angemessen zu berücksichtigen. Als eine der frühen und einflussreichsten Werke im Bereich der Synthesemethoden gilt Victor Papanek's „**Design for the real world**“ [Papa72], in dem er die Rolle und Verantwortung des Designs bei der Lösung gesellschaftlicher Probleme und der Förderung von sozialer Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit betont. Er kritisiert die Konsumgesellschaft und das oft verschwenderische und unethische Verhalten der Designer, die Produkte entwerfen, die mehr Schaden als Nutzen bringen können. Stattdessen fordert er Designer auf, Produkte zu entwerfen, die die Bedürfnisse der Menschen erfüllen und gleichzeitig umweltfreundlich sowie sozial verantwortlich sind.

Die erste **Ölpreiskrise**, die im Jahr 1973 begann und die Ölpreise um das Vierfache steigen ließ, hatte weitreichende Auswirkungen auf die Weltwirtschaft und führte zu einer verstärkten Suche nach alternativen Energiequellen sowie zu politischen und wirtschaftlichen Veränderungen in vielen Ländern. So wurde beispielsweise 1974 das „**Umweltbundesamt**“ (UBA) gegründet und das „**Bundesimmissionsgesetz**“ verabschiedet, welches 1976 durch das „**Bundesnaturschutzgesetz**“ ergänzt wurde. Lovelock und Margulis publizierten 1974 die sogenannte „**Gaia-Hypothese**“ [LoMa74], eine wissenschaftliche Theorie, die die Erde als ein komplexes, selbstregulierendes System betrachtet, welches die Biosphäre, die Atmosphäre, die Ozeane und andere geophysikalische Prozesse umfasst. Diese Systeme arbeiten wie ein einziger Organismus zusammen, um eine Umgebung aufrechtzuerhalten, die für das Leben auf der Erde geeignet ist. Auch wenn diese Hypothese bis heute kontrovers diskutiert wird, trug sie dazu bei das Bewusstsein für die Komplexität der Wechselwirkungen auf der Erde zu erhöhen und die theoretischen Grundlagen für eine regenerative Kreislaufwirtschaft zu schaffen. Müller-Wenk zeigte mit seinem Buch „**Die ökologische Buchhaltung**“ [Müll78] einen frühen Ansatz zur Analyse von umweltrelevanten Auswirkungen auf Unternehmensebene auf. In den späten 1970er Jahren bis in die frühen 1980er

Jahre verschärfte die **zweite Ölpreiskrise**, die durch Ölpreise auf neuem Rekordniveau und damit verbundene wirtschaftliche Turbulenzen gekennzeichnet war, die Notwendigkeit für eine nachhaltigere Entwicklung. So wurde 1979 die internationale Not-for-Profit-Organisation SETAC (**Society of Environmental Toxicology and Chemistry**) als ein interdisziplinäres Wissenschaftsforum in den USA gegründet, mit dem Ziel, die Umweltwissenschaften, insbesondere die Umwelttoxikologie und Chemie, zu fördern. Im gleichen Jahr wurde im Rahmen der Wirtschaftskommission der UN das sogenannte „**Genfer Luftreinhalteabkommen**“ (genaue englische Bezeichnung: Convention on Long-range Transboundary Air Pollution) verabschiedet. Mit der Absicht die Luftqualität in Europa zu verbessern, legte es Ziele und Verpflichtungen für die Reduzierung von Luftschadstoffen wie Schwefeldioxid, Stickstoffoxide und flüchtige organische Verbindungen fest. Es folgte die „**World Conservation Strategy**“ von 1980, die von der International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN), dem UNEP und dem WWF (World Wide Fund for Nature) gemeinsam entwickelt wurde und die Bedeutung des Umweltschutzes betonte und einen Rahmen für globale Naturschutzmaßnahmen lieferte. Sie basierte auf Schlüsselprinzipien wie nachhaltiger Nutzung natürlicher Ressourcen, Erhaltung der biologischen Vielfalt, Umweltschutz und der sozial gerechten Verteilung der Kosten und Nutzen des Umweltschutzes. Darin wurden konkrete Handlungsempfehlungen für Regierungen und Organisationen festgelegt, was zu einem bedeutenden Einfluss auf die internationale Umweltpolitik führte.

Mit dem Artikel „**Recycling beginnt in der Konstruktion**“ [Jord79] publizierten Jordan und Weege bereits 1979 einen Ansatz, der den Gedanken der Kreislaufwirtschaft in die Konstruktionstechnik überträgt. Dieser wurde von Weege 1981 in einem umfassenderen Werk „**Recyclinggerechtes Konstruieren**“ [Weeg81] noch weiter ausgearbeitet. Gleichzeitig entwickelte der Schweizer Walter R. Stahel das Konzept „**The Product-Life Factor**“ [Stah81], das sich mit der Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und der Reduzierung von Abfällen durch Wiederverwendung, Reparatur und Recycling befasste. Parallel dazu wurde auch mit „**Design to cost and life cycle cost**“ [HSCH80] ein Verfahren entwickelt, das die Lebenszykluskosten in den PEP einfließen lassen sollte.

Als ein weiterer Meilenstein auf internationaler Ebene wurde im Jahr 1983 die „**World Commission on Environment and Development**“ (WCED) von den Vereinten Nationen gegründet, um globale Umwelt- und Entwicklungsfragen zu untersuchen und entsprechende Lösungen vorzuschlagen. Die bekannteste Leistung der WCED ist die spätere Veröffentlichung des **Brundtland-Berichts "Our Common Future"** [Unit87] im Jahr 1987, der nach der damaligen Vorsitzenden der Kommission, Gro Harlem Brundtland, benannt wurde. Der Bericht legte den Grundstein für das Konzept der nachhaltigen Entwicklung und lieferte die bis heute meist verwendete Definition von Nachhaltigkeit (siehe auch Kapitel 2.1.1). Zu dieser Zeit wurde der Abbau der Ozonschicht als eines der drängendsten Umweltprobleme angesehen. Im Rahmen des UNEP wurde im Jahr 1985 das „**Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht**“ verabschiedet, das 1987 durch das „**Montrealer Protokoll**“ ergänzt und gestärkt wurde. So wurden Unterzeichnerstaaten zur schrittweisen Reduzierung und letztendlich zur Beseitigung der Produktion und Verwendung von

ozonabbauenden Chemikalien wie chlor- und bromhaltigen Fluorkohlenwasserstoffen und Halogenen verpflichtet. Es folgte 1989 die Basler Konvention, offiziell bekannt als "**Basler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung**", mit dem Ziel, die grenzüberschreitende Entsorgung zu kontrollieren und zu regulieren. Um die immer gewichtigeren Umweltfragen auch auf nationaler Ebene in der BRD besser koordinieren und adressieren zu können, wurde 1986 das „**Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit**“ (BMU) gegründet. Das wachsende Umweltbewusstsein hielt in den 1980er Jahren ebenso mehr Einzug in die Produktgestaltung und das Design, was in mehreren Veröffentlichungen zu „**Green Design**“ und der Ausstellung „**The Green Designer Exhibition**“ 1986 in London zu erkennen ist [Jona04]. Neben Werken mit Fokus auf die ökologischen Auswirkungen der Produkte, wurden auch Ansätze zum System- und Lebenszyklusdenken im Kontext der Produktentstehung publiziert, wie beispielsweise von Keys 1988 [Keys88] oder von Calkins et al. [CGMR89], die als eine der ersten den Begriff des „**Life Cycle Engineering**“ (LCE) verwenden. Frühe ökonomisch orientierte Unterstützung im PEP lieferten die „**VDI 2235 - Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren**“ [VDI87] und die „**VDI 2234 - Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur**“ [VDI90].

### 3.1.2 Historische Entwicklung von 1990 bis 1999

In den 1990er Jahren intensivierte sich die Forschung im Bereich der *Nachhaltigen Produktentstehung*, was in den zahlreichen Veröffentlichungen sowohl im Bereich der Analyse- als auch der Synthesemethoden deutlich wird (Abbildung 3-2). **Manzini** forderte 1990, dass Design sich verändern und weiterentwickeln muss, um den Herausforderungen der heutigen Welt gerecht zu werden, insbesondere den sozialen und ökologischen Problemen, die mit der Globalisierung und dem technologischen Fortschritt einhergehen [Manz90]. Er betonte außerdem die Verantwortung des Designers [MaCu92] und erkannte, dass die Umweltfrage von einer Minderheitenkritik zu einem offiziell anerkanntem Problem gewachsen ist, weswegen er für die Notwendigkeit radikalerer Ansätze zum Umgang mit Design und Nachhaltigkeit plädierte [Manz94]. Es folgten Ansätze im Bereich „**Green Design**“ von Burall [Bura91] oder „**Green Design: Design for the Environment**“ von Mackenzie [Mack91], die sich in erster Linie auf die Umweltaspekte fokussierten. Ebenso wurde im Bereich der Kreislaufwirtschaft stetig weiter geforscht. Das Buch „**Economics of natural resources and the environment**“ [PeTu90] von Pearce und Turner zählt dabei als eines der grundlegendsten Lehrbücher. In der **VDI-Richtlinie 2243** „Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte“ [VDI91] wurde das Thema bereits im Jahr 1991 in einem Regelwerk für Konstrukteure festgehalten. Die Richtlinie wurde 2002 überarbeitet [VDI02]. Die Konzepte der Wiederverwendung, des Recyclings und des Lebenszyklusdenkens wurden auch im umfassenden Werk „**Life Cycle Design Guidance Manual**“ [KeMe93] von 1993 festgehalten. So wurde auch das „**Life Cycle Engineering**“ beispielsweise von Alting et al. [AlJø93, Alti95] weiter geprägt. Eine der ersten sozial orientierten Designansätze publizierte Nigel Whiteley 1993 in „**Design for Society**“ [Whit93].

Es entstanden jedoch nicht nur neue Ansätze im Bereich der Synthesemethoden. Das Öko-Institut veröffentlichte 1987 mit ihrem Diskussionsbeitrag „**Produktlinienanalyse: Bedürfnisse, Produkte und ihre Folgen**“ (PLA) [Ökoi87] einen frühen Ansatz zur umfassenden Analyse von Produkten über ihren gesamten Lebensweg in den Dimensionen Natur, Gesellschaft und Wirtschaft. Die PLA knüpfte an Informationssysteme wie die Technologiefolgenabschätzung und die Umweltverträglichkeitsprüfung an [Ökoi87] und beinhaltete schon damals einen Großteil der Aspekte, die auch in der aktuellen Nachhaltigkeitsanalyse (siehe Kapitel 3.2) untersucht werden.

Die Forschungen in den Folgejahren konzentrierten sich hingegen überwiegend auf die ökologische Dimension und der Vereinheitlichung der vorhandenen Analysemethoden. So gilt Walter Klöpffer als einer der wegweisenden Forscher im Bereich der Nachhaltigkeitsanalyse und -bewertung von Produkten. Er legte als Weiterentwicklung der PLA 1991 mit „**Produktlinienanalyse und Ökobilanz**“ [Klöp91] einen zusätzlichen Grundstein in diesem Bereich. Seine Arbeit hat dazu beigetragen zunächst die ökologische Analyse zu vereinheitlichen und später auf die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung inklusive der sozialen und ökonomischen Dimension zu erweitern [Klöp08, Klöp12]. Zu dieser Zeit sollte sich die Ökobilanz (englisch: Life Cycle Assessment (LCA)), die aus verschiedenen Ansätzen wie beispielsweise der REPA und der PLA über circa 25 Jahre hinweg weiterentwickelt wurde, mehr und mehr als die dominante Methode zur ökologischen Bewertung von Produkten und Systemen durchsetzen [HuFH96]. Wesentlich dafür war die Vereinheitlichung des Vorgehens, die zunächst in den „**Guidelines for Life Cycle Assessment: A Code of Practice**“ [Seta93] 1993 auf einer SETAC-Konferenz in Portugal festgelegt wurden. Die erste Normierung wurde innerhalb der **Umweltnormreihe ISO 14000 ff** ab 1996 geschaffen. Auf die „**ISO 14001 – Umweltmanagementsysteme**“ [ISO96] folgte 1997 die „**ISO 14040 Umweltmanagement - Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen**“ [ISO97] als erste internationale Norm zur ökologischen Analyse. Es folgten ergänzende Normen zur ISO 14040 [ISO00a, ISO00b, ISO98]. Nach stetiger Aktualisierung und Weiterentwicklung gilt sie bis heute als maßgebende Norm in diesem Bereich. Sie wird in Kapitel 3.2.2 in der aktuellen Version von 2021 näher beschrieben. Als eine relevante Submethode zur Bewertung des Energieaufwands eines Produktes ist die 1997 veröffentlichte VDI-Richtlinie „**VDI 4600: Kumulierter Energieaufwand**“ (KEA) [VDI97a] zu erwähnen. Zeitgleich konnte auch die ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit durch die Methoden von Cooper [CoSI97] und die „**VDI 2225 - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren**“ [VDI97b, VDI97c, VDI98a, VDI98b] in die Produktentstehung integriert werden. Parallel zu diesen Entwicklungen entwarf Schmidt-Bleek 1994 den MIPS-Ansatz (**Material-Intensität pro Serviceeinheit**) als „**Das Maß für ökologisches Wirtschaften**“ [Schm94] mit Fokus auf der Bewertung von Materialien und Ressourcennutzung. Als ein weiterer Ansatz ist das „**Social and Environmental Life Cycle Assessment (SELCA)**“ [ObDC96] zu nennen, das zusätzlich zu ökologischen auch die soziale Dimension der Nachhaltigkeit untersuchte. Zur Bewertung und Zertifizierung von sozialen Aspekten etablierte die Organisation Social Accountability International (SAI) im Jahr 1997 die „**SA8000**“ als einen umfassenden Standard für Sozialverantwortung am Arbeitsplatz. Ziel war es, Unternehmen klare Leitlinien und Anforderungen bereitzustellen, um die

Arbeitsbedingungen zu optimieren und die Förderung sozialer Gerechtigkeit zu unterstützen. Sie wurde mehrfach überarbeitet und gilt aktuell in der Fassung von 2014 „Social Accountability 8000“ [Soci14].

Die intensivierten Bemühungen in den 1990er Jahren sind überwiegend auf ein zentrales internationales Ereignis im Jahr 1992 zurückzuführen, wie das Beispiel der Entstehung der ISO 14000 ff belegt [Isoc09]. In Rio de Janeiro fand in diesem Jahr die „**United Nations Conference on Environment and Development**“ (UNCED) statt, die auch als „**Rio-Konferenz**“ oder „**Erdgipfel**“ (englisch: Earth Summit) bekannt wurde. Mit Vertretern aus über 170 Ländern war die Konferenz, 20 Jahre nach der UNCHE in Stockholm, das bis dato größte Treffen mit dem Ziel, globale Lösungen für Umweltprobleme und nachhaltige Entwicklung zu erarbeiten. Als wichtigste Ergebnisse wurde die „**Rio Declaration on Environment and Development**“ [Unit92b] mit 27 Grundsätzen für eine gemeinschaftliche nachhaltige Entwicklung, die Klimarahmenkonvention „**United Nations Framework Convention on Climate Change**“ (UNFCCC) [Unit92c] sowie die Biodiversitätskonvention „**Convention on Biological Diversity**“ (CBD) [Unit92d] beschlossen. Darüber hinaus bildete die „**Agenda 21**“ [Unit92a] ein umfassendes Aktionsprogramm mit Empfehlungen und Handlungsplänen für eine Vielzahl von Themenbereichen, darunter Armutsbekämpfung, Umweltschutz, nachhaltige Landwirtschaft, städtische Entwicklung und Bildung. Zur Umsetzung und zur Überwachung der diversen Ziele wurde im Anschluss an die Rio-Konferenz die „**Commission on Sustainable Development**“ (CSD) gegründet, die bis 2013 auf internationaler Ebene eine tragende Rolle bei der Förderung nachhaltiger Entwicklung innehatte.

Im gleichen Jahr kam es auch im europäischen Raum zu weitreichenden Veränderungen durch den „Vertrag von Maastricht“, welcher durch sein Inkrafttreten 1993 die „**Europäische Union**“ (EU) schuf. So konnte durch die Europäische Kommission auch das erste „**Eco-Management and Audit Scheme**“ (EMAS I) [Coun93] veröffentlicht werden. Dabei handelt es sich um ein freiwilliges Umweltmanagementsystem, das Organisationen dabei unterstützen sollte, ihre Umweltauswirkungen zu reduzieren und eine kontinuierliche Verbesserung ihrer Umweltleistung zu erreichen. Es wurde in den Jahren 2001 mit EMAS II [Coun01] und 2009 mit EMAS III [Coun09] überarbeitet. Eine erste produktbezogene Richtlinie, die 1992 noch im Rahmen der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft (EWG) beschlossen wurde, war die „**Richtlinie 92/42/EWG** [...] über die Wirkungsgrade von mit flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen beschickten neuen Warmwasserheizkesseln“ [Coun92], die den Energieverbrauch von Heizkesseln reduzieren und damit zur Verringerung des Energieverbrauchs und der Umweltbelastung beitragen sollte.

Im Jahr 1994 nahm die bereits 1990 gegründete „**European Environment Agency**“ (EEA) ihre Arbeit in Kopenhagen auf. Ihre Aufgabe besteht seither darin, zuverlässige und unabhängige Informationen über die Umwelt bereitzustellen und die Umweltpolitik der EU zu unterstützen. Auf nationaler Ebene wurde zu dieser Zeit das „**Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz**“ [Bund94] verabschiedet, das den Übergang von einer linearen Wirtschaft zu einer Kreislaufwirtschaft fördern sollte. Darin wurden auch erstmals im Rahmen der „Produktverantwortung“ die Verantwortung der Hersteller, Importeure und Vertreiber für die Umweltauswirkungen ihrer Produkte über

deren gesamten Lebenszyklus hinweg thematisiert. Dieses Gesetz hatte eine Vorreiterrolle auch für die spätere Gesetzgebung auf europäischer Ebene. Das ebenfalls verabschiedete „**Umweltinformationsgesetz**“ regelte den Zugang der Öffentlichkeit zu Umweltinformationen und stärkte dadurch die Transparenz und Partizipation in Umweltfragen. Eine erste europaweite und produktbezogene Richtlinie wurde 1996 mit der „**Directive 96/57/EC** - über Anforderungen im Hinblick auf die Energieeffizienz von elektrischen Haushaltskühl- und -gefriergeräten und entsprechenden Kombinationen“ [Euro96] geschaffen. Die Richtlinie legte Mindestanforderungen an die Energieeffizienz sowie Kennzeichnungsanforderungen fest, um Verbrauchern klare Informationen über die Energieeffizienz dieser Geräte zur Verfügung zu stellen. Eine ähnliche Richtlinie wurde später mit der „**Directive 2000/55/EC** - über Energieeffizienzanforderungen an Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen“ [Euro00] geschaffen. Weitere Meilensteine auf internationaler Ebene sind das „**Kyoto-Protokoll**“ von 1997, das in Ergänzung zur UNFCCC die Emission von sechs Treibhausgasen beschränken sollte, und ebenso die Überarbeitung und Erklärung der sogenannten „**ILO-Kernarbeitsnormen**“ (englisch: Core Labour Standards) der International Labour Organisation im Jahr 1998. Diese sind eine Reihe international anerkannter Arbeitsstandards, die grundlegende Arbeitsrechte und -prinzipien umfassen, wie etwa die Vereinigungsfreiheit, das Recht auf Kollektivverhandlungen, die Beseitigung von Zwangs- und Kinderarbeit sowie das Verbot von Diskriminierung am Arbeitsplatz [Inte22]. Die ILO-Kernarbeitsnormen werden bis heute stetig aktualisiert, und deren Einhaltung kann als Mindestmaß für eine sozial nachhaltige Wertschöpfung angesehen werden.

### 3.1.3 Historische Entwicklung von 2000 bis 2009

Zehn Jahre nach dem Erdgipfel in Rio, fand 2002 der „**World Summit on Sustainable Development**“ (WSSD) der UN in Johannesburg statt (Abbildung 3-3) bei welchem der Johannesburg-Aktionsplan, der konkrete Maßnahmen und Verpflichtungen der teilnehmenden Regierungen und internationalen Organisationen zur Förderung der nachhaltigen Entwicklung festlegte, verabschiedet wurde. Obwohl der WSSD nicht die gleiche Aufmerksamkeit erhielt wie der Erdgipfel von 1992, trug er dennoch dazu bei, die Diskussion über Nachhaltigkeit voranzutreiben. Ebenfalls 1992 wurde die „**Life Cycle Initiative**“ (LCI) gemeinsam von der UNEP und der SETAC ins Leben gerufen, die eine Partnerschaft zwischen verschiedenen UN-Organisationen, Regierungen, Unternehmen, wissenschaftlichen Institutionen und Nichtregierungsorganisationen ist. Das Hauptziel der LCI besteht darin, die Integration von Ökobilanzen in Entscheidungsprozessen zu fördern, um nachhaltigere Produkte, Dienstleistungen und Politikmaßnahmen zu unterstützen. Dies wird in den Folgejahren durch die Entwicklung von Richtlinien, Schulungsmaterialien, Datenbanken und Tools im Bereich der Analysemethoden erreicht. Auf nationaler Ebene wurde 2001 der „**Rat für nachhaltige Entwicklung**“ als ein unabhängiges Beratungsgremium der Bundesregierung in Deutschland gegründet und setzt sich aus Vertretern verschiedener gesellschaftlicher Gruppen wie Wirtschaft, Wissenschaft, Umwelt- und Entwicklungsorganisationen sowie Gewerkschaften zusammen. Seine Aufgabe besteht bis heute darin die Bundesregierung bei der Umsetzung ihrer

Nachhaltigkeitsstrategie zu unterstützen und konkrete Handlungsempfehlungen zu erarbeiten. Die **erste nationale Nachhaltigkeitsstrategie** „Perspektiven für Deutschland“ [Bund02] wurde 2002 von der Bundesregierung verabschiedet und beinhaltet in ihrem Leitbild die Themen Generationengerechtigkeit, Lebensqualität, sozialer Zusammenhalt, internationale Verantwortung und Managementregeln der Nachhaltigkeit.

Im Segment der Synthesemethoden wurden um die Jahrtausendwende weitere Ansätze veröffentlicht, die die bisherigen Konzepte zu „Green Design“ und „Design for Environment“ weiterentwickeln sollten. Van Weenen verwendete im Rahmen dieser Weiterentwicklungen erstmals die Bezeichnung „**Sustainable Product Development**“ [Ween95]. Als wesentlicher Beitrag dazu, wenn auch mit Fokus auf die ökologische Dimension, ist das „**Ecodesign**“ zu nennen, das die Betrachtung von Umweltaspekten bereits in die Produktentwicklung integrieren sollte. Dewberry [Dewb96] und Brezet et al. [BrVa97] publizierten dazu wichtige und grundlegende Werke 1996 und 1997. In den Folgejahren wurde basierend auf dem Ecodesign, welches erst 2002 mit der **ISO/TR 14062** in einem Fachbericht zur „Integration von Umweltaspekten in Produktdesign und -entwicklung“ [ISO02] als ein Leitfaden in die ISO 14000 ff aufgenommen wurde, stärker nach ganzheitlich nachhaltigen Ansätzen für die Produktentstehung geforscht, wie beispielsweise durch die Autoren Brezet et al. [BrDS01] oder Charter und Tischner [ChTi01]. So weitete sich der Fokus in Richtung „**Design for Sustainability**“ [Birk02, BrSi04], in dem alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit bereits im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden sollten. Der Ansatz strebt danach, eine ausgewogene Integration von Umwelt-, Sozial- und Wirtschaftsinteressen zu erreichen und wurde von weiteren Autoren beständig weiterentwickelt, wie die Veröffentlichungen des UNEP [UnCD07], von Bhamra und Lofthouse [BhLo08] oder Diehl et al. [CrDR09] zeigen. Parallel zu den Entwicklungen des „Design for Sustainability“ entstand 2002 durch das Buch „**Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things**“ [McBr02] von McDonough und Braungart ein bedeutsamer neuer Ansatz zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft. "Cradle to Cradle" (C2C) ist ein Designkonzept zur Gestaltung von Produkten und Systemen, mit dem Ziel, dass alle Materialien in einem geschlossenen Kreislauf wiederverwendet oder biologisch abgebaut werden können, ohne schädliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu haben. Dieses fand seither zunehmend Beachtung in verschiedenen Branchen wie der Architektur, Textilindustrie, Abfallwirtschaft und auch in der Produktentstehung und wurde daher weiter ausgearbeitet [BrMB07]. Eine detaillierte Betrachtung des Designkonzepts wird in Kapitel 3.3.5 gegeben. Als eine mögliche Umsetzung der genannten Ansätze der *Nachhaltigen Produktentstehung* werden zunehmend auch **Produkt-Service-Systeme** (PSS) genannt, die von Tukker [Tukk04] in acht Typen klassifiziert wurden (siehe Kapitel 3.3.4).

2003 legte die Europäische Kommission ein Weißbuch zur „**Integrierten Produktpolitik**“ (IPP) [Euro03] vor. Mit dem Ansatz sollen die Umweltauswirkungen von Produkten entlang des gesamten Lebenszyklus verbessert werden, um sicherzustellen, dass Umweltschutzmaßnahmen in einem Lebenszyklusabschnitt nicht einfach zu einer Verlagerung negativer Umweltauswirkungen auf einen anderen Abschnitt führen. Aufbauend auf dieser Strategie wurden in den Folgejahren

mehrere Gesetzgebungen beschlossen, wie beispielsweise die REACH-Verordnung (**Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of CHemicals**) von 2006 [Euro06]. Sie hat das Ziel, Risiken durch Chemikalien zu minimieren, um sowohl die menschliche Gesundheit als auch die Umwelt besser zu schützen. Zudem ermöglicht REACH die Beschränkung oder Zulassung bestimmter gefährlicher Chemikalien in der EU. 2005 wurde EU-weit das „**Emissions Trading System**“ (ETS) eingeführt, welches seitdem den Handel mit Emissionszertifikaten regelt, um den Ausstoß von Treibhausgasen in der EU zu reduzieren. Im gleichen Jahr wurde die "**Richtlinie 2005/32/EG** [...] zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte" [Euro05], oft als "ErP-Richtlinie" bezeichnet, verabschiedet. Sie vereinte und aktualisierte die bisherigen produktspezifischen Richtlinien [Coun92, Euro00, Euro96] und erweiterte die Mindestanforderungen an Produkte verschiedener Sektoren wie Haushaltsgeräten, Beleuchtung, Heizungs- und Kühlanlagen, Informations- und Kommunikationstechnologie sowie anderen energieverbrauchsrelevanten Bereichen. 2008 wurde sie in Deutschland im „**Energiebetriebene-Produkte-Gesetz**“ in der nationalen Rechtsprechung umgesetzt. Die Richtlinie aus dem Jahr 2005 wurde wiederum vier Jahre später durch die „**Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG** (englisch: European Ecodesign Directive)“ [Euro09] von der Gesetzgebung der EU ersetzt, die den Anwendungsbereich auf eine noch breitere Palette von Produktkategorien erweitert. Außerdem wurden neben der Energieeffizienz auch weitere Umweltaspekte wie Ressourceneffizienz und Umweltverträglichkeit eingeschlossen. 2011 wurde diese im „**Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (EVPG)**“ in deutsches Recht übertragen. Im Folgejahr wurde das seit 1996 geltende „Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz“ hinsichtlich neuer EU-Vorgaben überarbeitet und wird seitdem nur noch als „**Kreislaufwirtschaftsgesetz**“ (KrWG) bezeichnet. Eine Umsetzung in Form einer Norm besteht seit 2011 in der **ISO 14006** mit „Leitlinien zur Berücksichtigung umweltverträglicher Produktgestaltung“ [ISO11]. Mehrere VDI-Richtlinien [VDI12a, VDI12b, VDI12c, VDI13a, VDI13b, VDI15] beschreiben ab 2012 das Fachgebiet der **Bionik**, die nach dem Vorbild der Natur zu nachhaltigeren Lösungen beitragen können (siehe Kapitel 3.3.2).

Der Fokus der in 90er Jahren standardisierten Analysemethoden sollte sich ab der Jahrtausendwende von der ökologischen Dimension ausgehend kontinuierlich erweitern. So kombinierten Norris in [Norr01] und Rebitzer [Rebi02] das LCA mit dem „**Life Cycle Costing**“ (LCC). LCC stellt eine Methode zur Abschätzung der Lebenszykluskosten von Produkten und Systemen dar, die aus verschiedenen Branchen und Bereichen, wie der Betriebswirtschaftslehre und dem Kostenmanagement, entstammt und die ökonomischen Folgen abdecken soll (siehe Kapitel 3.2.4). Die Verwendung zur ökonomischen Nachhaltigkeitsanalyse wurde in den Folgejahren Teil des wissenschaftlichen Diskurses [Dura02, HuRe03, ReHJ03]. Als Beispiel für eine entsprechende Norm kann die „DIN IEC 60300-3-3 Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3: Anwendungsleitfaden - Hauptabschnitt 3: Betrachtung der Lebenszykluskosten“ [DIN99] des Deutschen Institut für Normung (DIN) von 1999 aufgeführt werden. 2003 diskutierte Klöpffer die Relevanz solcher lebenszyklusbasierter Analysemethoden für die *Nachhaltige Produktentstehung* und griff dabei die frühen

Ansätze der PLA, die bereits alle drei Dimensionen betrachtete, auf [Klöp03]. Die Erweiterung um die zwei verbliebenen Dimensionen wurde als Zukunft des LCA diskutiert [HuRe05]. Neben dem LCA und dem LCC wurde also auch ein „**Social Life Cycle Assessment (S-LCA)**“ gefordert, das jedoch trotz erster Ansätze, wie in [ObDC96, Ökoi87], im Vergleich zu den anderen Methoden noch am wenigsten weit entwickelt war [HuRe05, Klöp03]. Neben Dreyer et al. [DrHS06] wurde dieser Ansatz auch von der LCI aufgegriffen, die 2009 mit den „**Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products**“ [UBMU09] eine erste internationale Richtlinie dazu veröffentlichte. Diese wurde 2020 mit den „**Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations**“ [UBSL20] erneuert und stellt derzeit die relevanteste Vorgabe im Bereich des S-LCA dar (siehe Kapitel 3.2.3). Neben der Entwicklung des S-LCA wurde auch die Ökobilanz überarbeitet und 2006 in der zweiten Edition der ISO 14040 [ISO06b] sowie der **ISO 14044** [ISO06a], welche die bisherigen Normen 14041, 14042 und 14043 zusammenfasste, neu veröffentlicht. Im gleichen Jahr wurde die erste Version der **ISO 14064** publiziert, welche die „Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen“ und deren Entzug auf organisatorischer Ebene behandelt und 2012 sowie 2018 erneuert wurde [DIN19a, DIN20a, DIN20b]. Eine weitere wichtige Norm zur Berechnung der Treibhausgasemissionen auf Produktebene wurde 2008 mit der „**PAS 2050** - Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and service“ [BSI08] von der British Standards Institution (BSI) geschaffen. Die BSI legte im Folgejahr den Grundstein zum systematischen Nachweis einer neutralen Treibhausgasbilanz für Organisationen oder Produkte mit der „**PAS 2060** - Specification for the demonstration of carbon neutrality“, welche 2014 aktualisiert [BSI14] und mittlerweile von der „**ISO 14068** - Management des Klimawandels - Übergang zu Netto-Null“ [ISO23] im Jahr 2023 abgelöst wurde. Weitere spezialisierte ISO-Normen sind der „Water footprint“ (WFP) der **ISO 14046** [DIN16] und der „Carbon footprint“ (CFP) der **ISO 14067** [ISO19].

2010 folgte die „**ISO 26000** - Guidance on social responsibility“ [ISO10] als Leitfaden zur gesellschaftlichen Verantwortung von Organisationen. Im Gegensatz zu zertifizierbaren Standards wie ISO 14001 oder SA8000 fungiert sie eher als Leitlinie denn als Managementsystem. Ziel ist es dabei, Organisationen bei der Integration sozialer Verantwortung in ihren Betriebsabläufen zu helfen. Allerdings wird diskutiert, inwieweit die ISO 26000 einen neuen Normtyp darstellt, der nicht auf eine Zertifizierung abzielt, sondern auf die Förderung von bewährten Praktiken und die Sensibilisierung für gesellschaftliche Verantwortung [Hahn12], weswegen sie nicht klar als Synthese- oder Analysemethode eingeordnet wird.

Parallel zu den Weiterentwicklungen der Analysemethoden in den einzelnen Dimensionen der Nachhaltigkeit, wurde auch nach einem Ansatz gesucht, der alle Dimensionen gemeinsam betrachtet [Klöp03, Weid06]. Mit „**Life Cycle Sustainability Assessment of products**“ (LCSA) [Klöp08] wurde 2008 von Klöpffer erstmals das entsprechende Schema „**LCSA = LCA + LCC + SLCA**“ publiziert. Dieser Ansatz wurde von Finkbeiner et al. [FSLT10] weiterentwickelt und auch von der LCI aufgegriffen, die 2011 mit „**Towards A Life Cycle Sustainability Assessment: Making informed choices on products**“ [UnVL11] ein umfassendes Werk mit acht Fallstudien dazu veröffentlichte.

[CHKS11] und [SHKP11] lieferten korrespondierende „**Code of Practice**“ für das LCC. Seitdem wurden zahlreiche Veröffentlichungen, Weiterentwicklungen und Fallstudien zum LCSA-Ansatz durchgeführt, wie [AIMB21, CoQD19, OKHC17, OnKT14, TaTF17, VTBT20] belegen. Valdivia et al. leiteten daraus Prinzipien für die Anwendung in „Principles for the application of life cycle sustainability assessment“ [VBTS21] ab. Eine detaillierte Beschreibung des LCSA findet in Kapitel 3.2.6 statt.

#### 3.1.4 Historische Entwicklung von 2010 bis heute

Auf internationaler Ebene fand 2012, also 20 Jahre nach dem einflussreichen „Erdgipfel“, ebenfalls in Rio de Janeiro die „**United Nations Conference on Sustainable Development**“ (UNCSD), die auch bekannt als „Rio+20-Konferenz“, statt, die unter anderem den Fortschritt in der Umsetzung der nachhaltigen Entwicklung überprüfen sollte (Abbildung 3-4). Ein Schlüsselergebnis der Konferenz war die Verabschiedung des Abschlussdokuments "Die Zukunft, die wir wollen" (englisch: *The Future We Want*), das eine Vielzahl von Vereinbarungen, Zielen und Leitlinien zur Förderung nachhaltiger Entwicklung umfasste. Zu den herausragenden Ergebnissen gehörte auch die Entscheidung ein „**High-Level Political Forum on Sustainable Development**“ (HLPF) einzurichten, um als ein jährliches Forum auf hoher politischer Ebene die Umsetzung der Beschlüsse zu überwachen und zu bewerten. In den Jahren nach „Rio+20“ fanden zahlreiche Verhandlungen, Konsultationen und Diskussionen auf nationaler, regionaler und internationaler Ebene statt, um die Ziele und Unterziele einer neuen Agenda als Nachfolge für die „**Millennium-Goals**“ sowie ihre politische Ausrichtung zu erarbeiten. So konnte 2015 in New York auf dem „United Nations Summit for the Adoption of the Post-2015 Development Agenda“ die „**Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung**“ [Unge15], die auch die „**17 Sustainable Development Goals**“ (siehe Abbildung 1-2) beinhaltet, verabschiedet und von 193 Ländern weltweit angenommen werden. Ebenfalls 2015 fand die UN-Klimakonferenz „**COP21**“ in Paris statt, auf der als Nachfolge des Kyoto-Protokolls internationale Vereinbarungen zum Klimaschutz getroffen wurden. Wie bereits in Kapitel 1.1 und 2.1.1 erwähnt, haben die „17 Ziele für nachhaltige Entwicklung“ global eine besondere Bedeutung erlangt, da sie eine gemeinsame Vision für eine nachhaltige Zukunft skizzieren und als universelle Aufrufe zum Handeln dienen. Im Jahr 2023 fand der „**SDG Summit**“ in New York statt, bei dem sich die Staats- und Regierungschefs der Welt erneut ihr Engagement für die Agenda 2030 bekräftigten und die Dringlichkeit der Ziele betonten. Zum Erreichen der Ziele bis 2030 spielen insbesondere transformative Maßnahmen durch Wissenschaft, Technologie und Innovation sowie die Nationalisierung der SGDs eine Schlüsselrolle. In diesem Sinne stellte die EU bereits 2015 einen Aktionsplan für die Transformation zu einer Kreislaufwirtschaft namens „Closing the loop - **An EU action plan for the Circular Economy**“ als einen ersten Schritt zur Nationalisierung vor. Es folgte 2019 „**The European Green Deal**“ [Euro19], mit den Zielen die EU bis 2050 klimaneutral zu machen und gleichzeitig das Wirtschaftswachstum zu fördern, die Lebensqualität zu verbessern und die soziale Gerechtigkeit zu stärken. Weitere Kernbereiche sind die Förderung von erneuerbaren Energien, die Verbesserung der Energieeffizienz, die nachhaltige Mobilität, die

Kreislaufwirtschaft, die Landwirtschaft und die Bewahrung der natürlichen Lebensräume. Als eine Folge des Green Deals wurde auch der Aktionsplan von 2015 erneuert: „**A new Circular Economy Action Plan**: For a cleaner and more competitive Europe“ [Euro20b]. Dieser zielt darauf ab, die Kreislaufwirtschaft in Europa weiter voranzutreiben und die EU zu einem globalen Vorreiter im Bereich der nachhaltigen Wirtschaft zu machen. Im Zuge dessen wurde 2020 ebenfalls die „**Taxonomy Directive**“ verabschiedet, die festlegen soll welche Wirtschaftstätigkeiten als ökologisch nachhaltig gelten und als förderungswürdig für eine Kreislaufwirtschaft betrachtet werden können. Es folgte 2022 die „**Corporate Sustainability Reporting Directive**“ [Euro22], die die bisherige Berichterstattung von Unternehmen bezüglich der Nachhaltigkeitsthemen in Form der Corporate Social Responsibility Richtlinie (CSR-Richtlinie) von 2014 [Euro14] erweitert und Unternehmen dazu ermutigen soll nachhaltigere Geschäftspraktiken zu verfolgen. Eine nationale Umsetzung besteht im „**CSR-Richtlinie-Umsetzungsgesetz**“ von 2017. Dazu folgten die „**European Sustainability Reporting Standards - ESRS**“ [Euro23a] zur Vereinheitlichung der Berichterstattung und die „**Corporate Sustainability Due Diligence Directive**“ [Euro24a], die die unternehmerischen Sorgfaltspflichten innerhalb der Wertschöpfungsketten behandelt. Parallel sollte die Ecodesign-Richtlinie aus dem Jahr 2009 überarbeitet und erweitert werden. Hierbei sollten nicht nur energiebezogene Produkte berücksichtigt werden, sondern auch insbesondere die Kreislauffähigkeit der Produkte mit im Fokus stehen. Die daraus entstandene neue „**Ecodesign for Sustainable Products Regulation**“ (ESPR) [Euro24b] trat im Juli 2024 in Kraft. Auf nationaler Ebene sind als Beispiele für die Nationalisierung der Bemühungen der UN und der EU das „**Bundes-Klimaschutzgesetz**“ (KSG) zur Erfüllung der nationalen Klimaschutzziele von 2019 und das „**Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz**“ (LkSG) zu erwähnen. Letzteres trat 2023 in Kraft und soll verbindliche und international anschlussfähige Sorgfaltsstandards bieten, die Unternehmen ab einer gewissen Größe innerhalb ihrer Lieferketten zu beachten haben.

Die gesteigerten Maßnahmen auf politischer Ebene gehen einher mit einer intensiveren Forschung sowohl bei den Analyse- als auch bei den Syntheseverfahren. Da es insbesondere in den vergangenen beiden Jahrzehnten weltweit einen starken Anstieg an Veröffentlichungen mit Bezug zu Nachhaltigkeit gab [BrPf17] und noch nicht klar ist, welche dieser teilweise neuartigen Ansätze sich in Forschung und Praxis durchsetzen werden, wird an dieser Stelle des historischen Rückblicks der *Nachhaltigen Produktentstehung* nur auf wenige und grundlegend neue Ansätze eingegangen. Eine Zusammenfassung des aktuellen Stands der Forschung erfolgt für beide Teilbereiche jeweils in Kapitel 3.2 und 3.3.

So wurden im Bereich der Analysemethoden vorwiegend von der Ellen MacArthur Foundation neue Ansätze zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Produkten veröffentlicht. Dazu gehören der „**Material Circularity Indicator**“ (MCI) [ElGr15] von 2015 und das erweiterte und übergreifende Rahmenwerk „**Circulytics**“ [Elle20a] von 2020. Ebenfalls relevant für die Bewertung der Kreislauffähigkeit in Form der Ressourceneffizienz ist die gleichnamige Richtlinie „**VDI 4800 – Ressourceneffizienz**“ [VDI16] aus dem Jahr 2016 und die **DIN-Reihe DIN EN 4550** und folgende, die Kreislaufaspekte speziell für energieverbrauchsrelevante Produkte bewertet [DIN19b, DIN19c,

DIN20c, DIN20d, DIN20e, DIN20f, DIN20g, DIN20h, DIN21b]. Eine internationale Standardisierung solcher Kreislaufbewertungsverfahren ist im Rahmen einer neuen **Normenreihe ISO 59000** zum Thema „Circular Economy“ [ISO24a] durch die „**ISO 59020** - Circular Economy – Measuring and assessing circularity performance“ [ISO24b] vorgenommen worden. Ein weiterer Ansatz zur Integration der Kreislaufbewertung als Erweiterung des LCSA, wurde 2023 von Luthin et al mit „**Circular Life Cycle Sustainability Assessment**“ [LuTC23] publiziert.

Auch die Analysemethoden ohne speziellen Fokus auf Kreislauffähigkeit wurden weiterentwickelt. Beispielsweise wurde das Konzept der absoluten Nachhaltigkeit (Kapitel 2.3.2) mit den Methoden der Ökobilanz kombiniert [BDOV15]. Der VDI publizierte 2017 die „**VDI 4605** - Nachhaltigkeitsbewertung“ [VDI17a] mit Indikatorsystemen zur allgemeinen Bewertung von Nachhaltigkeit. 2021 hat die Europäische Kommission eine „Empfehlung zur Anwendung der Methoden für die **Berechnung des Umweltfußabdrucks** zur Messung und Offenlegung der Umwelleistung von Produkten und Organisationen entlang ihres Lebenswegs“ [Euro21] veröffentlicht. Diese basiert im Wesentlichen auf den Grundsätzen der Ökobilanz und ist derzeit rechtlich nicht bindend.

Bei den Synthesemethoden entstanden als Erweiterung der genannten „Design for Sustainability“-Ansätze durch den Fokus auf das Systemdenken beispielsweise 2009 das „**Whole System Design**“ [SSHD09], das als ganzheitlicher und multidisziplinärer Ansatz darauf abzielt, Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Elementen eines Systems zu berücksichtigen, um nachhaltige Lösungen zu entwickeln, die ökologisch, sozial und wirtschaftlich tragfähig sind. Einige Ansätze zum Beispiel von 2016 von Ahrend [Ahre16] oder Joyce und Paquin [JoPa16] versuchen auch im Sinne der Nachhaltigkeit die **Entwicklung des Geschäftsmodell** zu berücksichtigen, welches starke Wechselwirkungen mit dem zu entwickelnden technischen Produkt hat. Die ISO erweiterte 2018 ihre Standards im Bereich des Treibhausgasmanagements mit der **ISO 14080**, die „Grundsätze und Prinzipien für Entwickler von Methoden hinsichtlich klimarelevanter Maßnahmen“ [ISO18] liefert.

Als ein weiterer Trend im Bereich der Synthesemethoden sind Ansätze zu nennen, die über eine nachhaltige Entwicklung hinaus darauf abzielen eine „positive“ bzw. „netto-positive“ Entwicklung zu erreichen. Janis Birkeland kann als eine Vordenkerin dieser Ansätze gesehen werden, wenn auch in ihrem Fachgebiet der Architektur und der städtischen Entwicklung. Ihr Konzept strebt danach, nicht nur die negativen Auswirkungen menschlicher Aktivitäten zu minimieren, sondern vielmehr positive Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesellschaft zu erzielen, was auch für das Modell dieser Arbeit eine grundlegende Anforderung darstellt und in Kapitel 3.4 näher beschrieben wird. Seit 2008 beschreibt sie dieses „**Net-Positive Design**“ in mehreren Büchern und Artikeln [BiKn16, Birk08, Birk18, Birk20, Birk22]. Dieser Ansatz wurde auch von einem Report des „Forum for the Future“, des „WWF“ und „The Climate Group“ aufgegriffen [Wwft14]. Norris beschreibt die Erzeugung von positiven Wirkungen als Handabdrücke („**Handprints**“) [Norr13] und entwickelt in den Folgejahren entsprechende Rahmenwerke [NBMK21, Norr17] (siehe Kapitel 3.4.6). Herrmann et al. verfolgten eine ähnliche Vision im Bereich der industriellen Produktion mit der „**Positive Impact Factory**“ [HBKS15] im Jahr 2015. Diese wurde in der

Dissertation von Gebler „Planung und Gestaltung einer **Positivfabrik** als Beitrag für eine absolute Nachhaltigkeit“ [Geb122] 2022 erweitert und auf konzeptioneller Ebene für eine moderne Automobilfabrik ausgestaltet. Parallel entstanden auch Ansätze zur Bewertung und Zertifizierung solcher positiver Nachhaltigkeitswirkungen bzw. Handabdrücke, wie die „**Living Product Challenge**“ [Livi14] oder Ansätze aus dem Projekt „**Der Handabdruck**“ [BEEG19, BEEH17, KHSS17, KÜSH22]. Die Zunahme an Veröffentlichungen in dem Bereich der „positiven Auswirkungen“ zeigt die steigende Relevanz dieser neuartigen Ansätze [GJTC22]. Neben der Ausrichtung auf positive Nachhaltigkeitswirkungen rückt außerdem die **Integration des Life Cycle Engineering in das Konzept der absoluten Nachhaltigkeit**, wie von Hauschild et al. [HaHK17, HaKR20] vorgeschlagen, zunehmend in den Vordergrund der Synthesemethoden.

### 3.1.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Diese zeitgeschichtliche Übersicht der Entwicklung des Fachgebiets der *Nachhaltigen Produktentstehung* von 1960 bis heute zeigt, wie divers die Ursprünge und Ansätze des derzeitigen Verständnisses sind. Daraus lassen sich **Kriterien zur Klassifizierung** des aktuellen Stands der Forschung ableiten. Diese können auch zur Bewertung der in Kapitel 3.2, 3.3 und 3.4 vorgestellten Methoden dienen (Kapitel 4.1), als auch bei der Formulierung (Kapitel 4.3) und dem Abgleich der Anforderungen (Kapitel 7.1) an das zu entwickelnde Modell genutzt werden. Die gewählten Kriterien mit ihren unterschiedlichen Ausprägungen sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

**Tabelle 3-2: Kriterien zur Klassifizierung des Stands der Forschung**

Kriterium	Ausprägungen
Art der Aktivität	Analyse, Synthese
Nachhaltigkeitsfokus	Ökologie, Soziales, Ökonomie, Kreisläufe
Lebenswegbetrachtung	Gewinnung von Rohstoffen und Energieträgern, Weiterverarbeitung zu Zwischenprodukten, Herstellung der Endprodukte, Nutzungsphase, Wartung und Reparatur, Deproduktion, Aufbereitung, Transportprozesse
Systembetrachtung	Geschäftsmodell, Stakeholder, Produkt, Nebenprodukte, ...
Anwendungsbereich	PEP, bestehende Produkte, Neuentwicklungen, Produktgenerationsentwicklungen, ...
Komplexität	Niedrig bis hoch
Wirkungsfokus	Positive Wirkungen, negative Wirkungen, Kompensationen

Die Einteilung der Methoden nach der **Art der Aktivität** in Analyse und Synthese ist bereits in Kapitel 2.2 und in Tabelle 3-1 thematisiert. Als weiteres Kriterium wird der **Nachhaltigkeitsfokus** aufgeführt, der bestimmt, welche der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit betrachtet werden, oder ob besonderer Fokus auf Aspekte der Kreislaufwirtschaft gelegt wird. Hierbei können auch mehrere Ausprägungen gleichzeitig im Fokus stehen. Unter dem Kriterium **Lebenswegbetrachtung** wird beschrieben welche Teile des Produktlebensweg untersucht werden. In Abgrenzung dazu bewertet die **Systembetrachtung**, ob nur das Produkt selbst oder weitere Bestandteile des

Produktsystems, wie das Geschäftsmodell, Nebenprodukte, nur ein oder mehrere Stakeholder erfasst werden. Das Kriterium **Anwendungsbereich** beurteilt, ob die jeweilige Methode im ganzen PEP, retrospektiv nur für bestehende Produktsysteme oder spezifisch für Neu- oder Produktgenerationsentwicklungen eingesetzt werden können. Außerdem kann die **Komplexität** der jeweiligen Methode eingeordnet werden, um Hinweise zu geben, wie aufwändig die Umsetzung der Methode ist und wie viel Expertenwissen dafür benötigt wird. Der **Wirkungsfokus** gibt an, ob die Methode ausschließlich positive oder negative Wirkungen betrachtet, beide kombiniert oder zusätzlich auch Maßnahmen zur Kompensation negativer Wirkungen einschließt.

In den folgenden beiden Kapiteln 3.2 und 3.3 wird der aktuelle Stand der Forschung zunächst getrennt für Analyse- und Synthesemethoden beschrieben. Dieser beschränkt sich aufgrund der großen Vielfalt an Ansätzen in beiden Bereichen auf die aktuell etabliertesten Ansätze und jene, die für das in dieser Arbeit vorgestellte Modell später notwendig sind. Im Anschluss wird gesondert auf Ansätze zur Bewertung und Erzeugung positiver Nachhaltigkeitswirkungen eingegangen (Kapitel 3.4).

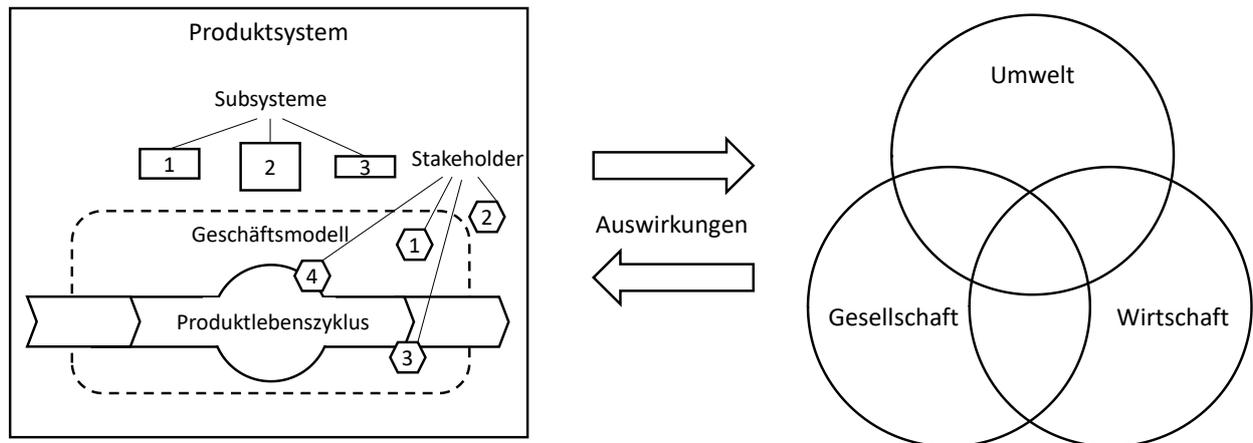
## 3.2 Analysemethoden der Nachhaltigen Produktentstehung

In diesem Kapitel wird der derzeitige Entwicklungsstand im Bereich der Analysemethoden der *Nachhaltigen Produktentstehung* vorgestellt. Nach einer kurzen Einführung werden spezifische Methoden in den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit sowie im Bezug zur Kreislaufwirtschaft beschrieben. Es folgen ganzheitliche Methoden jeweils für Produkte und Geschäftsmodelle, die die spezifischen Methoden übergreifend integrieren.

### 3.2.1 Einführung in Analysemethoden

In dieser Arbeit wird **Analyse** allgemein definiert als „die systematische Untersuchung der Eigenschaften eines Objekts durch die Zerlegung in seine Bestandteile zum Zwecke der Informationsgewinnung“ (vgl. Kapitel 2.2 und [DuBi15, PBF07]). Mit dem Fokus auf die Nachhaltigkeit von Produkten werden dabei die **Nachhaltigkeitsaspekte** des gesamten Produktsystems in den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit untersucht. Aufbauend auf [DIN15] wird als Nachhaltigkeitsaspekt ein Bestandteil eines Produkts, Systems oder Prozesses bezeichnet, der auf die Umwelt, die Gesellschaft oder die Wirtschaft einwirken kann. Innerhalb der Nachhaltigkeitsaspekte können **Auswirkungen** entstehen, die eine günstige oder ungünstige Veränderung von Umwelt, Gesellschaft oder Wirtschaft ergeben (vgl. [DIN15]). In Abbildung 3-5 sind die Wechsel- bzw. Auswirkungen des Produktsystems, das den gesamten Produktlebenszyklus, das Geschäftsmodell, alle relevanten Subsysteme und die involvierten Stakeholder beinhaltet, auf die drei Dimensionen dargestellt. Damit ist das Untersuchungsgebiet der Analysemethoden bestimmt. Mittels der verschiedenen Analysemethoden können diese Auswirkungen systematisch untersucht, quantitativ gemessen oder auch qualitativ bewertet werden [LöSH24]. Weitere Unterscheidungsmöglichkeiten für Analysemethoden sind durch die Kriterien aus Tabelle 3-1 gegeben. So gibt es spezifische Methoden für einzelne Dimensionen (vgl. Kapitel 3.2.2, 3.2.3, 3.2.4) oder für einzelne Phasen des

Produktlebenszyklus, wie beispielsweise der Produktion, oder für separate Auswirkungen, wie beispielsweise zur Bestimmung der Treibhausgasemissionen.



**Abbildung 3-5: Untersuchungsgebiet der Analysemethoden der Nachhaltigen Produktentstehung**

Wie Kapitel 3.1 zeigt, wurden im bisherigen wissenschaftlichen Diskurs eine Vielzahl eigener Definitionen und Interpretationen erarbeitet, wodurch eine Vielfalt an Termini, Begriffen und Akronymen resultiert [ALSK19, Dala14]. Unter dem Begriff der Analysemethoden werden in dieser Arbeit daher die folgenden oft parallel verwendeten deutschen und englischen Bezeichnungen zusammengefasst: Nachhaltigkeitsbewertung, Nachhaltigkeitsanalyse, Nachhaltigkeitsbilanz, Lebenszyklusanalyse, sustainability assessment, sustainability analysis, life cycle assessment, life cycle analysis, environmental impact assessment, uvm. Da im Folgenden nur auf die für diese Arbeit wichtigen Methoden eingegangen werden kann, wird an dieser Stelle auf weiterführende Literatur verwiesen. Andes et al. haben eine ausführliche „Methodensammlung zur Nachhaltigkeitsbewertung“ [ALSK19] zusammengetragen und verweisen dabei ebenfalls auf englischsprachige Literatur (siehe [BoMH13, Dala14, Fink16, Gibs17, MoPB15]).

Um eine geeignete Auswahl an Analysemethoden zu treffen, wurden verschiedene Kriterien berücksichtigt. Zum einen wird die Relevanz in der Praxis berücksichtigt, da die Methoden nicht nur in der Forschung, sondern auch für die konkrete Anwendung an Produkten von Bedeutung sein sollen. Ein weiterer zentraler Punkt ist die Fähigkeit, spezifische, detaillierte Analysen für einzelne Aspekte oder Dimensionen zu ermöglichen. Zusätzlich wurde die Auswahl der Methoden darauf ausgerichtet, auch eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung zu ermöglichen, die alle drei Dimensionen sowie Aspekte der Kreislaufwirtschaft integriert. Für die frühen Phasen des PEP werden zudem vereinfachte Analysemethoden vorgestellt, die eine schnelle und praxisorientierte Einschätzung der Nachhaltigkeitsaspekte zulassen.

### 3.2.2 Analyse ökologischer Aspekte

Die historische Betrachtung der Analysemethoden in Kapitel 3.1 verdeutlicht, dass die Untersuchung der ökologischen Aspekte im Vergleich zu den Aspekten der anderen beiden Dimensionen am längsten und folglich auch am intensivsten erforscht wurde. Sowohl der Reifegrad der Methoden als auch die Datenverfügbarkeit ist im Bereich der ökologischen Analyse am höchsten,

wie der Vergleich von Valdivia et al. [VBTS21] zeigt. Allen Methoden voran hat sich die Ökobilanz (englisch: LCA) in Forschung und industrieller Anwendung insbesondere durch die internationalen Standardisierungen durchgesetzt [Fink13]. Durch die weltweit große Akzeptanz und Verbreitung sowie die ausführliche Betrachtung aller ökologischen Aspekte eignet sich die **Ökobilanz als stellvertretende Methode** für dieses Kapitel. Weiterhin basieren auch Analysemethoden beispielsweise für soziale Aspekte auf dem prinzipiellen Vorgehen der Ökobilanz [UBMU09]. Daher werden im Folgenden die Grundlagen der Ökobilanz ausführlich beschrieben und abschließend verkürzt auf vereinfachte Analysemethoden für ökologische Aspekte eingegangen.

### **Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und 14044**

In den aktuellen Fassungen von 2021 ist die Ökobilanz in den beiden Normen der Umweltmanagementreihe „**DIN EN ISO 14040** – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen“ [DIN21a] und „**DIN EN ISO 14044** – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen“ [DIN21c] standardisiert. Diese dienen als primäre Quelle für die folgenden Beschreibungen, auch wenn zahlreiche Sekundärliteratur vorhanden ist. Da es zur Erstellung mehrere Methoden gibt, geben sie eher einen methodischen Rahmen vor, in dem passende Methoden wie der KEA [VDI97a] oder der CFP [ISO19] in Anhängigkeit der Anwendung implementiert werden können [DIN21a]. Neben Begriffsbestimmungen werden darin die Grundsätze für die Planung und Erstellung einer Ökobilanz beschrieben.

Die **Grundsätze** umfassen eine ganzheitliche Lebenswegbetrachtung, die alle Phasen eines Produkts von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung (englisch: Cradle to Grave) einschließt. Die Analyse bezieht sich ausschließlich auf Umweltaspekte und -wirkungen und verwendet einen relativen Ansatz, der auf einer definierten funktionellen Einheit basiert. Durch den iterativen Charakter werden die Ergebnisse aus den einzelnen Phasen sowohl innerhalb als auch zwischen den Phasen zusammengeführt. Transparenz ist ein weiteres Schlüsselprinzip, um die Komplexität der Ökobilanz zu bewältigen, während die Ganzheitlichkeit sicherstellt, dass alle relevanten Aspekte berücksichtigt werden. Vorzugsweise basieren Entscheidungen auf naturwissenschaftlichen Erkenntnissen, können jedoch gegebenenfalls auch auf anderen wissenschaftlichen Ansätzen oder Werthaltungen beruhen. [DIN21a]

Wie im linken Teil der Abbildung 3-6 zu sehen, besteht eine Ökobilanz-Studie aus vier iterativ durchlaufenen Phasen.

Die **vier Phasen** nach [DIN21a] sind:

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens (englisch: Goal and scope definition)
- Sachbilanz (englisch: Life cycle inventory analysis)
- Wirkungsabschätzung (englisch: Life cycle impact assessment)
- Auswertung (englisch: Life cycle interpretation)

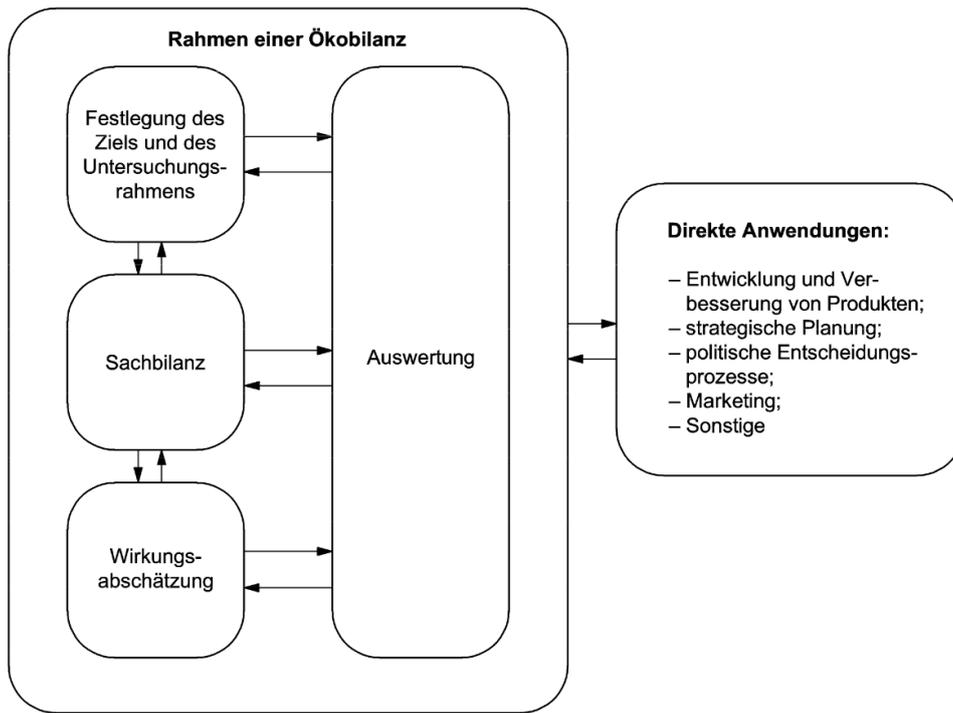


Abbildung 3-6: Phasen einer Ökobilanz [DIN21a]

Die Phase **Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens** ist grundlegend, da sie das Ziel der Studie, die angesprochene Zielgruppe und den Anwendungsbereich definiert. Der Untersuchungsrahmen umfasst wichtige Aspekte wie das zu untersuchende Produktsystem, die funktionelle Einheit, die Systemgrenze und die Anforderungen an die Datenqualität. Die funktionelle Einheit quantifiziert dabei die Leistungskennwerte des Produkts, um die betrachteten Auswirkungen später mit anderen Produkten vergleichbar zu machen. Die Systemgrenze legt die Prozessmodule fest, die in das Modell des Produktsystems einbezogen werden, wobei möglichst umfassend die jeweiligen Lebenswegabschnitte, Prozesse und Flüsse berücksichtigt werden sollten. [DIN21a]

Die **Sachbilanz** ist die nächste Phase, die die Datenerhebung und Berechnungsverfahren zur Quantifizierung der relevanten Input- und Outputflüsse eines Produktsystems umfasst. Dabei ist der Prozess iterativ, da während der Datensammlung und der Untersuchung des Systems neue Anforderungen oder Einschränkungen erkannt werden können, die eine Anpassung der Datenerhebung erfordern. Die Datenerhebung umfasst eine Vielzahl von Inputs und Outputs, darunter Energie, Rohstoffe, Produkte, Abfälle und Emissionen, die in Hauptgruppen unterteilt werden können. Dieser Prozess kann aufgrund praktischer Einschränkungen zeitaufwendig sein, folglich sollten diese Einschränkungen im Untersuchungsrahmen und im Bericht zur Studie dokumentiert werden. Nach der Datenerhebung sind Berechnungsverfahren erforderlich, um die Ergebnisse der Sachbilanz für jedes Prozessmodul und die festgelegte funktionelle Einheit des zu modellierenden Produktsystems zu erhalten. Die Allokation von Flüssen und Emissionen ist dabei eine weitere Herausforderung, da Betriebsabläufe oft mehrere Produkte hervorbringen oder Zwischenprodukte und Rückstände verwenden, was die Notwendigkeit von Allokationsverfahren bei der Bewertung solcher Systeme einschließt. Unter Allokation wird hierbei die „Zuordnung der

Input- oder Outputflüsse eines Prozesses oder eines Produktsystems zum untersuchten Produktsystem und zu einem oder mehreren anderen Produktsystemen“ [DIN21a] verstanden. [DIN21a] Die Phase der **Wirkungsabschätzung** zielt darauf ab, die potenziellen Umweltauswirkungen anhand der Ergebnisse der Sachbilanz zu bewerten. Hierbei werden Sachbilanzdaten mit spezifischen Wirkungskategorien und -indikatoren verknüpft, um potenzielle Wirkungen auf die Umwelt zu erkennen. Diese Phase liefert auch Informationen für die Auswertung der Ökobilanz und kann eine iterative Überprüfung des Ziels und Untersuchungsrahmens beinhalten, um sicherzustellen, dass die Ziele der Studie erreicht werden. Transparenz ist in dieser Phase entscheidend, da subjektive Elemente wie die Auswahl, Modellierung und Bewertung der Wirkungskategorien in die Phase der Wirkungsabschätzung einfließen. Die Wirkungsabschätzung beinhaltet die verbindlichen Bestandteile Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen, die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den ausgewählten Wirkungskategorien (Klassifizierung) und die Berechnung der Wirkungsindikatorwerte (Charakterisierung). Das Konzept, wie aus den Ergebnissen der Sachbilanz Wirkungen abgeschätzt werden, ist in Abbildung 3-7 dargestellt. Optional können die berechneten Wirkungsindikatorwerte im Verhältnis zu einem oder mehreren Referenzwerten normiert, geordnet oder gewichtet werden. [DIN21a]

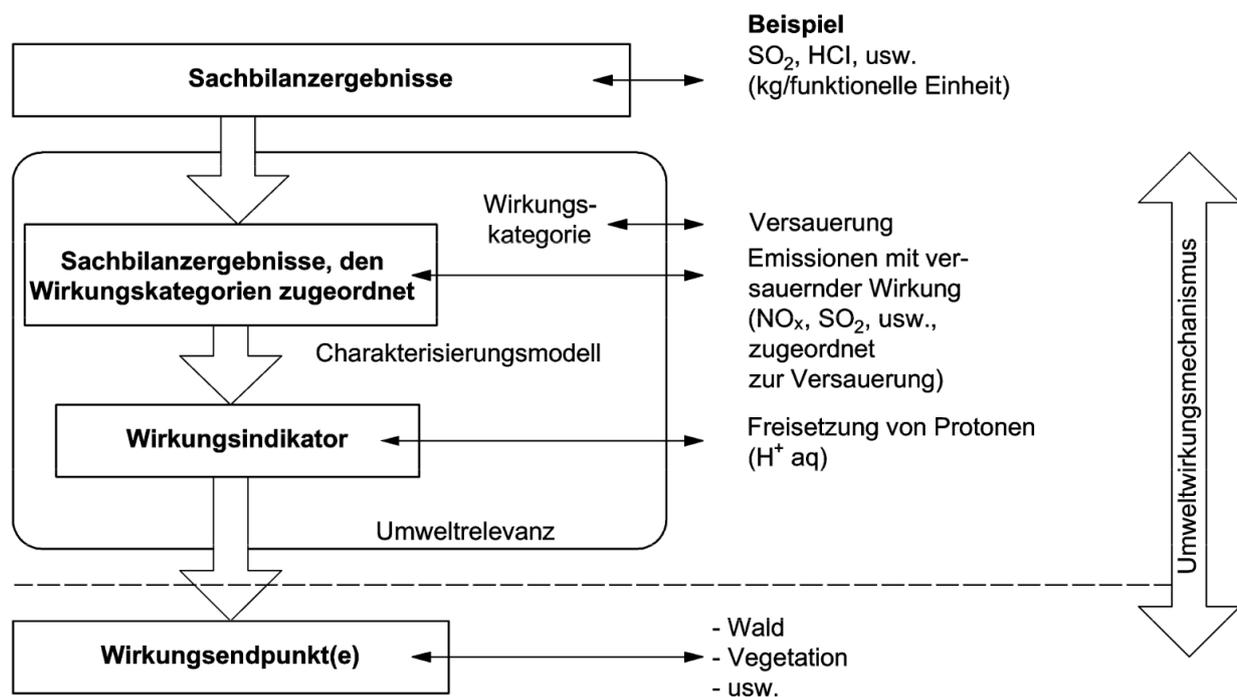


Abbildung 3-7: Konzept der Wirkungsindikatoren [DIN21c]

Zur Veranschaulichung der Begriffe ist in Tabelle 3-3 ein ausführliches Beispiel für die Wirkungskategorie der Klimaänderung gegeben.

Tabelle 3-3: Begriffsbeispiele der Phase Wirkungsabschätzung nach [DIN21c]

Begriff	Beispiel
Wirkungskategorie	Klimaänderung
Sachbilanzergebnisse	Menge an Treibhausgas je funktioneller Einheit
Charakterisierungsmodell	Szenario „Baseline“ über 100 Jahre des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change)
Wirkungsindikator	Verstärkung der Infrarotstrahlung (W/m <sup>2</sup> )
Charakterisierungsfaktor	Treibhauspotential (GWP100) für jedes Treibhausgas (kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente/kg Gas)
Wirkungsindikatorwert	Kilogramm der CO <sub>2</sub> -Äquivalente je funktioneller Einheit
Wirkungsendpunkte	Korallenriffe, Wälder, Ernten
Umweltrelevanz	Die Verstärkung der Infrarotstrahlung steht stellvertretend für mögliche Wirkungen auf das Klima, die von der integrierten atmosphärischen Wärmeaufnahme, hervorgerufen durch Emissionen und die Verteilung über die Dauer der Wärmeaufnahme, abhängen.

Da die Wirkungsabschätzung ein eigenes Forschungsgebiet darstellt und zahlreiche Modelle für die einzelnen Bestandteile der Wirkungsabschätzung bestehen, wird an dieser Stelle auf weiterführende Literatur der LCI [UnLi16, UnLi19], der ISO/TR 14047 [ISO12] und auf das ILCD-Handbook der Europäischen Kommission [Comm11] hingewiesen. Die vorhandenen Modelle zur Wirkungsabschätzung definieren die einzelnen Wirkungskategorien zum Teil unterschiedlich und gewichten diese individuell, wie Fallstudien zum Vergleich der Modelle zeigen [KoFM23, RyJe24].

Als ein Beispiel, das in der bestehenden Literatur und in der industriellen Praxis häufig Anwendung findet, sind die **Wirkungskategorien der Wirkungsabschätzungsmethode „ReCiPe2016“** [HSES16, HSES17] angegeben und frei ins Deutsche übersetzt:

- Klimaänderung (Climate Change)
- Ozonabbau in der Stratosphäre (Stratospheric ozone depletion)
- Ionisierende Strahlung (Ionising radiation)
- Bildung von Feinstaub (Fine particulate matter formation)
- Photochemische Ozonbildung (Photochemical oxidant formation)
  - Effekte auf terrestrische Ökosysteme (Terrestrial ecosystems)
  - Effekte auf menschliche Gesundheit (Human health)
- Terrestrische Versauerung (Terrestrial acidification)
- Frischwasser Eutrophierung (Freshwater eutrophication)
- Humantoxizität (Human toxicity)
  - Karzinogene Effekte (Cancer)
  - Nicht-karzinogene Effekte (Non-cancer)

- Ökotoxizität (Ecotoxicity)
  - Terrestrisch (Terrestrial)
  - Frischwasser (Freshwater)
  - Marin (Marine)
- Landnutzung (Land use)
- Wassernutzung (Water Use)
- Ressourcenverknappung (Resource scarcity)
  - Mineralisch (Mineral)
  - Fossil (Fossil)

Die Diversität der Wirkungskategorien zeigt die Komplexität der Wirkungsabschätzung und deren Tragweite, die über das Fachgebiet der Produktentstehung hinaus in Fachgebiete wie Biologie, Chemie und Medizin reicht.

In der abschließenden Phase der **Auswertung** werden die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung zusammen betrachtet. Diese Phase soll Ergebnisse liefern, die mit dem festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen übereinstimmen und zur Ableitung von Schlussfolgerungen, Erläuterung von Einschränkungen und Aussprechen von Empfehlungen dienen. Es ist wichtig zu betonen, dass die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung potenzielle Umweltauswirkungen anzeigen, jedoch keine tatsächlichen Auswirkungen vorhersagen. Die Auswertung soll somit eine leicht verständliche, vollständige und konsistente Darstellung der Ergebnisse der Ökobilanz bieten, die auf dem iterativen Prozess der Prüfung und Überarbeitung des Untersuchungsrahmens basiert und die dem festgelegten Ziel entspricht. [DIN21a]

Neben der Beschreibung der vier Phasen enthalten die beiden Normen 14040 und 14044 Hinweise zur normgerechten Berichterstattung und zu „Kritischen Prüfung“ von Ökobilanzen. In der Praxis werden Ökobilanzstudien in vielen Bereichen durchgeführt, die über die Analyse von produktbezogenen Systemen hinaus gehen, also auch in anderen Branchen bei der Bewertung von Gebäuden oder landwirtschaftlichen Projekten Anwendung finden [AFLS21]. Sie hat sich dabei weltweit als Standardinstrument für die Analyse, Bewertung und Beurteilung von Produkten etabliert und wird auch auf politischer Ebene als bestes verfügbares Rahmenwerk empfohlen [AFLS21]. Zur Unterstützung bei der meist komplexen Durchführung und Datenanalyse stehen mittlerweile zahlreiche Softwaretools und teils branchenspezifische Datenbanken zur Verfügung, wie eine Zusammenstellung des Joint Research Centre der EU von 2014 zeigt [Join15]. Eine weitere aktuelle Auflistung ist in der Toolbox [TiMo23] von Tischner und Moser zu finden. Da die vollständige Durchführung einer Ökobilanz inklusive der „Kritischen Prüfung“ komplex und zeitaufwendig ist, haben sich auch vereinfachte Methoden etabliert.

### **Vereinfachung von Analysemethoden**

Zur Vereinfachung der umfassenden Analyse und Bewertung von Ökobilanzstudien bieten sich mehrere Möglichkeiten an [BeBW20], die einzeln oder gleichzeitig angewendet werden können. Eine der häufigsten Vereinfachungen besteht in der **reduzierten Betrachtung der Wirkungen**, bei

der der Fokus oft nur auf einem ökologischen Aspekt des Produktlebenszyklus liegt, wie beispielsweise der Energie bei der Berechnung des KEA [VDI97a], während andere Aspekte bzw. Wirkungen gänzlich vernachlässigt werden. Weitere standardisierte Verfahren, die nur eine Wirkung betrachten, sind beispielsweise der CFP [BSI08, ISO19] oder der WFP [DIN16]. Ähnlich können auch eine oder mehrere **Phasen des Produktlebenszyklus** außer Acht gelassen werden und beispielsweise nur die Nutzungsphase betrachtet werden. Ein Beispiel hierfür wäre die Betrachtung des Kraftstoffverbrauchs und der damit verbundenen Emissionen von Kraftfahrzeugen in der „Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure“ (WLTP) [Unec21]. Außerdem kann die **Systembetrachtung** vereinfacht werden, indem nicht das ganze Geschäftsmodell, sondern nur das reine Endprodukt oder gar nur einzelne Bestandteile untersucht werden. So wird bei MIPS [Schm94] einzig der Materialeinsatz für ein Produkt betrachtet. Statt alle Sachbilanzdaten quantitativ zu erheben und in einer Wirkungsabschätzung qualitativ zu bewerten, kann auch eine reine quantitative Erhebung oder eine **rein qualitative Bewertung** anhand von Checklisten oder mittels Expertenbefragungen durchgeführt werden. Diese starken Vereinfachungen sind in allen drei Dimensionen grundsätzlich durchführbar, wobei die Betrachtung nur einer Dimension selbst schon eine reduzierte Betrachtung der Nachhaltigkeitsaspekte darstellt. Dennoch können diese Simplifizierungen der sonst aufwändigen Analyse sinnvoll sein, insbesondere wenn es darum geht, zunächst die kritischsten Aspekte eines Produktsystems zu identifizieren. In den frühen Phasen des PEP stehen (vor allem bei Neuentwicklungen) üblicherweise noch nicht genügend Eigenschaften des zu entwickelnden Produkts fest, um dieses gänzlich analysieren zu können. Um zu Beginn des PEP, also bereits von der Produktplanung an, die ökologischen Aspekte von Produktsystemen bereits im Vorfeld abschätzen zu können, haben sich Checklisten als zweckmäßig erwiesen.

### ***EcoDesign-Checklist von ecoconcept***

Aufbauend auf den Zielen des Ecodesign [BrVa97, Dewb96, ISO02] versuchen die Ecodesign-Checklisten in vereinfachter Form alle ökologisch relevanten Aspekte eines Produktsystems in qualitativer Form abzufragen. Da das Ecodesign selbst in Kapitel 3.3.2 ausführlich beschrieben ist, wird hier nur auf den analytischen Charakter der „EcoDesign-Checkliste von ecoconcept“ nach Tischner et al. [TiMo23, TSRP00] eingegangen, die Abbildung 3-8 nachgebildet ist.

Sie unterteilt sich nach den **verschiedenen Phasen im Produktlebenszyklus** wie Rohstoffgewinnung und Herstellung, Gebrauch/Nutzen, Re-Use/Recycling und Entsorgung. Innerhalb jeder Phase werden bestimmte **Aspekte qualitativ** (gut gelöst, mittelmäßig, schlecht gelöst, nicht relevant) **bewertet**, darunter Materialeinsatz, Energieverbrauch, Schadstoffausstoß, Recyclingfähigkeit und Umweltfreundlichkeit. Die Checkliste ermöglicht eine systematische, wenn auch vereinfachte, Bewertung von Produktsystemen über den gesamten Lebenszyklus und dient dazu, frühzeitig Maßnahmen zu identifizieren, um Umweltauswirkungen zu minimieren. Sie stellt außerdem alternative Strategien wie Langlebigkeit oder Kurzlebigkeit zur Diskussion.

Bezeichnung des Produktes/Projekts:				
Getroffene Bewertung ankreuzen: + = gut gelöst, ± = mittelmäßig, - = schlecht gelöst, o = nicht relevant				
<b>Rohstoffgewinnung, Rohstoffauswahl</b>	<b>+</b>	<b>±</b>	<b>-</b>	<b>o</b>
· Materialeinsatz minimieren				
· Energieeinsatz minimieren				
· Flächennutzung (Rohstoffgewinnung, Produktionsanlagen) minimieren				
· Schadstoffeinsatz/-ausstoß vermeiden				
· Emissionen vermeiden (z.B. durch Transporte)				
· Abfälle minimieren und im Kreislauf führen				
· Rohstoffe aus naheliegenden Gebieten bevorzugen				
· Ökologisch nachhaltige, nachwachsende Rohstoffe einsetzen				
· Rohstoffe einsetzen, die sozial und gesundheitlich unbedenklich sind				
· bereits rezyklierte Werkstoffe bevorzugen				
<b>Herstellung, Veredelung</b>	<b>+</b>	<b>±</b>	<b>-</b>	<b>o</b>
· Materialeinsatz minimieren				
· Energieeinsatz minimieren				
· Flächennutzung minimieren				
· Schadstoffeinsatz/-ausstoß vermeiden				
· Emissionen vermeiden (z.B. durch Verarbeitungsprozesse)				
· Prozessabfälle minimieren und im Kreislauf führen				
· naheliegende Lieferanten und Vorlieferanten bevorzugen				
· Verpackungsaufwand minimieren				
· ökologisch nachhaltige, nachwachsende Hilfsstoffe (z.B. Farbstoffe) bevorzugen				
· Prozesse einsetzen, die sozial und gesundheitlich unbedenklich sind				
<b>Gebrauch/Nutzen</b>	<b>+</b>	<b>±</b>	<b>-</b>	<b>o</b>
· hohe Wertschöpfung beim Nutzer erzeugen				
· zielgruppengerecht gestalten				
· Retouren, Reklamationen minimieren				
· Serviceangebote bereithalten				
<i>Folgende alternative Strategien sind zu diskutieren</i>				
<b>· Langlebigkeit (Strategie 1)</b>				
· amodische Gestaltung				
· Lebensdauergarantie				
· Robustheit, Zuverlässigkeit, geringe Verschleißanfälligkeit				
· Reparierbarkeit, Instandhaltungsmöglichkeit				
· Kombinationsmöglichkeiten				
· Variabilität, Multifunktionalität				
· Möglichkeit des mehrfach- und Gemeinsam-Nutzens				
· Anpassungsfähigkeit an technischen Fortschritt				
<i>oder</i>				
<b>· Kurzlebigkeit (Strategie 2)</b>				
· modische Gestaltung				
· Rücknahmeverpflichtung				
· Recyclingfähigkeit				
· umweltschonende Entsorgbarkeit, z.B. abbaubar, kompostierbar				
· Verständlichkeit des Produktes für den Nutzer				
· Selbstkontrolle und Optimierungsfunktionen, Fehlerfreundlichkeit				
· Verschmutzungsanfälligkeit, Reinigungsfreundlichkeit				
· minimaler Material- und Energieeinsatz im Gebrauch				
· geringer Schadstoffeinsatz/-ausstoß				

Re-Use/Recycling (technische Kreisläufe schließen)	+	±	-	o
· Recyclingstrategie vorhanden?				
· Produktrücknahmegarantie vorhanden?				
· Re-Use von gesamten Artikel (z.B. Second-Hand, Kaskadennutzung)				
· Recycling von Teilen (z.B. Aufarbeitung, Wiedereinsatz von Komponenten)				
· Recycling des Materials				
· Zerlegbarkeit des Produktes				
· Trennbarkeit unterschiedlicher Materialien				
· Materialvielfalt gering				
· geringer Material-, Energieverbrauch für Re-Use/Recycling				
Entsorgung	+	±	-	o
· Kompostierbarkeit, Vergärbarkeit (natürliche Kreisläufe schließen)				
· Verbrennungseigenschaften				
· Umwelteinfluss bei Deponierung				

Abbildung 3-8: EcoDesign-Checkliste von ecoconcept [TiMo23, Tisc00]

**MET-Matrix nach Brezet und van Hemel**

Eine einfachere Form besteht in der MET-Matrix [BrVa97] nach Brezet und van Hemel, wobei MET für „material cycles, energy use and toxic emissions“ steht. Sie fokussiert, wie in Abbildung 3-9 zu sehen, die drei Umweltaspekte **Materialkreisläufe** (In- und Outputs des Produktsystems), **Energienutzung** (In- und Outputs des Produktsystems) und das **Freisetzen toxischer Emissionen**. Die Matrix spannt eine Tabelle der drei Aspekte über sieben Phasen des Produktlebenszyklus auf, wodurch 21 freie Felder entstehen, in denen beispielsweise Auswirkungen oder Verbesserungspotentiale für das jeweilige Produktsystem eingetragen werden können. Dabei kann sowohl eine qualitative Bewertung oder auch eine quantitative Beschreibung der ökologischen Aspekte erfolgen, da dem Anwender keine genaueren Vorgaben hierzu gemacht werden. Daher gilt die MET-Matrix als schnell und einfach anwendbar.

MET-Matrix		Material Input/Output	Energie Input/Output	Tox. Emissionen Output
Herstellung und Lieferung von Materialien und Komponenten				
Eigene Produktion				
Vertrieb und Transport				
Nutzung	Betrieb			
	Wartung			
End-of-life	Recycling			
	Beseitigung			

Abbildung 3-9: MET-Matrix nach [BrVa97] (frei übersetzt)

### **Materiallisten und -datenbanken**

Eine noch simplere Analyse kann rein auf der Ebene der im Produktsystem eingesetzten Materialien durchgeführt werden. Hierbei werden die genutzten oder geplanten Materialien bzw. Werkstoffe aufgelistet und im Anschluss mit bestehenden Listen aus der Literatur oder beispielsweise aus gesetzlichen Vorgaben abgeglichen. Es existieren dazu branchen- und produktspezifische Listen aus verschiedenen Fachbereichen, die grundsätzlich in zu vermeidende und zu verwendende Materiallisten unterteilt werden können. So enthält die sogenannte REACH-Verordnung [Euro06] eine Liste gefährlicher Stoffe, Gemische und Erzeugnisse, deren Herstellung, Inverkehrbringen und Verwendung in der EU beschränkt bzw. verboten ist. Sie kann daher auch als „**Negativliste**“ bezeichnet werden. Komplementär dazu existieren sogenannte „**Positivlisten**“, die geprüfte, umweltfreundliche oder nicht gesundheitsschädliche Materialien enthalten, wie beispielsweise die „Positivliste der trinkwasserhygienisch geeigneten metallenen Werkstoffe“ [BuBu20], welche als Ergänzung zur deutschen Trinkwasserverordnung dient. Die Analyse anhand solcher Listen setzt jedoch die Verfügbarkeit passender Listen für den produktspezifischen Einsatz voraus und schränkt den Umfang einer umfassenden ökologischen Analyse erheblich ein. Weiterhin besteht die Möglichkeit die produktspezifische Materialliste mit **Materialdatenbanken**, wie beispielsweise von Ansys Inc. [Ansy20], abzugleichen um daraus materialspezifische und durchschnittliche ökologische Auswirkungen abzuleiten.

### **Weiterführende Literatur**

Folgende Ansätze bieten weitere Einblicke in die Analyse ökologischer Aspekte, werden aber aufgrund der starken Überschneidung zu den präsentierten Methoden nicht weiter erörtert:

- Environmental Footprint [Euro21, MAPS10]
- VERUM - Vereinfachte Umweltbewertung des Umweltbundesamtes [BFMK17]
- MIPS – Materialinput pro Serviceeinheit [Schm94]
- ISO 14046 - Wasser-Fußabdruck [DIN16]
- ISO 14067 - Carbon Footprint von Produkten [ISO19]
- VDI 4600 - Kumulierter Energieaufwand [VDI97a]

### 3.2.3 Analyse sozialer Aspekte

Die Untersuchung der sozialen Aspekte, also der Auswirkungen von Produktsystemen auf die Gesellschaft, stellt einen wichtigen Teil der ganzheitlichen Nachhaltigkeitsanalyse dar, wenn sie auch gleichzeitig vor mehreren Herausforderungen steht. Die Größe und Komplexität der meist globalen Lieferketten von heutigen Produkten erschweren eine vollständige Überwachung dieser. Dabei variieren die rechtlichen Vorschriften, sozialen Standards und der kulturelle Kontext zum Teil erheblich in den verschiedenen Regionen dieser Erde. Insbesondere bei komplexen Produkten ist es mitunter schwierig alle beeinflussten Personen und Interessensgruppen sowie deren subjektive Sicht zu erfassen. Als ausführlichste Methode wird dazu analog zur Ökobilanz zunächst das „Social Life Cycle Assessment“ erläutert. Anschließend werden die Einhaltung der ILO-Standards und die Zertifizierung nach SA8000 thematisiert sowie vereinfachte sogenannte Hot-spot- und Risikoanalysen vorgestellt.

#### **S-LCA: Social Life Cycle Assessment**

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, veröffentlichte die UNEP im Rahmen der LCI 2009 und 2020 Richtlinien zur Durchführung eines S-LCA. Eine internationale Standardisierung in Form einer Norm ist während der Erstellung dieser Arbeit noch nicht verfügbar, befindet sich aber mit der „ISO/DIS 14075 - Environmental management — Principles and framework for social life cycle assessment“ [ISO24c] in der Entwurfsphase. Dieser Entwurf baut auf den Richtlinien der UNEP und dem genormten Vorgehen der Ökobilanz auf. Die aktuelle Fassung der „Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations“ [UBSL20] dient daher im Folgenden als vorrangige Quelle zur Beschreibung der Methode. Darin wird das S-LCA als ein Verfahren beschrieben, das darauf abzielt, soziale und sozioökonomische Aspekte von Produkten sowie deren positive und negative Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu analysieren und zu bewerten. Der systematische Bewertungsrahmen baut dabei auf der Vorgehensweise der Ökobilanz auf und kombiniert diese mit Methoden der Sozialwissenschaften. Analog zur ISO 14040 [ISO06b] werden **vier Phasen** (Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, Bilanz der sozialen Aspekte, Wirkungsabschätzung, Auswertung) iterativ mit Fokus auf soziale Aspekte durchlaufen. Die Methode verfolgt dabei einen Stakeholder-Ansatz. Die ISO 26000 definiert **Stakeholder** als „Einzelperson oder Gruppe, die ein Interesse an den Aktivitäten oder Entscheidungen einer Organisation hat“ [ISO10]. Diese weit gefasste Definition versucht alle Personen und Interessensgruppen, die durch das Produktsystem betroffen oder beeinflusst werden, zu inkludieren. In [UBSL20] werden die Stakeholder in sechs Kategorien (Tabelle 3-4) eingeteilt, wobei im Einklang mit dem Ziel und Untersuchungsrahmen auch weitere Kategorien definiert oder bestehende Kategorien genauer unterteilt werden können.

Zu den vorgeschlagenen Stakeholdern zählen zunächst die **Arbeitnehmer**, die im Produktsystem beschäftigt sind, beispielsweise in der Produktion des untersuchten Produkts. Zur **lokalen Bevölkerung** zählen Personen, die nicht direkt am Produktlebenszyklus beteiligt sind, jedoch beispielsweise in der Nähe einer Produktionsstätte wohnen und dadurch beeinflusst werden können. Die

**Konsumenten** bzw. Nutzer des Produkts bilden eine weitere Kategorie, wohingegen in der Kategorie **Gesellschaft** die Auswirkungen auf die Gesamtgesellschaft zum Beispiel auf nationaler Ebene untersucht werden. Aufgrund des besonderen Schutzbedürfnisses erhalten **Kinder** eine separate Stakeholder-Kategorie. Die restlichen **Akteure der Wertschöpfungskette** werden in der sechsten Kategorie zusammengefasst. Für jede der aufgeführten Gruppen sind spezifische Wirkungskategorien vordefiniert, wie in Tabelle 3-4 zu sehen. Auch diese können je nach S-LCA erweitert werden und dienen als mögliche Untersuchungspunkte der Analyse. [UBSL20]

**Tabelle 3-4: S-LCA Stakeholder mit jeweiligen Wirkungskategorien nach [UBSL20] (frei übersetzt)**

Stakeholder-Kategorien	Arbeitnehmer	Lokale Bevölkerung	Akteure der Wertschöpfungskette (exkl. Konsumenten)	Konsumenten	Gesellschaft	Kinder
Wirkungskategorien	Vereinigungsfreiheit & gewerkschaftliche Tarifverhandlungen	Zugang zu materiellen Ressourcen	Fairer Wettbewerb	Gesundheit & Sicherheit	Öffentliche Verpflichtungen zu Nachhaltigkeitsthemen	Bildung in der lokalen Gemeinschaft
	Kinderarbeit	Zugang zu immateriellen Ressourcen	Förderung der sozialen Verantwortung	Feedback-möglichkeiten	Beitrag zur wirtschaftlichen Entwicklung	Gesundheitsrisiken für Kinder als Konsumenten
	Faires Gehalt	Delokalisierung und Migration	Lieferanten-verhältnisse	Privatsphäre der Konsumenten	Vorbeugung und Vermeidung von bewaffneten Konflikten	Bedenken ggü. Kindern hinsichtlich der Marketingpraktiken
	Arbeitszeiten	Kulturelles Erbe	Wahrung der Rechte an geistigem Eigentum	Transparenz	Technologie-entwicklung	
	Zwangsarbeit	Sichere & gesunde Lebensbedingungen	Wohlstandsverteilung	Verantwortung am EoL des Produkts	Korruption	
	Gleichberechtigung & Diskriminierung	Wahrung der Rechte indigener Völker			Ethische Behandlung von Tieren	
	Gesundheit & Sicherheit	Gemeinschaftliches Engagement			Armutsbekämpfung	
	Sozialleistungen & soziale Sicherheit	Lokale Beschäftigungsquote				
	Beschäftigungsverhältnis	Stabile Lebensbedingungen				
	Sexuelle Belästigung					
	Kleinbauern einschl. Landwirte					

Prinzipiell werden in [UBSL20] zwei verschiedene Vorgehensweisen in der Phase der Wirkungsabschätzung vorgestellt, die sich wie folgt unterscheiden:

- **Typ I: Referenzskala-Ansatz** (englisch: Reference Scale Approach)  
**Ziel:** Beschreibung der sozialen Leistung des Produktsystems auf Grundlage spezifischer Referenzpunkte
- **Typ II: Wirkungspfad-Ansatz** (englisch: Impact Pathway Approach)  
**Ziel:** Vorhersage und Beschreibung potenzieller sozialer Risiken des Produktsystems auf Basis von Ursache-Wirkungs-Beziehungen

Analog zur ökologischen Analyse stellt die Wirkungsabschätzung einen kritischen Punkt im Rahmen des S-LCA dar, was die Nutzung ergänzender Literatur wie beispielsweise dem „Product Social Impact Assessment Handbook“ [GoAU20] empfiehlt [FTTB18]. Bei der Durchführung können unterschiedliche Arten von Daten genutzt werden, wobei sowohl qualitative als auch quantitative Daten erhoben werden können. Die Verwendung von generischen Daten aus Statistiken

oder Datenbanken für spezifische Länder und Regionen oder vergleichbare Produkte führt, ähnlich zur Ökobilanz, zu ungenaueren Ergebnissen, ist jedoch schneller und einfacher anwendbar. Die Erhebung von unternehmens- oder standortspezifischen Daten bedeutet einen höheren Aufwand, liefert aber deutlich validere Ergebnisse. [UBSL20]

Da durch ein Produktsystem sehr viele Stakeholder beeinflusst werden können, ist eine vollständige Erfassung aller sozialen Wirkungen aller betroffenen Einzelpersonen meist nicht durchführbar. Daher besteht auch in der Analyse sozialer Aspekte die Möglichkeit, eine vereinfachte Risikoanalyse auf Basis von Datenbanken mit generischen Daten durchzuführen, wie weiter unten beschrieben.

### ***ILO-Kernarbeitsnormen und SA8000***

Eine weitere Grundlage zur Analyse sozialer Aspekte von Produktsystemen bieten die „ILO-Kernarbeitsnormen“ [Inte22] und der darauf basierende Standard zur entsprechenden freiwilligen Zertifizierung von Unternehmen nach „SA8000“ [Soci14]. Hierbei ist zu verdeutlichen, dass diese nicht zur Analyse von Produktsystemen erstellt wurden. Menschliche Arbeit leistet jedoch einen wesentlichen Beitrag zur Entstehung von Produktsystemen und steht daher im besonderen Fokus bei der Analyse sozialer Aspekte (vgl. Stakeholder-Kategorie „Arbeitnehmer“ des S-LCA).

Die **ILO-Kernarbeitsnormen** erklären grundlegende Rechte und Pflichten bei der Arbeit und behandeln die fünf Grundprinzipien „Vereinigungsfreiheit und Recht auf Kollektivverhandlungen, Beseitigung der Zwangsarbeit, Abschaffung der Kinderarbeit, Verbot der Diskriminierung in Beschäftigung und Beruf, Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit“ [Inte22]. Wie zuvor in Kapitel 3.1.2 erwähnt, kann die Einhaltung der international anerkannten ILO-Kernarbeitsnormen als Mindestmaß einer sozial nachhaltigen Wertschöpfung angesehen werden. Daher sollten in einem nachhaltigen Produktsystem nur Unternehmen beteiligt sein, die diese grundlegenden Arbeitsrechte einhalten.

Zur Überprüfung der Einhaltung dient der **Zertifizierungsstandard SA8000** [Soci14] der gemeinnützigen Organisation SAI. Mit diesem freiwilligen Standard können sich Unternehmen inklusive ihrer Lieferketten durch Dritte in neun Anforderungen zertifizieren. Dazu gehören das Verbot von Kinderarbeit (1) und Zwangs- oder Pflichtarbeit (2), die Gewährleistung von Gesundheitsschutz und Sicherheit (3) am Arbeitsplatz sowie die Anerkennung der Vereinigungsfreiheit und des Rechts auf Tarifverhandlungen (4) [Soci14]. Des Weiteren müssen Unternehmen Diskriminierung (5) am Arbeitsplatz verhindern, angemessene Disziplinarmaßnahmen (6) sicherstellen, die Arbeitszeit (7) einhalten, eine angemessene Vergütung (8) gewähren und ein effektives Managementsystem (9) zur Umsetzung dieser Anforderungen implementieren [Soci14]. Im Rahmen der Analyse sozialer Nachhaltigkeitsaspekte bieten diese Anforderungen mit den jeweiligen Subkriterien eine mögliche Grundlage zur Beurteilung der Situation der Arbeitnehmer eines Produktsystems.

### **Risikoanalyse auf Basis von Datenbanken**

Datenbanken mit generischen Daten bieten ebenfalls eine Möglichkeit, um insbesondere in frühen Phasen des PEP oder bei der Planung von Lieferketten, erste Abschätzungen für das Risiko von negativen sozialen Auswirkungen machen zu können. Das „**Social Impact Audit Tool**“ aus dem Granta EduPack ([ABVV21, VaAs20]) bietet eine vereinfachte Analyse auf Basis von länderspezifischen Daten. Anhand der ersten Version der „Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products“ [UBMU09] von 2009 werden darin Daten für über 200 Länder in Form von 30 Indikatoren für fünf Stakeholder-Kategorien zur Verfügung gestellt. Da die Indikatoren zwischen 1 (wenig gute Praxis) und 100 (schlechte Praxis) skaliert sind, lässt sich dadurch eine „**Social hotspot analysis**“ durchführen [ABVV21]. Durch das Auswählen der am Produktsystem beteiligten Nationen und das Festlegen eines Schwellenwerts, können somit länderspezifische Risiken zum Beispiel für Zwangsarbeit identifiziert werden. Dadurch lassen sich keine realen sozialen Aspekte ermitteln. Jedoch können solche länderspezifische Daten dabei helfen, ein besonderes Augenmerk auf potenzielle soziale Risiken im PEP zu legen. Die Indikatoren basieren teilweise auf frei verfügbaren Datenbanken und Statistiken der ILO [Inte24a], der OECD [Orga24], der Weltbank [Worl24a] oder der UN [Unit24a].

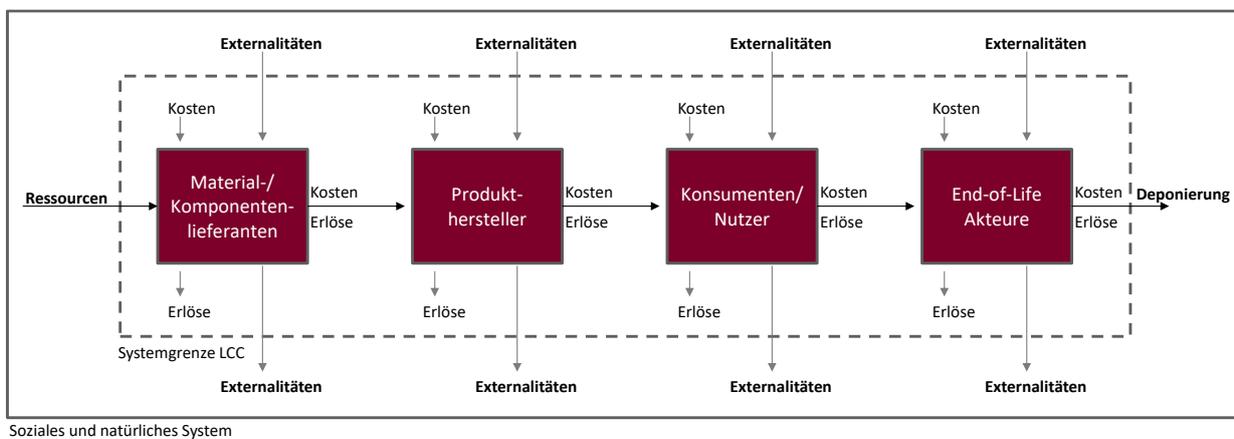
Außerdem bestehen weitere kommerzielle Datenbanken wie beispielsweise die Social Hotspots Database (SHDB) [Shdb24] oder Product Social Impact Life Cycle Assessment (PSILCA) [Gree24], die speziell zur Durchführung eines S-LCA oder zur Umsetzung der Sorgfaltspflicht in Lieferketten bereit stehen. Diese Datenbanken können außerdem in LCA-Software implementiert werden, um Hinweise für potenzielle Risiken während der Durchführung einer Ökobilanz zu geben.

#### **3.2.4 Analyse ökonomischer Aspekte**

Die Analyse ökonomischer Nachhaltigkeitsaspekte stellt, wie in Kapitel 2.1.4 beschrieben, aufgrund der unklaren Definition ökonomischer Nachhaltigkeit und der starken Wechselwirkungen mit den anderen Dimensionen eine bislang nicht vollständig gelöste Herausforderung dar. Ein Bestandteil im Sinne der Definition des Brundtland-Bericht ist die **langfristige Beständigkeit** von Wirtschaftssystemen. Daraus ergibt sich aus Unternehmensperspektive, dass Produkte so gestaltet werden müssen, dass ihre **Einnahmen die entstehenden Kosten übersteigen**. Da eine umfassende Betrachtung des Kostenmanagements nicht im Fokus dieser Arbeit liegt, wird an dieser Stelle auf weiterführende Literatur, wie von Ehrlenspiel et al. [EKLM14] oder Kremin-Buch [Krem07], verwiesen. Die **Analyse der Lebenszykluskosten eines Produkts** (englisch: **Life Cycle Costing**) bildet darin und in der Nachhaltigkeitsbewertung eine wichtige Bewertungsgrundlage [HuRe03, Norr01]. Zur Durchführung einer Analyse mittels LCC existieren vielfache Ansätze für bestimmte Lebenszyklusphasen oder verschiedene Anwendungsbereiche in der Forschung [Dura02] sowie auch mehrere Normen und Standardisierungen wie [DIN05b, DIN13, VDI05]. Da kein allgemeingültiger Standard existiert [VDI05], werden im Folgenden die generischen Grundlagen des umfassenden LCC erläutert und daraufhin auf vereinfachte Kostenabschätzungen eingegangen.

### LCC: Life Cycle Costing

LCC ist eine Methode zur umfassenden Bewertung der Gesamtkosten eines Produkts über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg, mit dem Ziel, die langfristigen finanziellen Auswirkungen eines Produkts zu verstehen und zu analysieren. Wie in Abbildung 3-10 zu sehen, bieten Rebitzer und Hunkeler [ReHu03] ein **konzeptionelles Rahmenwerk auf Basis des physikalischen Lebenszyklus** des Produkts, das auch die Wechselwirkungen in Form von Externalitäten mit den anderen beiden Dimensionen verbindet. Darin ist auch die Systemgrenze der LCC-Analyse sowie die verschiedenen Akteure mit den entsprechenden Kosten und Erlösen dargestellt. Insbesondere bei komplexen Produkten mit vielen Akteuren kann die vollständige Erfassung der Lebenszykluskosten aufwändig werden und muss in die einzelnen Phasen oder Subsysteme aufgeteilt und getrennt analysiert werden.



Soziales und natürliches System

**Abbildung 3-10: Konzeptionelles Rahmenwerk für Life Cycle Costing nach [ReHu03]**

Die Richtlinie „VDI 2884 - Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing“ [VDI05] bezieht sich primär auf die Analyse von Produktionsmitteln, kann jedoch auf allgemeine Produkte übertragen werden. Wie in Abbildung 3-11 dargestellt, werden darin die Sicht des Herstellers und des Betreibers (oder Nutzers) unterschieden. Eine detaillierte Aufteilung der Kostenarten ist stets produktspezifisch und abhängig vom Geschäftsmodell. Aus **Herstellersicht** entstehen beispielsweise Entwicklungskosten, Herstellkosten und Vertriebskosten, woraus sich ein Zielpreis für den Markt ergibt. Aus **Nutzersicht** entstehen Investitionskosten durch den initialen Kauf eines Produkts, die durch Betriebs- und Instandhaltungskosten sowie Entsorgungskosten erweitert werden. Die Summe aller im Verlauf des gesamten Produktlebenszyklus entstandenen Kosten ergibt, wie in Abbildung 3-11 dargestellt, die sogenannten Lebenszykluskosten.

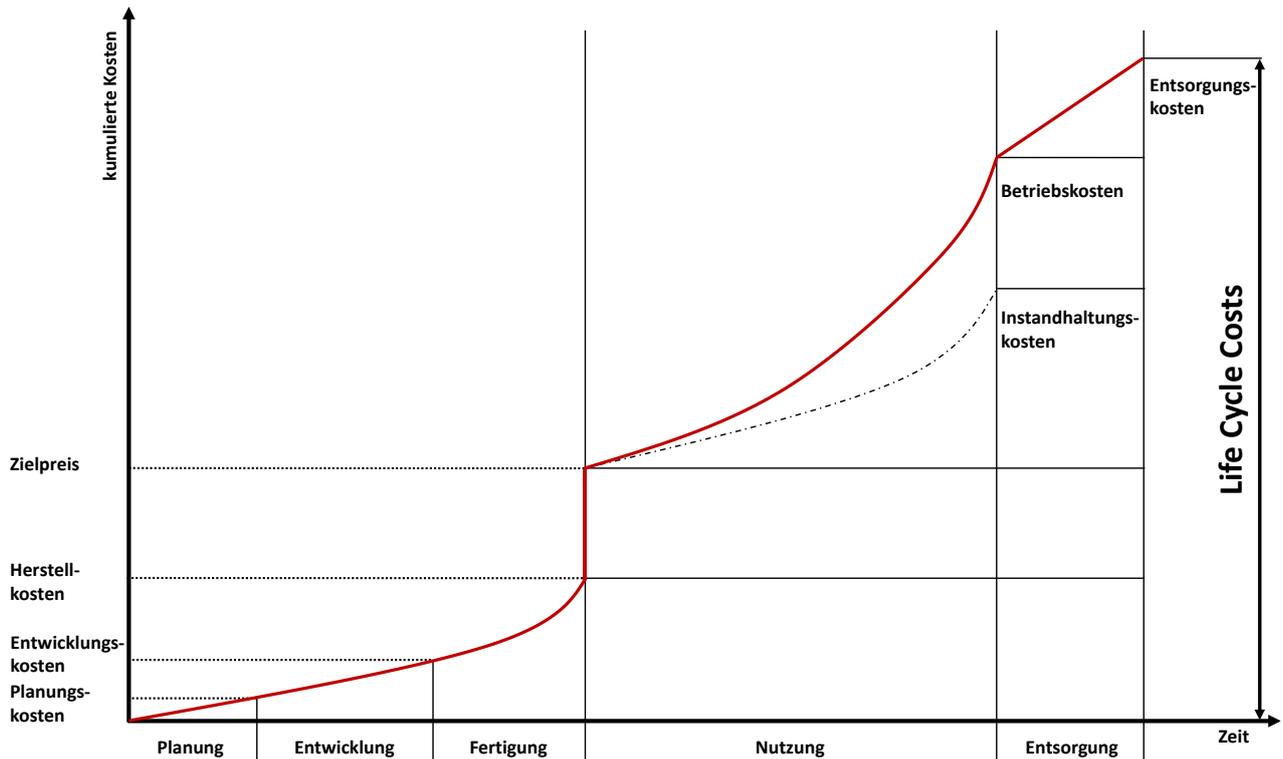


Abbildung 3-11: Schematische Darstellung der Life Cycle Costs (erweitert nach [EKLM14, VDI05])

Mit diesem Modell können umfassend alle ökonomisch relevanten Kosten erfasst werden und auch verschiedene Produkte über den gesamten Produktlebensweg miteinander kostentechnisch verglichen werden. Die vollständige und präzise Ermittlung kann dabei in der Regel nur **retrospektiv** durchgeführt werden. Um auch während des PEP bereits frühe Abschätzungen vornehmen zu können, existieren auch hier **vereinfachte Methoden**. So bietet die „VDI 2225 Blatt 1 - Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Vereinfachte Kostenermittlung“ [VDI97c] eine simplifizierte Berechnung der Kosten aus Herstellersicht. Darin werden in erster Linie die Material- und Herstellkosten auf Basis der Konstruktion des Produkts ermittelt und weitere Kostengrößen durch Faktoren abgeschätzt. Zu einer solcher Ermittlung können auch Materialdatenbanken, wie in Kapitel 3.2.2 erwähnt, eine einfache Unterstützung bieten. Eine Möglichkeit zur Analyse auf der Ebene des Geschäftsmodells, die ebenfalls zur Synthese von Geschäftsmodellen eingesetzt werden kann, wird im Form des „Triple Layered Business Model Canvas“ [JoPa16] in Kapitel 3.3.4 vorgestellt.

### 3.2.5 Analyse der Kreislauffähigkeit

Als weiterer Aspekt der Nachhaltigkeit von Produkten ist die Kreislauffähigkeit, deren Grundlagen in Kapitel 2.1.5 zur Kreislaufwirtschaft beschrieben sind. Zur Analyse der Kreislauffähigkeit von Produkten und Systemen wurden in der Vergangenheit mehrere Ansätze entwickelt (siehe auch Kapitel 3.1.4). Die Arbeiten von Saidani et al. [SYLC19], De Oliveira et al. [DeDS21], Rossi et al. [RBFN20], Linder et al. [LiSV17] und Luthin et al. [LuTC23] bieten einen **Überblick über bestehende Forschungsansätze** sowie über **bestehende Indikatoren** und klassifizieren diese beispielsweise in verschiedene Ebenen des Fokus der Kreislaufanalyse. Ansätze für die Untersuchung auf Geschäftsmodell- oder Unternehmensebene werden in Kapitel 3.2.7 erörtert. Auf Produktebene gehört der „Material Circularity Indicator – MCI“ [ElGr15, GMPT19] zu den am häufigsten diskutierten und angewendeten Ansätzen. Außerdem bieten die Normen der Reihe DIN EN 45550 bis DIN EN 45559 [DIN19b, DIN19c, DIN20c, DIN20d, DIN20e, DIN20f, DIN20g, DIN20h, DIN21b] eine Grundlage zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von energieverbauchsrelevanten Produkten. Eine erste internationale Standardisierung wurde mit der ISO 59020 [ISO24b] veröffentlicht. Die drei genannten Ansätze werden im Folgenden nacheinander beschrieben.

#### **MCI: Material Circularity Indicator**

Der MCI wurde 2015 erstmals publiziert und wird im Folgenden anhand der Revision von 2019 [GMPT19] näher beschrieben. Der Indikator legt den **Fokus auf Materialaspekte** und kann zur Analyse der Kreislauffähigkeit auf **Produktebene oder auf Unternehmensebene** angewendet werden, indem die MCI aller Produkte des Unternehmens zusammengefasst werden. Die Bewertung findet auf einer **Skala zwischen 0 und 1** statt. Dabei gilt der Wert von 0,1 als Referenz eines vollständig linearen Referenzprodukts, bei dem alle Materialflüsse aus primär gewonnenen Rohstoffen stammen und in nicht weiter verwertbaren Abfällen enden. Ein vollständig zirkuläres Produkt, bei dem die Materialien aus sekundären Quellen stammen und ohne jegliche Recyclingverluste wiederverwendet werden können, erhält den Wert 1. Der MCI wird somit im Wesentlichen aus einer **Kombination von drei Produktmerkmalen** gebildet (siehe Abbildung 3-12): der Masse der bei der Herstellung verwendeten neuen Rohstoffe, der Masse der nicht verwertbaren Abfälle, die dem Produkt zugerechnet werden können, und einem **Nutzungsfaktor**, der die Dauer und Intensität der Nutzung des jeweiligen Produkts berücksichtigt. Durch einen geringeren Nutzungsfaktor als das lineare Referenzprodukt können auch Werte zwischen 0 und 0,1 erreicht werden. Wie in Abbildung 3-12 zu sehen, verfolgt der MCI den Ansatz des Lebenszyklusdenkens von der Extraktion der Rohstoffe bis zur etwaigen Deponierung. Zur Berechnung des MCI sollte eine vollständige **Stückliste** (englisch: Bill of Materials (BoM)) des Produkts vorliegen und bekannt sein, woher die Materialien stammen und wie sie am Ende des Lebenswegs des Produkts behandelt werden. Die detaillierten Formeln zur Bewertung der einzelnen Materialflüsse sind in [GMPT19] beschrieben. Besteht ein Produkt wie üblich aus mehreren Materialien oder Komponenten, können die einzelnen Indikatoren bis auf Produktebene aufsummiert werden. [GMPT19]

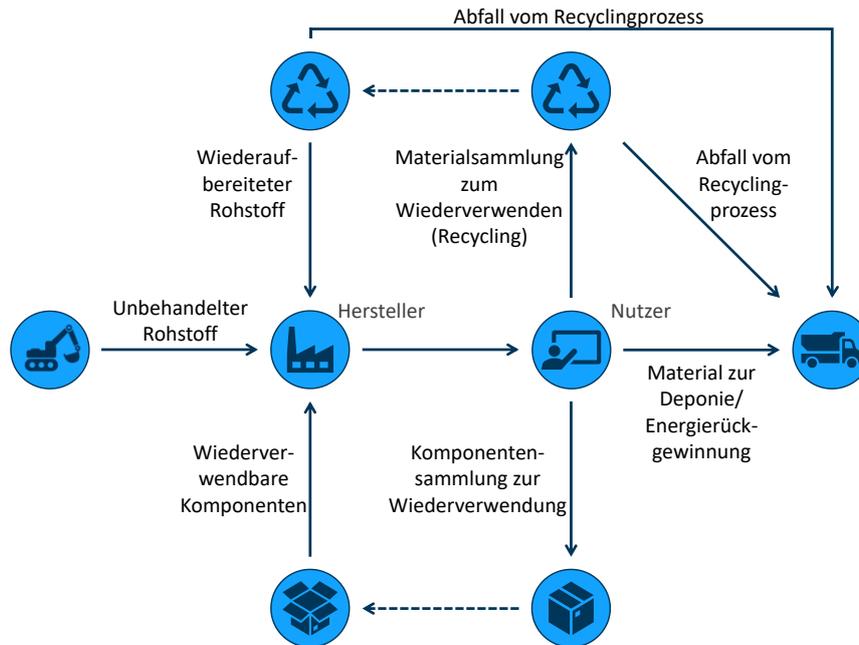


Abbildung 3-12: MCI - Schematische Darstellung der Materialflüsse nach [GMPT19]

Der MCI gilt als benutzerfreundlich und hat einen hohen Bekanntheitsgrad innerhalb der Forschung [LiSV17], unterliegt jedoch auch einigen Limitierungen. Die Methode bezieht sich auf die im Endprodukt enthaltenen Materialmassen und vernachlässigt beispielsweise Materialverluste in der Lieferkette [GMPT19]. Es werden keine potenziellen Qualitätsverluste der recycelten Materialien oder der Verlust von Betriebsstoffen in der Nutzungsphase berücksichtigt [GMPT19]. Da auch viele ökologische Aspekte durch die Kreisläufe eines Produkts beeinflusst werden, kann eine Kombination aus MCI und LCA, wie beispielsweise in der Studie von Glogic et al. [GISY21] angewendet, als umfassendere Alternative zur Analyse der Kreislauffähigkeit angesehen werden.

### **Bewertungsverfahren für energieverbrauchsrelevante Produkte nach DIN 45550ff**

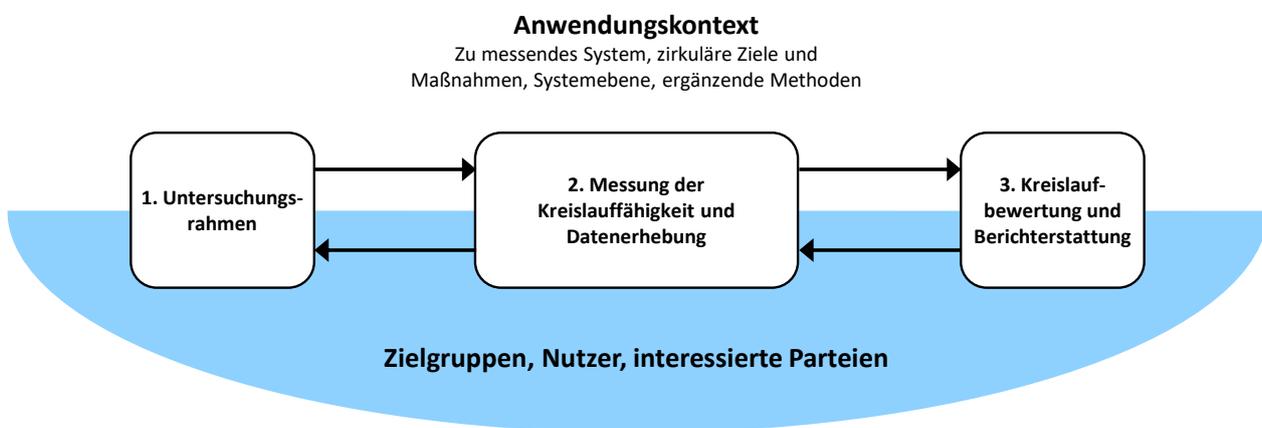
Da zur umfassenden Bewertung der Kreislauffähigkeit von Produkten auch Aspekte relevant sind, welche über die reine Bewertung der Materialflüsse hinausgehen, sind neben dem MCI auch weitere Verfahren in der Anwendung. Die im Normungsauftrag der Europäischen Kommission erarbeitete Reihe DIN 45550 und folgende [DIN19b, DIN19c, DIN20c, DIN20d, DIN20e, DIN20f, DIN20g, DIN20h, DIN21b] bieten eine umfassende Bewertungsgrundlage, die jedoch nur für **energieverbrauchsrelevante Produkte** im Sinne der Ökodesign-Richtlinie [Euro09] von 2009 gilt. Die Reihe unterteilt sich in einen Technischen Report „DIN CLC/TR 45550 - Definitionen zur Materialeffizienz“ [DIN21b] mit den für die Reihe geltenden Begriffen und acht weiteren Normen, die **allgemeine Bewertungsverfahren zu spezifischen Aspekten im Rahmen der Kreislauffähigkeit** beschreiben. Zu den weiteren Aspekten zählen die „Funktionsbeständigkeit“ [DIN20c], die „Wiederaufarbeitbarkeit“ [DIN20d], die „Reparier-, Wiederverwend- und Upgradebarkeit“ [DIN20e] sowie die „Recyclingfähigkeit und Verwertbarkeit“ [DIN20f] der energieverbrauchsrelevanten Produkte. Weiterhin wird der „Anteil an wiederverwendeten Komponenten“ [DIN20g] und der „Anteil an recyceltem Material“ [DIN20h] in separaten Normen bewertet. Die

„Deklaration der Verwendung kritischer Rohstoffe“ [DIN19b] umfasst eine weitere Norm. Die Reihe wird mit der Beschreibung eines „Verfahren zur Bereitstellung von Informationen über Materialeffizienz Aspekte“ [DIN19c] abgeschlossen. Dazu können die Informationen aus den vorherigen Bewertungen zählen, aber auch weiterführende Dokumente wie Reparatur- oder Demontageanweisungen [DIN19c].

### **ISO 59020: Messen und Bewerten der zirkulären Leistung**

Die im Jahr 2024 veröffentlichte ISO-Normenreihe 59000 definiert, wie bereits in Kapitel 3.1.4 angeführt, Standards zur Förderung der Kreislaufwirtschaft, indem sie Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien für die Messung, Bewertung und Umsetzung zirkulärer Wirtschaftsmodelle bereitstellt. Zu dieser Normenreihe gehört unter anderem die „ISO 59020 - Circular Economy – Measuring and assessing circularity performance“ [ISO24b], die eine erste internationale Standardisierung für die Bewertung der Kreislauffähigkeit darstellt. Ziel der ISO 59020 ist es, einen konsistenten und weltweit anwendbaren Rahmen zur Messung und Bewertung der Kreislauffähigkeit zu schaffen. Damit sollen Organisationen dabei unterstützt werden, ihre Ziele im Bereich der Kreislaufwirtschaft systematisch zu erreichen. [ISO24b]

Die Norm beschreibt einen allgemeinen Bewertungsprozess, der sich sowohl auf Organisationen, Wertschöpfungsketten und Wirtschaftsbereiche anwenden lässt, als auch auf einzelne Produkte und Systeme übertragbar ist. Um diesen Prozess zu standardisieren, bietet die ISO 59020 ein **allgemeines Rahmenwerk**, das aus **drei iterativen Schritten** besteht, wie in Abbildung 3-13 dargestellt.



**Abbildung 3-13: Rahmenwerk zur Messung und Bewertung der Kreislauffähigkeit nach [ISO24b] (frei übersetzt)**

Der erste Schritt, die **Festlegung des Untersuchungsrahmen Grenzen** (Boundary Setting), umfasst die Definition der Bewertungsziele, die Festlegung der Systemgrenzen sowie die Identifikation relevanter Akteure und Datenquellen. Dieser Schritt dient dazu, den Anwendungskontext klar zu definieren, in dem die Kreislauffähigkeit gemessen werden soll. Im zweiten Schritt, der **Messung der Kreislauffähigkeit und Datenerhebung** (Circularity Measurement and Data Acquisition), erfolgt die systematische Erfassung der Daten und Kennzahlen, die für die Bewertung erforderlich sind. Hierbei werden sowohl obligatorische als auch optionale Indikatoren genutzt, um die Datenqualität sicherzustellen und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Der

abschließende Schritt, die **Kreislaufbewertung und Berichterstattung** (Circularity Assessment and Reporting), beinhaltet die Analyse der erhobenen Daten sowie die Dokumentation der Ergebnisse in Berichtsform. Dieser Schritt gewährleistet Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Bewertung und erleichtert die Kommunikation der Ergebnisse an verschiedene Interessensgruppen.

Die ISO 59020 ist gezielt auf einer **allgemeingültigen Ebene** konzipiert, um eine flexible Anwendung in unterschiedlichen Branchen und Kontexten zu ermöglichen. Zur Veranschaulichung bietet die Norm im Anhang verschiedene Beispiele, die spezifische Anwendungen des Bewertungsrahmens in verschiedenen Szenarien illustrieren. Diese Praxisbeispiele erleichtern es Organisationen, die Methodik der Norm auf ihre jeweiligen Bedürfnisse anzupassen. Inwiefern diese Norm künftig eine zentrale Rolle bei der Bewertung der Kreislauffähigkeit von Produkten und Systemen einnehmen wird, bleibt derzeit noch abzuwarten. Dies hängt maßgeblich von ihrer Akzeptanz innerhalb relevanter Industrien, der Integration in bestehende Bewertungsansätze sowie der Verfügbarkeit geeigneter Daten ab. Ergänzende Leitfäden und konkrete Fallbeispiele könnten entscheidend dazu beitragen, ihre Praxistauglichkeit zu erhöhen und ihre Anwendung in unterschiedlichen Branchen zu fördern.

### 3.2.6 Ganzheitliche Analysemethoden auf Produktebene

Die ganzheitliche Nachhaltigkeitsanalyse auf Produktebene betrachtet nicht nur einzelne Aspekte oder Dimensionen, wie in den bisher gezeigten Analysemethoden, sondern berücksichtigt alle relevanten ökologischen, sozialen und ökonomischen Aspekte (sowie Aspekte der Kreislaufwirtschaft) gemeinsam über den gesamten Lebensweg. Ziel ist es, ein **umfassendes Verständnis der Nachhaltigkeit eines Produkts** zu generieren und dabei auch mögliche **Wechselwirkungen zwischen einzelnen Aspekten** zu identifizieren, um beispielsweise die Verlagerung von negativen Auswirkungen von der einen in eine andere Nachhaltigkeitsdimension bei der Produktentstehung zu vermeiden. Wie die historische Entwicklung der Analysemethoden zeigt (siehe Kapitel 3.1.3), werden in der Regel bei der ganzheitlichen Nachhaltigkeitsanalyse etablierte Methoden für die jeweiligen Dimensionen miteinander kombiniert und in einer integrierten Bewertung zusammengefasst. Das „Life Cycle Sustainability Assessment“ stellt in der Forschung derzeit eine viel diskutierte Methode dar (vergleiche mit den Arbeiten von [AIMB21, CoQD19, OKHC17, OnKT14, TaTF17, VTBT20]), auch wenn noch Weiterentwicklungen notwendig sind und die Implementierung in der Praxis sich noch in einem frühen Stadium befindet [Muth21, VaSo24]. 2023 wurde diese Methode in Form des „Circular Life Cycle Sustainability Assessment“ nochmals um eine Kreislaufbetrachtung erweitert [LuTC23]. Beide Ansätze werden im Folgenden beschrieben.

#### **LCSA: Life Cycle Sustainability Assessment**

Klöpper fordert 2003 in [Klöp03] erstmals die gemeinsame Betrachtung der drei Nachhaltigkeitsdimensionen und präsentiert fünf Jahre später das bis heute gültige Schema „**LCSA = LCA + LCC + SLCA**“ [Klöp08]. Folglich werden für die ganzheitliche Analyse die präsentierten Methoden LCA (Kapitel 3.2.2), LCC (Kapitel 3.2.4), und S-LCA (Kapitel 3.2.3) in einem **zusammenhängenden Rahmen** durchgeführt.

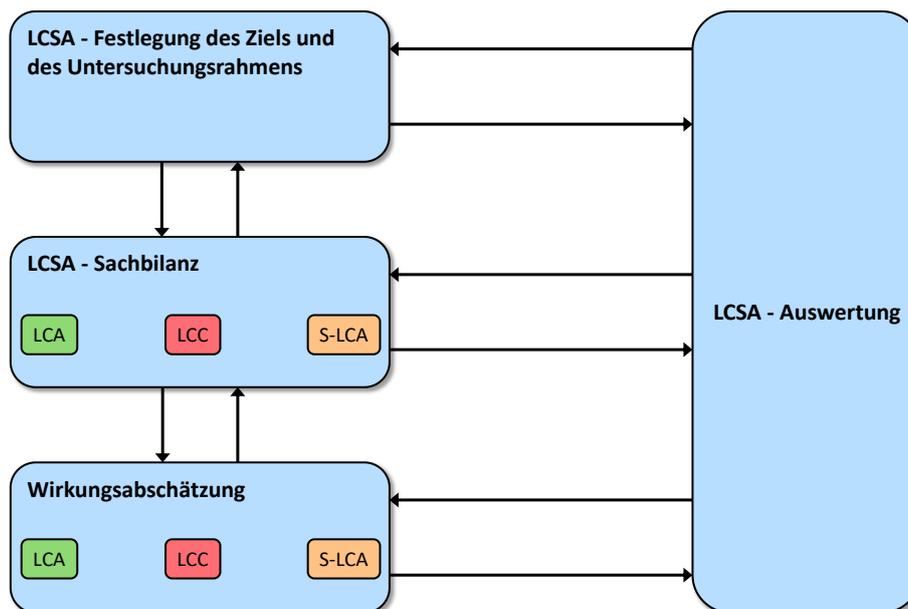


Abbildung 3-14: LCSA Rahmenwerk nach [Muth21]

Wie Abbildung 3-14 zeigt, ist das Vorgehen des LCSA an den **vier Phasen der Ökobilanz** angelehnt. Üblicherweise bilden eine übergreifende „Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens“ und eine integrierte „Auswertung“ diesen zusammenhängenden Rahmen. Wie dargestellt, werden die „Sachbilanzen“ und die „Wirkungsabschätzungen“ in einem LCSA für die Methoden der drei jeweiligen Dimensionen einzeln durchgeführt.

Auch wenn bislang **keine internationale Standardisierung** in Form einer Richtlinie oder einer Norm vorhanden ist, existieren mehrere Beiträge zum Thema LCSA, wie beispielsweise die Einführung der UNEP in das Konzept des LCSA „Towards A Life Cycle Sustainability Assessment“ [UnVL11] oder das Buch „Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA)“ [Muth21]. Weitere Hilfestellungen bieten Valdivia et al. in „Principles for the application of life cycle sustainability assessment“ [VBTS21] und dem „Handbook on Life Cycle Sustainability Assessment“ [VaSo24]. In den Prinzipien aus [VBTS21] werden neben der Ausrichtung an den vier Phasen der ISO 14040 [ISO06b], Transparenz, Vollständigkeit des Untersuchungsumfangs, die Berücksichtigung der Perspektiven der Stakeholder und die offene Kommunikation von Zielkonflikten genannt. Im Bereich der Wirkungsabschätzung wird die **Kenntnis der Wirkungspfade und der Ursache-Wirkungs-Beziehungen** gefordert und auf besondere Vorsicht bei der Kompensation von negativen und positiven Auswirkungen innerhalb einer oder zwischen den Dimensionen hingewiesen [VBTS21]. In Abbildung 3-15 sind ausgehend von den Sachbilanzergebnissen der drei einzelnen Analysemethoden mögliche Wirkungspfade dargestellt, um zu verdeutlichen, wie komplex insbesondere die Wirkungsabschätzung eines LCSA werden kann. Dabei wird unter anderem die Verfügbarkeit von zuverlässigen Daten und die Auswahl geeigneter Indikatoren als kritischer Punkt des LCSA angesehen [OKHC17].

Um die gegebene Komplexität zu reduzieren, schlagen Neugebauer et al. mit dem „**Tiered approach**“ ein stufenweises Vorgehen bei der Durchführung eines LCSA vor. Hierbei werden im ersten Schritt (Tier 1) pro Dimension nur ein global relevanter Indikator mit hoher Praktikabilität eingesetzt. Diese werden dann in Tier 2 und Tier 3 schrittweise um weitere Indikatoren bis zur umfassenden Bewertung ergänzt. Dieser Ansatz zielt darauf ab, den Einstieg in eine umfassende Analyse zu erleichtern, anstatt sich in der Suche nach vollständiger Perfektion zu verlieren. [Neug16, NMSF15]

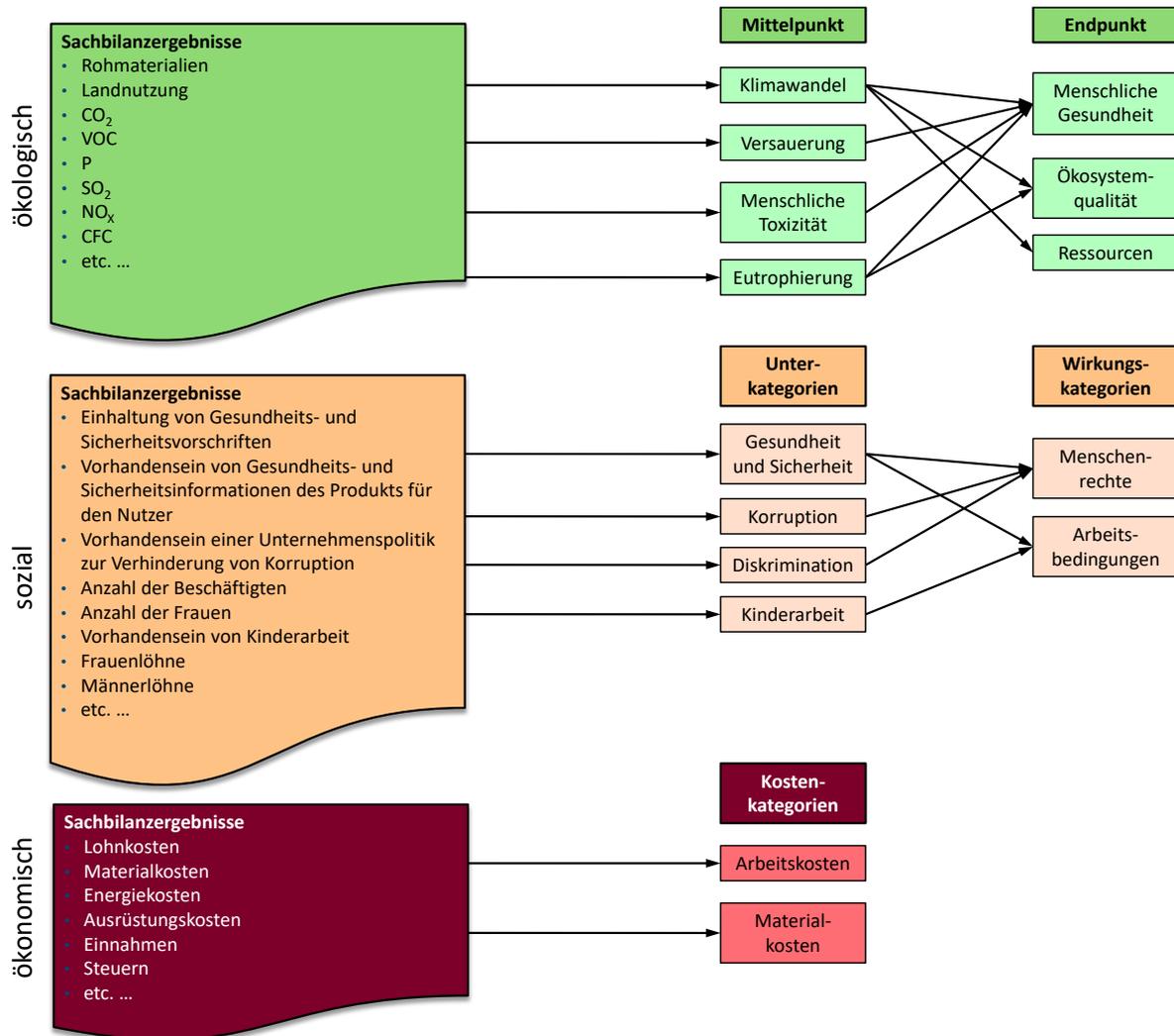


Abbildung 3-15: Mögliche Wirkungspfade eines LCSA (in Anlehnung an [UnVL11])

### C-LCSA: Circular Life Cycle Sustainability Assessment

Da die Betrachtung der Kreislauffähigkeit bzw. der Kritikalität der verwendeten Ressourcen in dem LCSA keinen speziellen Fokus hat, bestehen mehrere Ansätze die Methode entsprechend zu erweitern, wie beispielsweise [HMTT24, SGAD15]. Für die Zielsetzung dieser Arbeit hat sich das integrierte Konzept des „Circular Life Cycle Sustainability Assessment“ (C-LCSA) [LuTC23] von Luthin et al. als besonders geeignet erwiesen. Es wird in dieser Arbeit als **umfassendste Möglichkeit der ganzheitlichen Nachhaltigkeitsanalyse auf Produktebene** angesehen und wird daher im Folgenden beschrieben.

Nach einer umfassenden Betrachtung möglicher Kreislaufindikatoren für ein entsprechendes „**Circularity Assessment (CA)**“, wird darin der MCI (Kapitel 3.2.5) als eine passende Erweiterung verstanden. Dabei werden verschiedene Ansätze für die Modellierung des Lebenszyklusende aufgezeigt, was insbesondere für kreislauffähige Produkte, von denen Materialien oder Komponenten wieder- oder weiterverwendet werden können, eine Herausforderung darstellt. Abbildung 3-16 zeigt das C-LCSA Rahmenwerk als Erweiterung des LCSA inklusive der **15 empfohlenen Durchführungsschritte**. Analog zum LCSA finden Zielsetzung und Auswertung übergreifend statt

und die Einzelmethoden sollten in der Reihenfolge LCA, LCC, S-LCA, CA durchgeführt werden. Außerdem werden relevante Formeln und eine mögliche Visualisierung vorgeschlagen. [LuTC23]

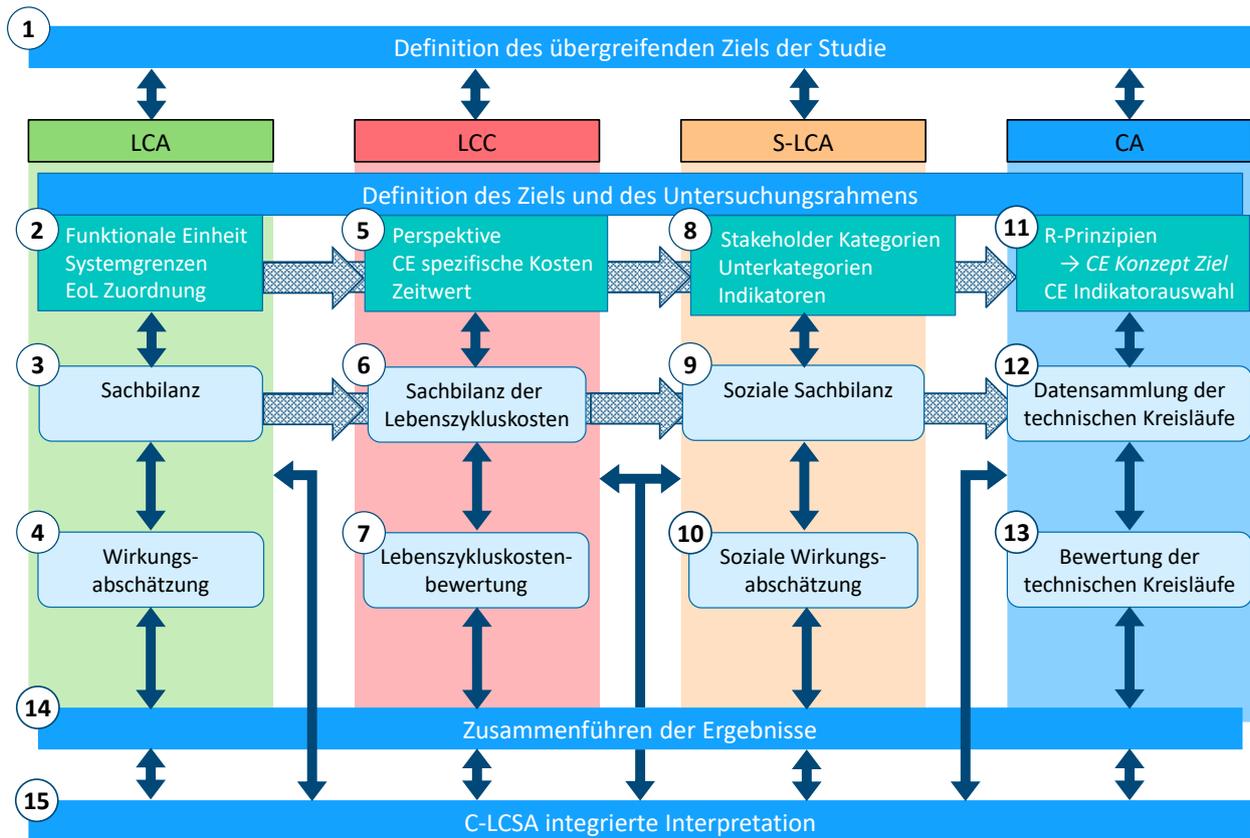


Abbildung 3-16: C-LCSA Rahmenwerk mit Durchführungsschritten [LuTC23] (frei übersetzt)

### Weitere Ansätze

Als weitere ganzheitliche Analysemethode kann die Methode „PROSA - Product Sustainability Assessment“ [GBGH07, GrQu11] des Öko-Institut e.V. genannt werden, die jedoch begründet durch die geringere Relevanz in der internationalen Forschung im Vergleich zum LCSA nicht näher ausgeführt wird.

Die „VDI 4605 – Nachhaltigkeitsbewertung“ [VDI17a] bietet ebenfalls eine Grundlage zur ganzheitlichen Analyse von Produkten und Systemen. In der Richtlinie wird ein dreiteiliges Schalenmodell verwendet. In der ersten Schale wird ein disaggregiertes Indikatorsystem in Form von drei Tabellen für die Dimensionen der Nachhaltigkeit bereitgestellt, welches auf den Aspekten "Generationengerechtigkeit", "Lebensqualität" und "sozialer Zusammenhalt" basiert, die im Leitbild der Nachhaltigkeitsstrategie der deutschen Bundesregierung festgelegt sind. Die zweite Schale verweist auf Normen und Richtlinien von VDI, DIN und ISO, die einzelne Aspekte gezielt bewerten können. Diese werden in der dritten Schale mit dem Verweis auf umfassendere Bewertungssysteme ergänzt. [VDI17a]

Da die VDI 4605 eher eine lose Sammlung vorhandener Methoden darstellt, die den aktuellen Forschungsstand nicht vollständig berücksichtigt, wird sie in dieser Arbeit nur der Vollständigkeit wegen erwähnt und nicht weiter diskutiert.

### 3.2.7 Analysemethoden auf Organisationsebene

Neben Methoden, die zur Analyse der Nachhaltigkeit von Produkten entwickelt wurden, existieren auch entsprechende Ansätze für die **Untersuchung der Nachhaltigkeit von Unternehmen bzw. Geschäftsmodellen auf Organisationsebene**. Da Produkte üblicherweise im Rahmen von Geschäftsmodellen durch Unternehmen vertrieben werden, wobei relevante Nachhaltigkeitswirkungen auftreten können, werden nachfolgend die wichtigsten Ansätze im Hinblick auf die Produktentstehung vorgestellt, jedoch nicht mit derselben Detailtiefe wie die produktbezogenen Methoden.

Ein verbreiteter Ansatz besteht darin die etablierten Analysemethoden, die meist auf dem Vorgehen der **Ökobilanz** basieren auf die **organisatorische Ebene** zu adaptieren. Entsprechend existieren Forschungen wie beispielsweise zu „Organizational Life Cycle Assessment (OLCA)“ [Unep15], „Social organizational life cycle assessment (SO-LCA)“ [UBSL20] oder ganzheitlich für „Organizational Life Cycle Sustainability Assessment (OLCSA)“ [WSMH22]. Zur Analyse der Treibhausgasemissionen auf Organisationsebene besteht eine eigene internationale Norm mit der DIN EN ISO 14064 [DIN19a], die im Rahmen der Kompensationsmaßnahmen (Kapitel 3.4.2) näher erläutert wird.

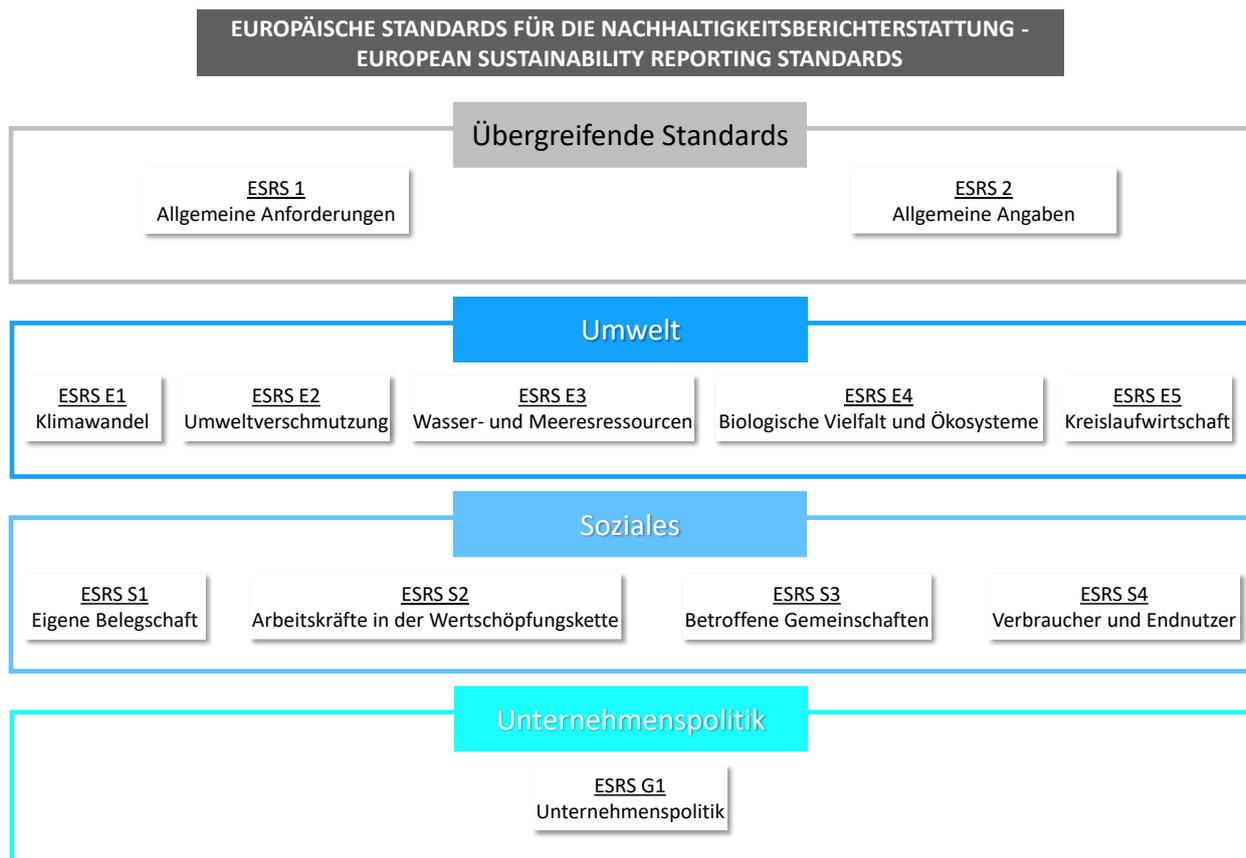
Die Untersuchung ökonomischer Aspekte auf Unternehmensebene fällt in das Fachgebiet der Betriebswirtschaftslehre, weshalb dieses hier nicht detailliert erläutert werden kann. Unter anderem bietet die **Materialflusskostenrechnung** (englisch: material flow cost analysis (MFCA)) nach DIN EN ISO 14051 [DIN11] dazu ein Managementinstrument, das Organisationen dabei unterstützt, die potenziellen umweltbezogenen und monetären Auswirkungen ihrer Material- und Energieverwendung besser zu verstehen. Der integrierte Ansatz aus der ISO-Umweltmanagementreihe lässt sich auf die gesamte Lieferkette einer Organisation oder eines Produktsystems erweitern und kann sowohl ökonomische, als auch ökologische Aspekte parallel bewerten [DIN11]. Die „VDI 3330 – Kosten des Materialflusses“ [VDI07] stellt hierfür eine alternative Richtlinie bereit, jedoch mit Fokus auf die innerbetrieblichen Materialflüsse.

Auch für die Untersuchung der Kreislauffähigkeit bestehen Methoden, wie der Ansatz von Rossi et al. [RBFN20] oder die Erweiterung des MCI der Ellen MacArthur Foundation „Circulytics“ [Elle20a, Elle20b].

Eine andere Herangehensweise zur Nachhaltigkeitsbewertung basiert auf dem **Prinzip der gesellschaftlichen Verantwortung von Organisationen** jeglicher Art, wie sie in der ISO 26000 [ISO10] beschrieben ist (vergleiche auch Kapitel 3.1.3): Gesellschaftliche Verantwortung umfasst das Engagement von Organisationen, einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung zu leisten und die Auswirkungen ihrer Entscheidungen und Aktivitäten auf die Gesellschaft und die Umwelt zu berücksichtigen [ISO10]. Dieses Konzept gewinnt weltweit an Bedeutung, da intakte Ökosysteme und soziale Gerechtigkeit zunehmend als entscheidende Elemente für langfristigen Erfolg anerkannt werden [ISO10]. Das Prinzip der **verantwortungsvollen Unternehmensführung** ist auch in der „Corporate Sustainability Reporting Directive“ (CSRD) [Euro22] der EU verankert, die Unternehmen zukünftig zu einer Nachhaltigkeitsberichterstattung verpflichtet. Zur einheitlichen

Berichterstattung sind entsprechende Vorgaben, die „European Sustainability Reporting Standards - ESRS“ [Euro23a], einzuhalten, die ebenfalls als Grundlage zur Analyse der Nachhaltigkeit von Unternehmen und Organisationen dienen können. In Abbildung 3-17 sind die Hauptthemen der ESRS dargestellt, die den nach den **ESG-Kriterien** (englisch: Environmental, Social, Governance – vergleiche [ErKS22]) aufgebaut sind.

Ein alternatives Bewertungsverfahren der Umweltauswirkungen von Standorten und Organisationen, das ebenfalls die ESG-Kriterien miteinbezieht, ist in der „DIN EN ISO 14015 - Umweltbezogene Due-Diligence-Bewertung“ [DIN22] (englisch: environmental due diligence (EDD)) aus der Umweltmanagementreihe beschrieben. **Due Diligence** (deutsch: gebührende Sorgfalt) wird darin definiert als „umfassender, vorausschauender Prozess der Erfassung der tatsächlichen und möglichen Folgen der Entscheidungen und Aktivitäten einer Organisation“ [DIN22]. Ziel der EDD-Bewertung ist es, wirtschaftliche Auswirkungen zu identifizieren, die mit Umweltaspekten verbunden sind, wie historische Umweltbelastungen, aktuelle Verschmutzungsprobleme, potenzielle Risiken und Chancen im Zusammenhang mit Umweltzuständen sowie Mängel in der Lieferkettenverwaltung. Sie kann individuell für alle Arten von Organisationen weltweit angewendet werden. [DIN22]



**Abbildung 3-17: Hauptthemen der European Sustainability Reporting Standards nach [Euro23a]**

### 3.3 Synthesemethoden der Nachhaltigen Produktentstehung

Im Anschluss an den aktuellen Forschungsstand der Analysemethoden erfolgt in diesem Kapitel ein entsprechender Überblick über die Synthesemethoden. Analog zum vorherigen Kapitel wird eine Einführung in das Gebiet der Synthesemethoden gegeben, und aufbauend darauf folgt die Beschreibung von speziellen Methoden in den drei Nachhaltigkeitsdimensionen sowie Methoden zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit von Produkten. Zum Abschluss werden ganzheitliche Ansätze und Methoden diskutiert, die die Zielsetzungen der zuvor besprochenen Methoden vereinen sollen.

#### 3.3.1 Einführung in Synthesemethoden

In Kapitel 2.2 wurde Synthese nach [PBF07] für diese Arbeit als „Informationsverarbeitung (meist auf Basis einer zuvor durchgeführten Analyse) zur Generierung von Objekten bzw. Ergebnissen durch Kombinieren und Bildung von Verbindungen“ bereits definiert. Ausgehend von bestimmten Zielen werden in Anlehnung an Abbildung 2-6 und [VDI19a] durch Syntheseaktivitäten bestimmte Ergebnisse erzeugt, die im Laufe des PEP durch Iteration mit Analyseaktivitäten nach und nach zur Lösung führen.

In dieser Arbeit wird unter **Synthese** daher die **schrittweise Generierung des Produktsystems im Laufe des PEP** verstanden, wie in Abbildung 3-18 dargestellt.

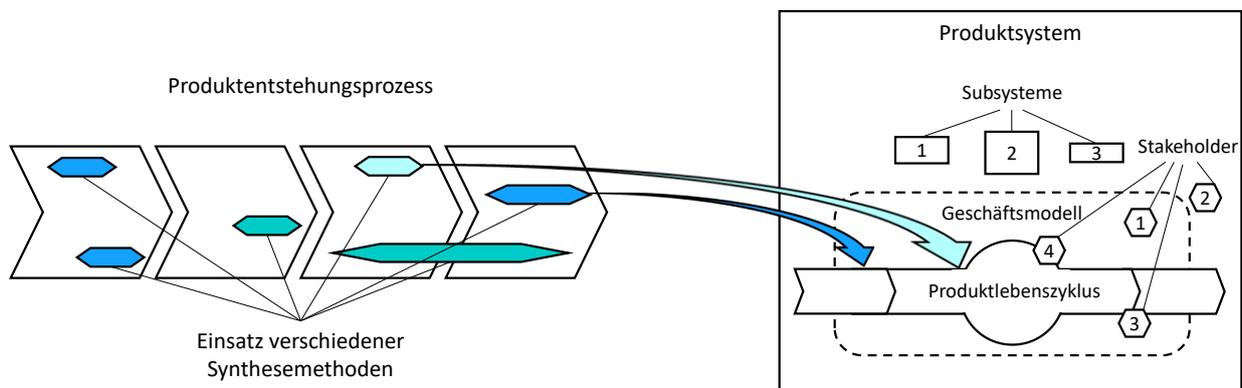


Abbildung 3-18: Anwendungsgebiet der Synthesemethoden zur Nachhaltigen Produktentstehung

Dieser Prozess umfasst die Integration von Wissen aus unterschiedlichen Disziplinen, das Zusammenführen von Design- und Funktionsanforderungen sowie die kreative Anwendung von Techniken zur Problemlösung. Dabei gibt es eine große Varianz an Methoden, die sich ebenfalls durch die Kriterien zur Klassifizierung aus Tabelle 3-2 ergibt. Diese können nur zu bestimmten Prozessschritten im PEP oder fortlaufend eingesetzt werden. Ebenso gibt es Methoden, die den Fokus nur auf spezielle Teile des Produktsystems bzw. des Produktlebenszyklus oder das Produkt selbst legen. Mit der Zielsetzung der Generierung eines möglichst nachhaltigen Produktsystems erweitert sich die Varianz der Methoden nochmals, beispielsweise durch die Konzentration auf eine einzelne Nachhaltigkeitsdimension oder einem einzigen Nachhaltigkeitsaspekt. Die verschiedenen Nachhaltigkeitsstrategien bieten eine weitere Möglichkeit zur Variation der Ansätze. Wie bereits im historischen Überblick erwähnt (Kapitel 3.1), werden in der Fachliteratur oft

verwandte Bezeichnungen zu „Synthesemethoden der *Nachhaltigen Produktentstehung*“ verwendet. Zum besseren Verständnis werden darunter folgende Begriffe und Bezeichnungen vereint: Nachhaltige Produktentwicklung, *Nachhaltige Produktentstehung*, Nachhaltige Produktgestaltung, Nachhaltiges Design, Design for Sustainability, Sustainable Product Design, Sustainable Product Development, Life Cycle Engineering, Life Cycle Design, uvm. Im Folgenden wird auf die für diese Arbeit wichtigsten Synthesemethoden eingegangen, beginnend mit speziellen Methoden für die drei Nachhaltigkeitsdimensionen. Es ist zu erwähnen, dass sich die Entwicklungsziele der diskutierten Methoden durchaus überschneiden können. So sind beispielsweise Gestaltungsmethoden für eine hohe Materialeffizienz sowohl in der ökologischen Dimension als auch in der Verbesserung der Kreislauffähigkeit zu finden.

Die Auswahl der vorgestellten Methoden basiert wiederum auf mehreren Kriterien. Dabei spielt die Relevanz in der aktuellen Forschung und Praxis eine wichtige Rolle, um sicherzustellen, dass die Methoden sowohl wissenschaftlich anerkannt als auch praktisch anwendbar sind. Ebenso wird die Anwendbarkeit im PEP berücksichtigt, um einen konkreten Nutzen im später vorgestellten Modell zu gewährleisten. Der Reifegrad der Methoden ist ebenfalls entscheidend, wobei bevorzugt erprobte und etablierte Ansätze gewählt werden. Außerdem wird versucht die breite Varianz an Methoden abzudecken, um die Vielfalt an Ansätzen widerzuspiegeln.

### 3.3.2 Synthesemethoden in der ökologischen Dimension

Die historische Entwicklung der *Nachhaltigen Produktentstehung* (Kapitel 3.1) veranschaulicht, dass Methoden, die auf ökologische Aspekte von Produkten und Systemen abzielen, bereits am längsten erforscht wurden. Daher bietet dieser Bereich auch den quantitativ umfangreichsten und qualitativ ausgereiftesten Stand der Forschung innerhalb der Synthesemethoden. Dabei hat sich der Begriff des „Ecodesign“ neben „Design for Environment“ für die Gestaltung von möglichst umweltverträglichen Produkten durchgesetzt. Die ISO 14006 bietet auf Managementebene „Leitlinien zur Berücksichtigung umweltverträglicher Produktgestaltung“ [ISO11] und soll Organisationen dabei unterstützen Ecodesign in das jeweilige Umweltmanagementsystem zu integrieren. Auch wenn es zahlreiche weiterführende Literatur gibt, wird Ecodesign im Folgenden anhand des Fachberichts ISO/TR 14062 zur „Integration von Umweltaspekten in Produktdesign und -entwicklung“ [ISO02] stellvertretend erläutert. Im Anschluss werden als weitere Gestaltungsmethode die Bionik nach VDI 6220 [VDI12a] sowie die „Ten Golden Rules“ [LuLa06] exemplarisch als vereinfachte Methode vorgestellt.

#### ***Ecodesign nach ISO/TR 14062***

Der internationale Fachbericht ISO/TR 14062 bildet einen Leitfaden für Produktentwickler und Entscheidungsträger zur Integration der Ziele des ökologischen Designs [ISO02]. Auch wenn er Ende des Jahre 2020 zurückgezogen wurde, bietet er dennoch eine umfassende Zusammenfassung der wichtigsten Begrifflichkeiten, Grundsätze und Strategien für eine umweltgerechte Produktentstehung. Im Folgenden wird in erster Linie auf die allgemeinen produktbezogenen

Strategien und weniger auf die organisatorischen Gesichtspunkte eingegangen. Daraufhin werden die acht Designstrategien des Ecodesign vorgestellt.

Aus den produktbezogenen Strategien können fünf Grundsätze abgeleitet werden. Diese betonen zum ersten die Bedeutung der **frühzeitigen Integration** von Umweltaspekten im PEP. Eine solche Berücksichtigung in den frühen Phasen bietet die notwendige Flexibilität, um effektiv Anpassungen und Verbesserungen an Produkten vorzunehmen. Im Gegensatz dazu kann eine spätere Integration dazu führen, dass wünschenswerte umweltbezogene Lösungen ausgeschlossen werden, da wesentliche Entscheidungen in vorherigen Phasen des PEP bereits getroffen wurden. Ein weiterer Grundsatz ist die Untersuchung des gesamten **Lebenswegs eines Produkts** (vgl. Lebenswegbetrachtung). Konform zur Ökobilanz (Kapitel 3.2.2) wird dadurch sichergestellt, dass alle umweltbezogenen Produktmerkmale und Phasen des Lebenszyklus berücksichtigt werden. Zudem werden die Umweltauswirkungen von Zwischenprodukten oder Hilfsmaterialien erfasst, auch wenn diese im Endprodukt nicht mehr vorhanden sind. Bei der Produktentwicklung ist es zudem wertvoll, in Begriffen der **Funktionalität**, statt in spezifischen technischen Lösungen zu denken. Dieser Ansatz soll weitreichende Lösungsansätze ermöglichen und innovative Denkweisen fördern. Weiterhin wird ein **Multi-Kriterien-Ansatz** empfohlen. Neben den traditionellen Designkriterien wie Leistungsfähigkeit, Qualität und Kosten sollten auch die vielfältigen umweltbezogenen Kriterien berücksichtigt werden, um ein breites Spektrum potenzieller Umweltauswirkungen zu adressieren. Letztlich betont die ISO/TR 14062 die Bedeutung einer integrativen Sichtweise, die nach angemessenen Lösungen für die **Wechselbeziehungen** sucht, die mit den meisten Designentscheidungen verbunden sind. Dies umfasst Wechselbeziehungen zwischen verschiedenen Umweltaspekten sowie zwischen umweltbezogenen, ökonomischen, sozialen, technischen und Qualitätsgesichtspunkten. [ISO02]

Außerdem werden acht Designstrategien vorgestellt, die abhängig von der Aufgabe bzw. des Problems einzeln oder als Kombination umgesetzt werden können. Zur Umsetzung der jeweiligen Designstrategie stehen wiederum eine Vielzahl von Methoden und weiteren Entwicklungsstrategien zur Verfügung, die auszugsweise bei der folgenden Erläuterung der Designstrategien vorgestellt und in Tabelle 3-5 zusammengefasst werden. Die erste Designstrategie ist die **Verbesserung der Materialeffizienz**, die darauf abzielt, die Umweltauswirkungen zu minimieren, indem Materialmengen reduziert, Materialien mit geringen Umweltauswirkungen verwendet, erneuerbare Materialien genutzt und Recyclingmaterialien integriert werden. Diese Verbesserung kann beispielsweise durch Leichtbau nach [HeMo11] oder durch die Strategien zur Steigerung der Ressourceneffizienz aus der VDI 4800 [VDI16] erreicht werden. Eine weitere Strategie ist die **Verbesserung der Energieeffizienz**, bei der der Gesamtenergieverbrauch des Produkts während seines gesamten Lebenszyklus, einschließlich der Nutzungsphase, berücksichtigt wird. Hierbei werden Möglichkeiten zur Reduzierung des Energieverbrauchs, zur Nutzung von Energiequellen mit geringen Umweltauswirkungen oder zur Verwendung erneuerbarer Energiequellen geprüft. Beispiele zur Steigerung der Energieeffizienz, insbesondere in der Nutzungsphase sind Design for

Sustainable Behaviour [BhLT11], bei dem der Nutzer zu einem energiesparendem Verhalten bewegt wird, oder die Anwendung von Leichtbau bei Fahrzeugen [Frie13].

Tabelle 3-5: Die acht Designstrategien aus [ISO02] mit weiterführenden Beispielen

#	Designstrategie	Weiterführende Beispiele zur Umsetzung
1	Verbesserung der Materialeffizienz	Ressourceneffizienz [VDI16] Leichtbau [HeMo11] Design with Waste / Recycled Materials [BrMa14, DCGS95, Ljun07] Design with Regenerative Materials [BrMB07] Minimal Design [Gumb23] Vermeiden oder Reduzieren von Betriebsstoffen, Verbrauchsgütern, Hilfsstoffen & Verpackungen [ReVW18]
2	Verbesserung der Energieeffizienz	Design for Energy Efficiency [Pehn10, SBFV15] Design for Sustainable Behaviour [BhLT11] Leichtbau in der Mobilität [Frie13]
3	Sparsame Landnutzung	-
4	Design saubererer Herstellungsverfahren und Verwendungsmöglichkeiten	Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS) [VDI14]
5	Design für lange Lebensdauer	Design for Maintainability [GuDi21, TjTh04] Design for Durability [MGAJ22] Design for Aesthetics / Emotional Durability [Chap09, Chap12, HCLM18] Design for Reliability [CrFe01, VDI17b] Design for Repairability [Acke18, DBFB21, HeMG20] Design for Longer Lasting Products [Coop16] Vermeidung von Obsoleszenz [PoLo19, VDI18]
6	Design einer optimalen Funktionalität	Design to Quality / Function [Akao04] Design for Modularity [SoEG18] Bionik [HeVG09, VDI12a] Erweiterungen des QFD [PuOM11]
7	Design für Wiederverwendung, Rückgewinnung und Recycling	Design for Recycling [ISO20, Jord79, VDI01, VDI02, Weeg81] Design with mono materials/ for varietal purity [GoHR24, QKBC23] (siehe auch Kapitel 3.3.5)
8	Vermeidung potenziell gefährlicher Substanzen und Werkstoffe im Produkt	Materialdatenbanken [Ansy20] REACH – Restricted Substances List [Regu22]

Eine **sparsame Landnutzung** wird ebenfalls angestrebt, wenn beispielsweise Produktionssysteme eingesetzt werden, die erhebliche Flächen beanspruchen. Als vierte Strategie umfasst das **Design saubererer Herstellungsverfahren und Verwendungsmöglichkeiten** die Anwendung umweltfreundlicher Produktionstechniken, die Vermeidung gefährlicher Verbrauchsmaterialien und Hilfsstoffe sowie eine ganzheitliche Systemperspektive, um Entscheidungen stets auf Basis mehrerer Umweltkriterien zu treffen. Ein Beispiel für eine Methode mit Fokus auf die Herstellung ist „Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS)“ der VDI 4075 [VDI14]. Die fünfte Designstrategie ist das **Design für lange Lebensdauer**, das sich auf die Berücksichtigung der Langlebigkeit des Produkts sowie seiner Reparatur- und Wartungsfähigkeit konzentriert. Zudem werden

umweltbezogene Verbesserungen durch neue Technologien in diese Strategie einbezogen. Hierbei unterstützen Strategien wie „Design for Reliability“ [CrFe01] gegen frühzeitige Obsoleszenz der Produkte. Das **Design einer optimalen Funktionalität** berücksichtigt die Potenziale von Mehrfachfunktionen, modularer Gestaltung, automatisierter Steuerung und Optimierung. Erweiterungen des „Quality Function Deployment – QFD“, wie in [PuOM11] gezeigt, können diese Strategie unterstützen. Des Weiteren fokussiert sich das **Design für Wiederverwendung, Rückgewinnung und Recycling** auf die Möglichkeiten einer leichten Demontage, die Reduktion der Materialkomplexität und die Verwendung recyclingfähiger Materialien, Baugruppen und Bauteile in zukünftigen Produkten. Neben anderen Designstrategien hat diese besonders starken Bezug zu den in Kapitel 3.3.5 diskutierten Methoden zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit. Schließlich prüft die **Vermeidung potentiell gefährlicher Substanzen und Werkstoffe im Produkt** die Auswirkungen auf die Gesundheit und Sicherheit des Menschen sowie die Umweltauswirkungen der verwendeten Materialien. Mithilfe von Materialdatenbanken oder -listen, wie [Regu22], kann diese Strategie beispielsweise praktisch umgesetzt werden. [ISO02]

Neben den Grundsätzen und Designstrategien wird in der ISO/TR 14062 auch ein Beispiel für ein generisches Modell zur Berücksichtigung von Umweltaspekten im PEP vorgestellt. Hierin werden zu den typischen Stufen des Produktdesign- und -entwicklungsprozesses jeweils potenzielle Maßnahmen zur Berücksichtigung von Umweltaspekten aufgezeigt. Dabei wird betont, dass die umweltbezogenen Maßnahmen von Beginn an über den gesamten PEP durchgeführt werden sollten und dass eine Rückkopplung zur ständigen Verbesserung zwischen den Phasen notwendig ist.

### ***Bionik nach VDI 6220***

Als besondere Gestaltungs- bzw. Problemlösungsmethode wird im Folgenden die Bionik (englisch: Biomimetics/Biomimicry) anhand der VDI-Reihe 6220 [VDI12a] vorgestellt. Darin ist Bionik als „Interdisziplinäre Zusammenarbeit von Biologie und Technik mit dem Ziel, durch Abstraktion, Übertragung und Anwendung von Erkenntnissen, die an biologischen Vorbildern gewonnenen werden, technische Fragestellungen zu lösen“ [VDI12a]. Es ist anzumerken, dass nicht alle durch diese Technik erarbeiteten Lösung gleichzeitig auch nachhaltige Lösungen darstellen. Da sie jedoch auch als Innovationsprozess oder Kreativitätstechnik verstanden wird, konnten durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Biologie und Technik bereits vielfältige Problemstellungen des Ecodesign gelöst werden. Es werden zwei grundsätzliche bionische Entwicklungsprozesse unterschieden.

Bei dem **Biology Push** (Bottom-up-Prozess) stehen zu Beginn Erkenntnisse der biologischen Grundlagenforschung und werden nachfolgend für die Entwicklung neuer technischer Produkte genutzt [VDI12a].

Hingegen erhält bei dem **Technology Pull** (Top-down-Prozess) „ein bereits bestehendes funktionierendes technisches Produkt durch die Übertragung und Anwendung biologischer Prinzipien neue oder verbesserte Funktionen“ [VDI12a]. Durch die Vielfalt der biologischen Prinzipien und der technischen Problemstellungen ist das Anwendungsgebiet der Bionik umfangreich. In der

VDI-Reihe sind weiterführende Richtlinien wie beispielsweise für „Bionische Oberflächen“ [VDI13a], „Bionische Materialien, Strukturen und Bauteile“ [VDI13b] oder „Bionische Optimierung“ [VDI12b, VDI12d] vorhanden. Diese Vielfalt stellt sowohl ein großes Potential zur Anwendung als Synthesemethode, aber auch eine Schwachstelle dar. Bei beiden bionischen Entwicklungsprozessen ist der Transfer von der einen in die andere Disziplin nicht immer möglich, wodurch die Anwendbarkeit dieser Methode oft nur in Sonderfällen gegeben ist.

### **Ten Golden Rules nach Luttrupp und Lagerstedt**

Als vereinfachte Methode zum Ecodesign können die „Ten Golden Rules“ nach Luttrupp und Lagerstedt [LuLa06] genannt werden. Sie greifen die **wichtigsten Aspekte des Ecodesign** auf und formulieren **zehn generische Regeln zur ökologisch nachhaltigen Produktgestaltung**. Insbesondere zu Beginn des PEP können diese Regeln schnell und einfach in die Produktplanung und bei der Ableitung von Anforderungen angewendet werden. Sie sind in folgender Tabelle 3-6 zusammengetragen.

**Tabelle 3-6: „Ten Golden Rules“ des Ecodesign frei übersetzt nach [LuLa06]**

#	Ten Golden Rules
1	Verwenden Sie keine giftigen Substanzen und nutzen Sie geschlossene Kreisläufe für notwendige, aber giftige Stoffe.
2	Minimieren Sie den Energie- und Ressourcenverbrauch in der Produktionsphase und beim Transport durch verbesserte Betriebsführung.
3	Verwenden Sie strukturelle Merkmale und hochwertige Materialien, um das Gewicht der Produkte zu minimieren, sofern solche Entscheidungen nicht die notwendige Flexibilität, Stoßfestigkeit oder andere funktionale Prioritäten beeinträchtigen.
4	Minimieren Sie den Energie- und Ressourcenverbrauch in der Nutzungsphase, insbesondere bei Produkten mit den signifikantesten Aspekten in der Nutzungsphase.
5	Fördern Sie Reparatur und Updates, insbesondere bei systemabhängigen Produkten (z.B. Mobiltelefone, Computer und CD-Player).
6	Fördern Sie eine lange Lebensdauer, insbesondere bei Produkten mit signifikanten Umweltaspekten außerhalb der Nutzungsphase.
7	Investieren Sie in bessere Materialien, Oberflächenbehandlungen oder strukturelle Anordnungen, um Produkte vor Schmutz, Korrosion und Verschleiß zu schützen und so eine verringerte Wartung und längere Produktlebensdauer zu gewährleisten.
8	Bereiten Sie Updates, Reparatur und Recycling durch Zugänglichkeit, Kennzeichnung, Module, Sollbruchstellen und Anleitungen vor.
9	Fördern Sie Updates, Reparatur und Recycling durch die Verwendung weniger, einfacher, recycelter, nicht vermischter Materialien und ohne Legierungen.
10	Verwenden Sie so wenige Verbindungselemente wie möglich und nutzen Sie Schrauben, Klebstoffe, Schweißverbindungen, Schnappverschlüsse, geometrische Verriegelungen usw. entsprechend dem Lebenszyklus-Szenario.

### **Weiterführende Literatur**

Neben solchen vereinfachten Ansätzen existieren noch weiterführende Veröffentlichungen, EU-Richtlinien und detaillierte Methoden im Forschungsgebiet der ökologisch orientierten Synthesemethoden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und der starken Überschneidungen zu den vorgestellten Methoden, werden diese nicht näher vorgestellt und sind nur als zusätzliche Quellen genannt.

- „Was ist Ecodesign?“ [TiMo23, TSRP00]
- „EcoDesign: von der Theorie in die Praxis“ [AABR08]
- „Ecodesign—A Review of Reviews“ [ScLö20]
- “ECODESIGN Best Practice of ISO/TR 14062” [KuPi05]
- Ecodesign Directive der EU: „Ecodesign for Sustainable Products Regulation“ [Euro24b]
- „Design for Environment“ [Fiks12]

### **3.3.3 Synthesemethoden in der sozialen Dimension**

Analog zu den Analysemethoden in der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit, sind auch die Synthesemethoden in diesem Bereich am wenigsten weit erforscht (vergleiche Kapitel 3.1). Die soziale Nachhaltigkeit wurde aufgrund der Komplexität oft vernachlässigt, da soziale Werte nur schwer quantifizierbar sind und sich kaum aus ihrem jeweiligen Kontext lösen lassen [CoMo21]. Die subjektive Sicht der jeweiligen Stakeholder auf soziale Aspekte erschwert zusätzlich die Bewertbarkeit dieser Dimension. Soziale Nachhaltigkeit im Design setzt daher ein umfassendes Verständnis des menschlichen Verhaltens sowie die Berücksichtigung menschlicher Bedürfnisse und Wünsche voraus, wobei gleichzeitig unter anderem ökologische Grenzen, Produktverantwortung, Ressourcenverbrauch und Tragfähigkeit beachtet werden müssen [McBh12]. Zusätzlich zur sorgfältigen Berücksichtigung von kultureller Geschichte und Traditionen sind in der Designpraxis der Dialog, die Gleichberechtigung beim Ausdruck von Ideen, das Eingehen von Kompromissen, Selbstverwirklichung und Altruismus von zentraler Bedeutung für das Erreichen sozialer Nachhaltigkeit [McBh12]. In ihrem ausführlichen Literaturreview definieren Corsini und Moultrie „Design for Social Sustainability als Design, welches das menschliche Wohlergehen und das Gedeihen von Gesellschaften jetzt und in Zukunft fördert“ (frei übersetzt nach [CoMo21]). Diese recht vage Definition erschwert das Ableiten konkreter Designrichtlinien und Regeln, wie sie beispielsweise aus dem Ecodesign (Kapitel 3.3.2) bekannt sind. Grundsätzlich kann abgeleitet werden, dass durch den PEP und das spätere Produktsystem die Stakeholder und Wirkungskategorien des S-LCA (Tabelle 3-4) möglichst positiv beeinflusst werden sollten. Dazu müssen negative Auswirkungen wie Zwangsarbeit oder Korruption durch das strikte Einhalten der ILO-Kernarbeitsnormen und des LkSG wirksam vermieden werden. Positive Auswirkungen wie eine Erhöhung der Beschäftigungsquote und Steigerung der sozialen Sicherheit sollten aktiv gefördert werden, wie später in Kapitel 3.4.3 beschrieben.

***Socially Responsible Design nach Melles et al.***

Melles et al. [MeDM11] schlagen hierfür acht Kriterien zur Messung des Erfolgs von sozial verantwortlichem Design vor, aus denen man folgende Regeln ableiten kann:

- **Bedarfsorientierung:** Produkte und Lösungen sollten auf den tatsächlichen Bedarf der Nutzer und der Gemeinschaft ausgerichtet sein
- **Kulturelle Angemessenheit:** Der Entwurf und die Implementierung von Produkten sollten kulturell sensibel und angemessen sein. Dies bedeutet, dass lokale Traditionen und Werte berücksichtigt und respektiert werden müssen.
- **Erschwinglichkeit:** Produkte sollten auf lokaler und regionaler Ebene erschwinglich sein.
- **Lokale Förderung:** Die Produktentstehung sollte zur Schaffung lokaler und regionaler Arbeitsplätze beitragen und die Entwicklung neuer Fähigkeiten fördern.
- **Lokale Kontrolle:** Lösungen sollten so konzipiert sein, dass sie lokal verstanden, kontrolliert und langfristig aufrechterhalten werden können.
- **Benutzerfreundlichkeit:** Produkte sollten flexibel und anpassungsfähig an sich ändernde Umstände und Bedürfnisse sein.
- **Befähigung:** Die Produktentstehung sollte darauf abzielen, die Gemeinschaft zu befähigen, die Lösung zu entwickeln, zu besitzen und weiterzuführen.
- **Vermeidung von Abhängigkeit:** Produkte und Lösungen sollten die Abhängigkeit von externen Ressourcen minimieren, insbesondere bei Ländern der Dritten Welt. Stattdessen sollten sie auf lokale Ressourcen und Fähigkeiten setzen, um die Eigenständigkeit und Resilienz der Gemeinschaft zu fördern.

Diese Regeln verdeutlichen durch den Fokus auf lokale Verhältnisse, dass sozial nachhaltige Produktentstehung stets im entsprechenden Kontext zu betrachten ist und dem oft subjektiven Empfinden der beteiligten Stakeholder unterliegt.

Da keine allgemeingültige, international anerkannte Richtlinie oder Methode gefunden werden konnte, die ausschließlich die soziale Dimension umfassend als Synthesemethode abdeckt, werden stellvertretend im Folgenden zwei speziellere Ansätze vorgestellt. Ganzheitliche Ansätze, die auch die anderen beiden Dimensionen inkludieren, werden in Kapitel 3.3.6 präsentiert.

***Design for the Base of the Pyramid und Frugale Innovationen***

Im Rahmen der sozial orientierten Designstrategien werden unter anderem das „Design for the Base/Bottom of the Pyramid“ (DfBoP) oder „Frugale Innovationen“ genannt [BrWo14]. Als „Base of the Pyramid“ (BoP) wird allgemein der unterste Teil der Welteinkommenspyramide oder Vermögenspyramide bezeichnet [SaPr11]. Prahalad und Hart [PrHa04] schätzen den ärmsten Anteil der Weltbevölkerung im Jahr 2004 auf circa vier Milliarden Menschen, die meist in Ländern ohne moderne Infrastruktur leben und wenig bis keine Produkte zur Befriedigung der menschlichen Grundbedürfnisse zur Verfügung haben. Sie sehen in der Investition in solche Märkte ein großes Potential zur Verbesserung der sozialen Bedingungen vor Ort und als Testfeld für die Entwicklung umweltverträglicher Technologien und Produkte für die ganze Welt [PrHa04]. Um in diesen

Märkten erfolgreich zu sein und einen Beitrag zur sozialen Nachhaltigkeit zu leisten, bedarf es weit mehr als nur geringfügiger Änderungen an bestehenden Produkten [Janc07]. Nach Rocchi [Rocc06] besteht die Herausforderung darin, zugängliche und erschwingliche Lösungen zu schaffen, die den lokalen wirtschaftlichen und soziokulturellen Präferenzen entsprechen, ohne den Verbrauch von Umweltressourcen dabei zu erhöhen. Das DfBoP zielt darauf ab, passende **Produkte für den ärmsten Teil der Weltbevölkerung** zu entwickeln und insbesondere deren **Grundbedürfnisse** zu decken, weswegen sie als Synthesemethode in der sozialen Nachhaltigkeitsdimension vorgestellt wird.

Wie in Abbildung 3-19 dargestellt, identifizieren Castillo et al. [CaJH12] in einem integralen Ansatz zur Produktentstehung für die BoP Anforderungen aus vier verschiedenen Bereichen auf Basis einer Literaturrecherche. Im ersten Bereich **Nachhaltigkeit** (sustainability) soll hinterfragt werden, was aus sozialer und ökologischer Sicht zwingend erforderlich ist. Der Bereich der ökonomischen **Tragfähigkeit** (viability) stellt Anforderungen aus der finanziellen Sicht dar, welche oft die kritischsten Randbedingungen darstellen. Es muss festgestellt werden, welche Zahlungsfähigkeit und Zahlungsbereitschaft die Kunden haben und ein entsprechendes Geschäftsmodell gefunden werden, was aufgrund der Armutsverhältnisse in der BoP oft als Herausforderung gilt. Der dritte Bereich der **Bedürfnisse** (desirability) leitet Anforderungen aus den Wünschen der Kunden bzw. Nutzer für den PEP ab. Hierbei sollten die späteren Nutzer und gegebenenfalls die lokalen Produzenten von Beginn an miteinbezogen werden, um Lösungen zu schaffen, die wirklich auf die Bedürfnisse der BoP zugeschnitten sind. Die **Machbarkeit** (feasibility) untersucht als letzten Bereich die technische Umsetzbarkeit und mögliche Innovation unter den gegebenen Randbedingungen der BoP. [CaJH12]

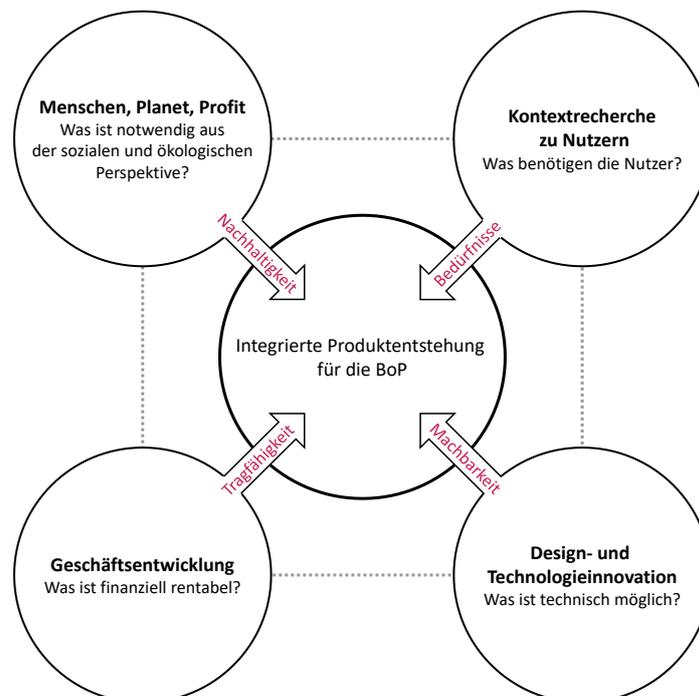


Abbildung 3-19: Ansatz der integrierten Produktentstehung für BoP frei übersetzt nach [CaJH12]

In Abgrenzung zur Arbeit von Castillo et al. identifizieren Jagtap et al. [JaLK13] fünf grundlegende Ansätze für die Herausforderungen beim DfBoP. Die Lösungsansätze umfassen die **Anpassung von Produkten und Prozessen** durch Neugestaltung, Innovationen in Geschäftsprozessen und technologische Anpassungen sowie **Investitionen zur Beseitigung von Marktbarrieren**, einschließlich der Bildung der Verbraucher. Zudem betonen sie die **Nutzung der Stärken der Armen**, indem ihr Wissen, ihre Netzwerke und Fähigkeiten in die Entwicklung und Implementierung von Projekten einbezogen werden sowie die **Kombination von Ressourcen und Fähigkeiten** durch Kooperationen und Partnerschaften mit verschiedenen Organisationen. Schließlich wird der **politische Dialog mit Regierungen** als wesentlich angesehen, um regulatorische und bürokratische Hürden zu überwinden und so eine nachhaltige Entwicklung der BoP zu fördern. [JaLK13]

„Frugale Innovationen“ können zudem eine als eine Lösung angesehen werden, den Bedürfnissen der BoP gerecht zu werden [BaBS13]. Tiwari et al. [TiFK16] definieren diese wie folgt: „**Frugale Innovationen** zielen darauf ab, attraktive Wertangebote für ihre Zielkundengruppen zu schaffen, indem sie sich auf Kernfunktionalitäten konzentrieren und so den Einsatz von materiellen und finanziellen Ressourcen in der gesamten Wertschöpfungskette minimieren. Sie reduzieren die Nutzungs- und/oder Betriebskosten erheblich und erfüllen oder übertreffen dabei die vorgeschriebenen Qualitätsstandards (frei aus dem Englischen übersetzt).“ Da frugale Innovationen nicht per se nachhaltig sein müssen, zeigt Albert [Albe19] die positiven und negativen Verbindungen zwischen frugalen Innovationen und Nachhaltigkeit auf.

#### **“Design für alle” nach DIN EN 17161**

Als weitere Synthesemethode in der sozialen Dimension wird im Sinne der Inklusion aller Menschen der „Design für alle“-Ansatz nach DIN EN 17161 [DIN19d] von 2019 vorgestellt, welcher auf die Barrierefreiheit von Produkten, Waren und Dienstleistungen abzielt. Synonyme Bezeichnungen dazu sind unter anderem „barrierefreies Design“, „barrierefreie Gestaltung“, „inklusive Gestaltung“, „generationenübergreifende Gestaltung“ und „universelles Design“, welches auch als ein Prinzip für soziale Verantwortung und damit der nachhaltigen Entwicklung angesehen wird [DIN19d, ISO10].

Die DIN EN 17161 definiert Anforderungen und Empfehlungen für Organisationen, um Produkte, Waren und Dienstleistungen zugänglich, verständlich und nutzbar zu gestalten und diese für einen breiten Benutzerkreis, einschließlich Menschen mit Behinderungen und älterer Menschen, zu entwickeln und bereitzustellen. Zudem unterstützt die Richtlinie die Einhaltung gesetzlicher und behördlicher Anforderungen zur Barrierefreiheit, ohne dabei konkrete technische Gestaltungsspezifikationen vorzugeben. Jedoch werden neben Verweisen auf die erfolgreiche organisatorische Integration des Ansatzes miteinander verbundene Gestaltungsaktivitäten beschrieben, die als iterativer Prozess durchlaufen werden können. [DIN19d]

Die **vier Aktivitäten** nach DIN EN 17161 lauten:

- „Die vorgesehenen Benutzer und der Nutzungskontext sind zu identifizieren
- Die Erfordernisse, Merkmale, Fertigkeiten und Präferenzen der Benutzer sind zu analysieren, verstehen und beschreiben, sodass diese in die Anforderungsspezifikation einbezogen werden können
- Lösungen sind zu entwickeln, um die Benutzeranforderungen zu erfüllen
- Lösungen sind in Abhängigkeit von den Erfordernissen, Merkmalen, Fertigkeiten und Präferenzen der Benutzer sowie den Benutzeranforderungen zu bewerten“ [DIN19d]

Diese Aktivitäten werden im Anhang der Richtlinie mit exemplarischen Ergebnissen erläutert.

### 3.3.4 Synthesemethoden in der ökonomischen Dimension

In diesem Abschnitt werden Synthesemethoden vorgestellt, die im PEP dabei unterstützen, ökonomisch möglichst nachhaltige Produkte und Systeme zu entwickeln. Wie im Grundlagenkapitel 2.1.4 erwähnt, ist ein Hauptaspekt dabei die langfristige wirtschaftliche Tragfähigkeit der unternehmerischen Tätigkeiten, die im derzeitigen Wirtschaftssystem durch das Erzielen von Gewinnen erreicht werden kann. Um diese Gewinne erzielen zu können, müssen sowohl das Produkt als auch das dazugehörige Geschäftsmodell passend für den Zielmarkt entworfen werden. Im aktuellen Forschungsstand existieren Methoden auf Produktebene und auf Geschäftsmodellebene, die im Folgenden separat vorgestellt werden.

#### **Methoden auf Produktebene**

Das Dilemma der Produktentwicklung beschreibt die Tatsache, dass die Möglichkeit zur Kostenbeeinflussung eines Produkts zu Beginn des PEP am größten ist, jedoch die meisten Kosten erst später im Produktlebenszyklus entstehen, wodurch dem Produktentwickler eine besondere Verantwortung zugesprochen wird [EKLM14]. Die Berücksichtigung von wirtschaftlichen Gesichtspunkten und die Abschätzung von Kosten während des PEP gehören daher längst zu den wesentlichen Aufgaben des Produktentwicklers [VDI90]. Aufgrund dessen existiert eine umfangreiche Menge an Fachliteratur und Richtlinien zur Integration der Kostensicht in den PEP [EhLK13, EKLM14, Krem07, VDI87, VDI90, VDI97c, VDI97b, VDI98a, VDI98b]. Zunächst werden die wichtigsten Richtlinien des VDI kurz erläutert.

Die Richtlinie „**VDI 2234** - Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur“ [VDI90] soll dem Produktentwickler die wichtigsten ökonomischen Grundkenntnisse bereitstellen und dessen Kostenverantwortung im PEP herausarbeiten. Sie stellt außerdem die wirtschaftlichen Begrifflichkeiten für die „**VDI 2235** - Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren - Methoden und Hilfen“ [VDI87] bereit, die wiederum konkrete Hilfsmittel für das kostengünstige Konstruieren vor allem für die „Einzel- und Kleinserienfertigung“ beinhaltet. Das konstruktive Vorgehen entspricht dabei der damals gültigen VDI 2221 [VDI86, VDI87]. Im engen Zusammenhang zu den vorigen Normen steht die „**VDI 2225** – Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren“

[VDI97c], die in insgesamt in vier Blätter unterteilt ist. Hierin werden die „Vereinfachte Kostenermittlung“ (Blatt 1 [VDI97c]), ein „Tabellenwerk“ (Blatt 2 [VDI98a]) mit technisch-wirtschaftlichen Kenngrößen, die „Technisch-wirtschaftliche Bewertung“ (Blatt 3 [VDI98b]) und die „Bemesungslehre“ (Blatt 4 [VDI97b]) unter anderem mit Beispielen detailliert erläutert. Auch wenn diese Richtlinien bereits vor über 25 Jahren veröffentlicht wurden, sind sie weiterhin gültig und stellen die wichtigsten Zusammenhänge und Grundlagen bereit, wobei heutzutage beispielsweise Materialdatenbanken (wie [Ansy20]) aktuellere und umfassendere Daten zur Kostenrechnung bereitstellen können.

Als eine der wichtigsten Methoden zur Kostensteuerung im PEP hat sich außerdem das **Target Costing** etabliert [EKLM14], weswegen diese Methode stellvertretend für die produktspezifischen Ansätze vorgestellt wird. Target Costing ist ein stark marktorientiertes Instrument zum strategischen Kostenmanagement, dessen Ziel darin besteht, die Stückkosten der Produkte im Vorhinein festzulegen [Krem07]. Bei der klassischen „bottom up“ Preiskalkulation (Abbildung 3-20, links) wird der Marktpreis durch die entstandenen Herstellkosten des Produkts und dem benötigten Overhead bestimmt („Was wird ein Produkt kosten?“ [Krem07]). Im Gegensatz dazu wird beim Target Costing auf Basis der Frage „Was darf ein Produkt kosten?“ [Krem07] zunächst ein Zielpreis bzw. ein **zulässiger Marktpreis** ermittelt, beispielsweise durch eine Marktanalyse, Wettbewerbsanalyse oder Kundenbefragungen. Wie in Abbildung 3-20 rechts dargestellt, wird in diesem „top down“ Ansatz von dem angestrebten Zielpreis der angestrebte Gewinn und der Overhead abgezogen, woraus sich die zulässigen Herstellkosten für das Produkt ergeben. Diese stellen die Zielkosten für den Produktentwickler dar, der das Produkt im PEP so konstruieren muss, dass diese nicht überschritten werden [EKLM14]. Durch Zielkostenspaltung kann der Zielpreis weiter auf die Komponenten oder Funktionen des Produkts mit Hilfe weiterer Methoden (z.B. Conjoint-Analyse) aufgeteilt werden [Krem07].

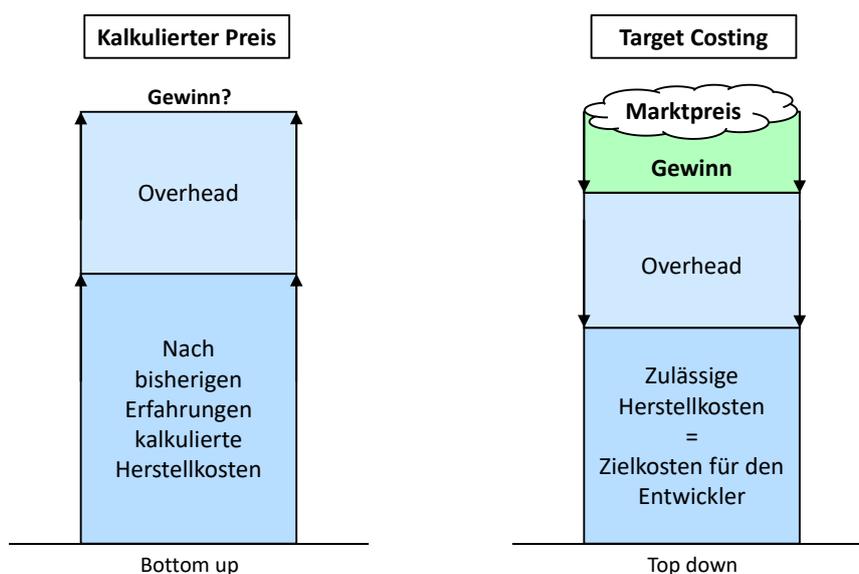


Abbildung 3-20: Target Costing in Abgrenzung zur klassischen Kostenkalkulation in Anlehnung an [EKLM14]

Durch das Target Costing kann die Marktorientierung der Produkte gefördert und somit sichergestellt werden, dass diese den Kundenanforderungen entsprechen und am Markt wettbewerbsfähig sind. Insbesondere durch die frühzeitige und kontinuierliche Einbindung dieser Methode zur Kostenkontrolle im PEP wird das Risiko von Kostenüberschreitungen minimiert und somit ein späterer Gewinn gesichert. Durch die systematische Kosten- und Gewinnsteuerung kann weiterhin auf Unternehmensebene eine strategische Planung ermöglicht werden und somit zu dem langfristigen wirtschaftlichen Bestehen des Unternehmens im Sinne der ökonomischen Nachhaltigkeit beigetragen werden.

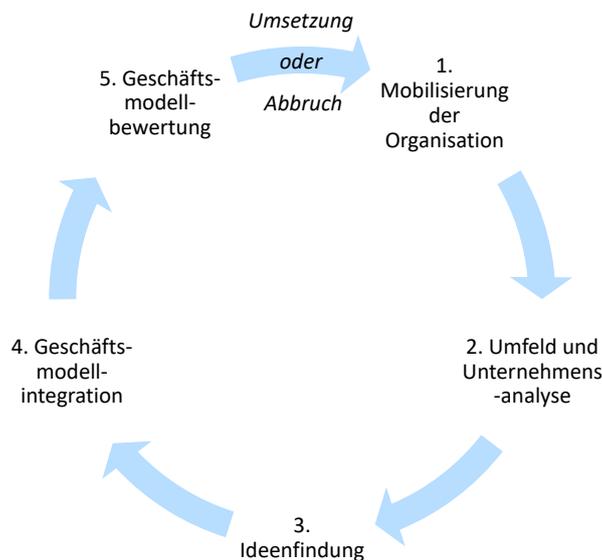
Abschließend ist zu bemerken, dass diese Methoden im Gegensatz zum Ecodesign für die ökologische Dimension nicht explizit als Synthesemethoden für die ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit entworfen wurden, sondern eher generischer Natur sind und zur Integration der wirtschaftlichen Sichtweise im PEP allgemein dienen. Ansätze, die gesondert auf eine ökonomisch nachhaltige Entwicklung auf Produktebene abzielen, konnten in der Literaturrecherche nicht identifiziert werden. Jedoch existieren mehrere Konzepte auf Geschäftsmodellebene, wie im nächsten Abschnitt beschrieben.

### **Methoden auf Geschäftsmodellebene**

Die Gestaltung des Geschäftsmodells gewinnt mit Fokus auf Nachhaltigkeit zunehmend an Bedeutung und kann als Instrument dienen, um technologische und soziale Innovationen im Bereich der Nachhaltigkeit auf Systemebene zu koordinieren [BSRE14]. Lüdeke-Freund definiert ein **nachhaltiges Geschäftsmodell** als „ein Geschäftsmodell, das Wettbewerbsvorteile durch überlegenen Kundennutzen schafft und zu einer nachhaltigen Entwicklung des Unternehmens und der Gesellschaft beiträgt“ (frei aus dem Englischen übersetzt nach [Lüde10]). Die Untersuchung von Bocken et al. [BSRE14] zeigt, dass es viele verschiedene **Typologien** von nachhaltigen Geschäftsmodellen gibt, die sich in technologische, soziale und organisatorische Geschäftsmodelle gruppieren lassen. Daraus werden acht verschiedene Typen abgeleitet, die von der Maximierung der Material- und Energieeffizienz bis zur Entwicklung von Skalierungslösungen reichen und von den Autoren mit Beispielen aus der Praxis veranschaulicht werden [BSRE14]. Ahrend [Ahre16] erweitert und detailliert die Typologie und schlägt sieben Geschäftsmodelltypen vor, die sich in weiteren 28 Segmenten beschreiben lassen. Zu den Typen zählen „Gesundheit, Empowerment, Sozialer Zusammenhalt, Ökoeffektivität, Ökoeffizienz, Sharing Economy sowie Motivation und Bildung“ [Ahre16], wobei sich Geschäftsmodelle durchaus mehreren Typen zuordnen lassen. Dormeier et al. schlagen entsprechend eine systemische Perspektive zur Gestaltung nachhaltiger Geschäftsmodelle vor [DMNA24]. In Anbetracht der aufgezeigten Varianz an nachhaltigen Geschäftsmodellen und der engen Verknüpfung mit anderen Fachgebieten wie den Wirtschaftswissenschaften, kann im Rahmen dieser Arbeit keine umfassende Behandlung der nachhaltigen Geschäftsmodellentwicklung durchgeführt werden. Stattdessen werden dazu zwei Ansätze vorgestellt und im Anschluss am Beispiel der Produkt-Service-Systeme (PSS) erläutert, warum die Einbeziehung

des Geschäftsmodells insbesondere bei der *Nachhaltigen Produktentstehung* gemeinhin erforderlich ist.

Zunächst wird das „**Phasenmodell für die Entwicklung nachhaltiger Geschäftsmodelle**“ nach Ahrend [Ahre16] beschrieben. Wie in Abbildung 3-21 dargestellt, besteht das Modell aus fünf wiederkehrend durchlaufbarer Phasen, um beispielsweise strategische Anpassungen zu ermöglichen. In jeder Phase stehen weiterführende Methoden und Strategien zur Umsetzung zur Verfügung. In der ersten Phase geht es um die „**Mobilisierung der Organisation**“, wobei auf organisatorischer Ebene die Voraussetzungen für neue Geschäftsmodelle geschaffen werden sollen. Dazu können unter anderem die Unternehmensstrategie und die Managementsysteme angepasst sowie die Rahmenbedingungen für nachhaltigkeitsrelevante Analysen des Unternehmens und dessen Wertschöpfungsketten geschaffen werden. Somit kann im zweiten Schritt eine umfassende „**Umfeld- und Unternehmensanalyse**“ durchgeführt werden, um relevante Stakeholder und bestehende Ressourcen zu identifizieren. Dadurch wird eine Grundlage geschaffen, um in der dritten Phase, der „**Ideenfindung**“, entweder weitere nachhaltige Geschäftsideen zu entwickeln oder die Nachhaltigkeit des bestehenden Geschäftsmodells zu optimieren. Im vierten Schritt, der „**Geschäftsmodellintegration**“, wird die Geschäftsidee um weitere Komponenten erweitert und zu einem umsetzbaren Geschäftsmodell ausgeweitet. Die anschließende „**Geschäftsmodellbewertung**“ bildet die fünfte und letzte Phase und soll Kriterien wie das Erfolgspotential, benötigte Ressourcen, die Skalierbarkeit und potenzielle Risiken evaluieren. Auf Grundlage dieser Bewertung kann entschieden werden, ob das entwickelte nachhaltige Geschäftsmodell umgesetzt wird und die Phasen erneut durchlaufen werden oder ob die Entwicklung abgebrochen werden sollte. [Ahre16]



**Abbildung 3-21: Phasenmodell für die Entwicklung nachhaltiger Geschäftsmodelle nach [Ahre16]**

Ein weiterer Ansatz zur Entwicklung, Beschreibung und Bewertung von Geschäftsmodellen sowie dessen Komponenten, bietet das renommierte „**Business Model Canvas**“ (BMC) nach Osterwalder und Pigneur [OsPC10]. Es beschreibt das Grundkonzept, wie ein Unternehmen Werte schafft,

liefert und erfasst, gegliedert in neun zueinander abgegrenzte Bausteine. Diese Bausteine helfen dabei die Geschäftslogik zu verstehen und Innovation innerhalb des Geschäftsmodell zu fördern. Wegen seiner weiten Verbreitung und breiten Akzeptanz existieren mehrere Erweiterungen des klassischen BMC zur Integration von Nachhaltigkeitsaspekten, wie die Modelle von Ahrend [Ahre16], Joyce und Paquin [JoPa16] oder von Faust und Lotter [FaLo18]. Es wird zunächst das klassische BMC nach Osterwalder und Pigneur [OsPC10] (Abbildung 3-22 oben) beschrieben und dann die Erweiterungen von Joyce und Paquin [JoPa16] um zwei weitere Nachhaltigkeitsdimensionen (Abbildung 3-22 mitte und unten) umschrieben.

Das BMC ist so aufgebaut, dass die neun Bausteine in einer übersichtlichen, visuellen Anordnung auf einem einzigen Schaubild („canvas“ frei aus dem Englischen übersetzt: „Leinwand“) dargestellt werden können. Diese Anordnung ermöglicht es, die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Elementen eines Geschäftsmodells effizient zu erkennen. Auf der rechten Seite des Canvas befinden sich die **Kundensegmente** (Customer Segments), die verschiedene Gruppen von Personen oder Organisationen definieren, welche ein Unternehmen erreichen und bedienen möchte. Zentral positioniert sind die **Wertangebote** (Value Propositions), welche die Produkte und Dienstleistungen beschreiben, die für die Kundensegmente Wert generieren, deren Probleme lösen oder Bedürfnisse befriedigen. Rechts neben den Wertangeboten befinden sich die **Kanäle** (Channels), die erklären, wie ein Unternehmen seine Kundensegmente erreicht und ihnen das Wertangebot bereitstellt. Oberhalb der Kanäle sind die **Kundenbeziehungen** (Customer Relationships) angeordnet, welche die Art und Weise beschreiben, wie das Unternehmen mit seinen Kunden interagiert, sie gewinnt und bindet. Unterhalb der Wertangebote und Kanäle sind die **Einnahmequellen** (Revenue Streams) platziert, die darstellen, wie das Unternehmen durch die Bereitstellung der Wertangebote Einnahmen generiert. Auf der linken Seite des Canvas befinden sich die **Schlüsselressourcen** (Key Resources), die die zentralen Vermögenswerte repräsentieren, welche erforderlich sind, um das Geschäftsmodell zu betreiben und die Wertangebote bereitzustellen. Oberhalb der Schlüsselressourcen befinden sich die **Schlüsselaktivitäten** (Key Activities), die die wesentlichen Aktivitäten beschreiben, die ein Unternehmen durchführen muss, um sein Geschäftsmodell erfolgreich umzusetzen. Links neben den Schlüsselressourcen sind die **Schlüsselpartnerschaften** (Key Partnerships) angeordnet, die das Netzwerk von Lieferanten und Partnern umfassen, welche zur Umsetzung des Geschäftsmodells beitragen. Schließlich befindet sich unterhalb der Schlüsselressourcen und -aktivitäten die **Kostenstruktur** (Cost Structure), die alle Kosten beschreibt, die bei der Umsetzung und Aufrechterhaltung eines Geschäftsmodells anfallen. Es wird empfohlen das BMC mit mehreren Teilnehmern gemeinsam einer großen Fläche mit Klebezetteln oder auf digitalem Weg schrittweise auszufüllen und somit nach und nach ein vollständiges Geschäftsmodell zu erarbeiten. [OsPC10]

Wie aus Abbildung 3-22 ersichtlich wird, haben Joyce und Paquin [JoPa16] das BMC um zwei weitere Ebenen zur Betrachtung und Entwicklung der sozialen und ökologischen Aspekte des Geschäftsmodells im sogenannten „**Triple Layered Business Model Canvas**“ (TLBMC) erweitert.

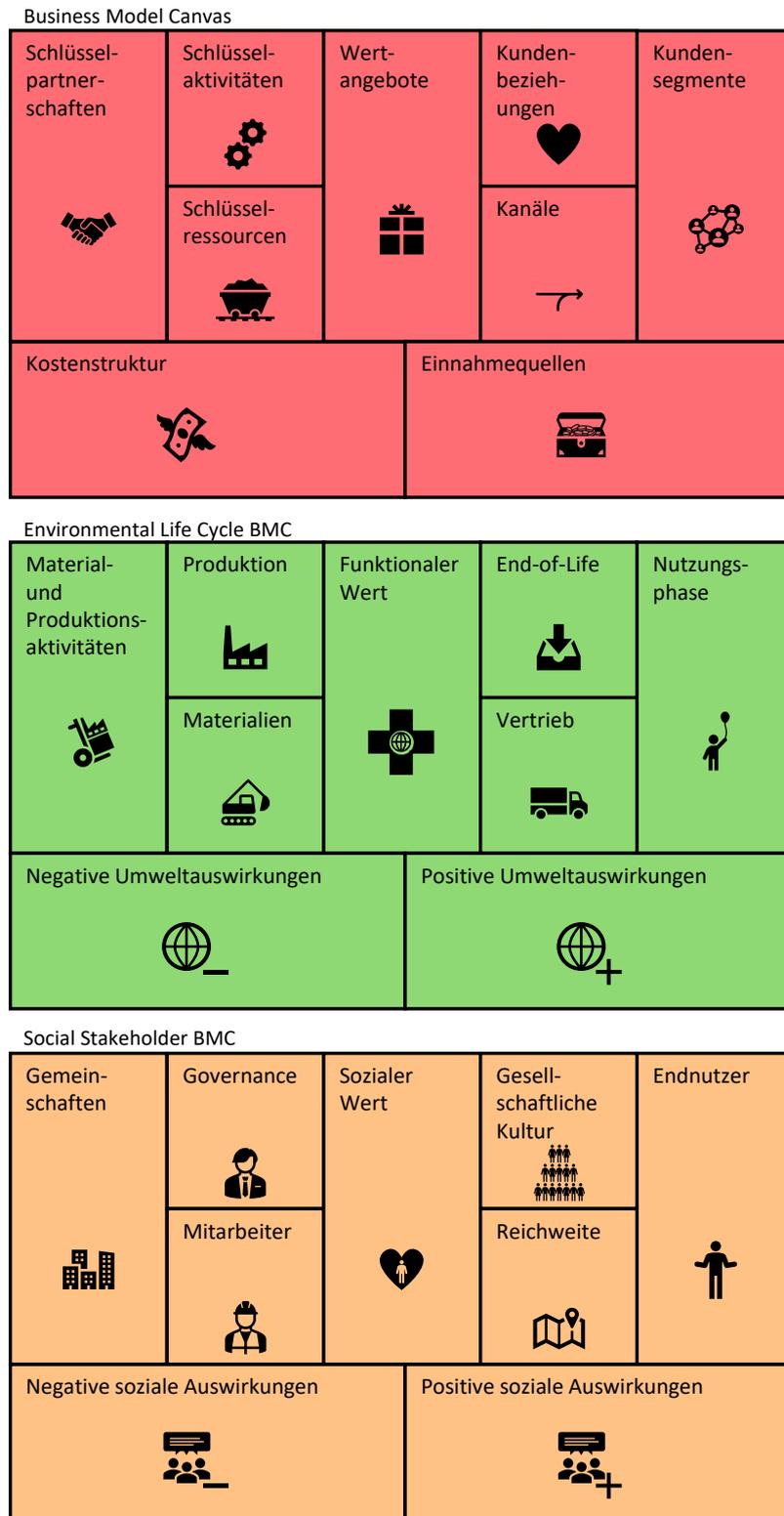


Abbildung 3-22: Triple Layered Business Model Canvas nach [JoPa16] (frei übersetzt)

Die Anordnung der Elemente orientiert sich an dem klassischen, ökonomisch orientierten BMC. Es ist anzumerken, dass die Nutzung des TLBMC sowohl Analyse-, als auch Synthesecharakter aufweist und daher nicht trennscharf als reine Synthesemethode bezeichnet werden kann. Das in dieser Arbeit vorgestellte Modell nutzt das TLBMC sowohl als Synthesemethode zur Generierung nachhaltiger Geschäftsmodelle als auch zur Analyse dieser.

Im „**Environmental Life Cycle BMC**“ werden neun weitere Bausteine eingeführt, die die ökologischen Aspekte entlang der Wertschöpfungskette des Geschäftsmodells betrachten. Durch die Integration der ökologischen Bausteine in das BMC können Unternehmen ihre Geschäftsmodelle nachhaltiger gestalten und fundierte Entscheidungen zur Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeitsaspekte treffen. Der zentrale Baustein beschreibt den **Funktionalen Wert** (Functional value), also die primären Leistungen oder das Produkt des entsprechenden Geschäftsmodells. Der **Materialien-Baustein** (Materials) umfasst die physischen Ressourcen, die zur Erbringung des funktionalen Werts benötigt werden. Er befindet sich unter dem Baustein **Produktion** (Production), der die umweltrelevanten Prozesse zur Bereitstellung des Funktionalen Werts beschreibt. Linksseitig dieser Bausteine sind die externen **Material- und Produktionsaktivitäten** (Supplies and Outsourcing) angeordnet. Auf der rechten Seite wird im Baustein **Vertrieb** (Distribution) die Aspekte durch den Transport der Produkte bzw. die Logistik der Dienstleistungen erfasst. In der **Nutzungsphase** (Use Phase) wird der Einfluss der Nutzung durch den Kunden untersucht und im **End-of-Life** Baustein entsprechend die Aspekte der Entsorgung und Wiederverwendung der Produkte und Ressourcen im Geschäftsmodell. Die untere Zeile fasst die Umweltauswirkungen in **negative** (Environmental Impacts) und **positive Auswirkungen** (Environmental Benefits) zusammen. [JoPa16]

Die dritte Ebene des TLBMC wird als „**Social Stakeholder BMC**“ bezeichnet und erinnert an die Kategorien des S-LCA (Kapitel 3.2.3). Analog zu den anderen beiden Ebenen ist zentral der Baustein **Sozialer Wert** (Social Value) angeordnet, der den sozialen Mehrwert für die Stakeholder und die Gesellschaft im Allgemeinen umschreibt. Links hiervon fasst der Baustein **Mitarbeiter** (Employees) die Arbeitsbedingungen und relevante demographische Merkmale zusammen. Darüber befindet sich **Governance**, in dem die Organisationstruktur und Entscheidungsprozesse im Geschäftsmodell bzw. im Unternehmen beschrieben sind. Im Baustein **Gemeinschaften** (Local Communities) werden die Beziehungen und Wechselwirkungen zu den lokalen Gemeinschaften zusammengefasst. Auf der gegenüberliegenden Seite wird im Element **Reichweite** (Scale of Outreach) die Tiefe und Breite der Einflussnahme des Geschäftsmodells und somit auch der geographische Einfluss lokal, regional und global dargestellt. Darüber werden im Baustein **Gesellschaftliche Kultur** (Societal Culture) die potenziellen Auswirkungen einer Organisation auf die Gesellschaft als Ganzes benannt. Am rechten Rand wird unter **Endnutzer** (End-User) beschrieben, wie das Wertversprechen die Bedürfnisse dieser erfüllt und zur Lebensqualität beiträgt. Unten werden identisch zur ökologischen Ebene die **negativen** (Social Impacts) und **positiven sozialen Auswirkungen** (Social Benefits) zusammengefasst. Durch die Integration dieser sozialen und ökologischen Ebene in das BMC können Geschäftsmodelle verantwortungsvoller im Sinne der Nachhaltigkeit gestaltet werden, da von Beginn der Geschäftsmodellentwicklung an die relevanten Bausteine im Fokus sind. [JoPa16]

Abschließend werden in diesem Kapitel die **Produkt-Service-Systeme** (PSS) vorgestellt, die eine besondere Verknüpfung zwischen dem eigentlichen Produkt und dem Geschäftsmodell darstellen. „Ein Product-Service System (PSS) oder Produkt-Dienstleistungssystem ist eine spezifische

Art von Wertangebot, das ein Unternehmen (Netzwerk) seinen Kunden anbietet (oder mit ihnen ko-produziert). Ein PSS besteht aus einer Mischung aus materiellen Produkten und immateriellen Dienstleistungen, die so konzipiert und kombiniert sind, dass sie gemeinsam in der Lage sind, die Kundenbedürfnisse zu erfüllen.“ [Tisc21, TiVT02] In bestimmten Fällen können PSS einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leisten [DMBB16], insbesondere bei der Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft [Tisc21] (siehe auch Kapitel 3.3.5). Sie erlauben es, dass ein Produkt von mehreren Personen genutzt wird (z.B. Car-Sharing), was beispielsweise die Materialeffizienz erhöhen kann. Außerdem kann ein entsprechendes Geschäftsmodell die effiziente Kreislaufführung von gemeinsam genutzten Produkten, deren Komponenten und Materialien ermöglichen. Dies wird durch den aktuellen Entwurf der DIN/TS 35205 „Leitfaden zur Wiederverwendung und Vorbereitung zur Wiederverwendung - Empfehlungen für Aufbau, Durchführung und Optimierung entsprechender Geschäftsmodelle“ [DIN23a] belegt. Daher ist die Betrachtung des Geschäftsmodells aus Nachhaltigkeitssicht zunehmend eine notwendige Prämisse, sowohl in der Analyse- als auch in der Synthese des Produktsystems. Tukker [Tukk04] hat, wie in Abbildung 3-23 dargestellt, verschiedene Kategorien von PSS aufgezeigt. Diese reichen vom reinen Produkt, das vollständig an den Endkunden verkauft wird, bis zum reinen Service bzw. der Dienstleistung, die vom Unternehmen umgesetzt wird. Dazwischen gibt es unterschiedliche Abstufungen der **produktorientierten, nutzungsorientierten und ergebnisorientierten PSS**. Die Umsetzungsarten sind vielfältig und erfordern eine gemeinsame Entwicklung von Produkt und Geschäftsmodell in enger Abstimmung zueinander, um den maximalen Nutzen für den Kunden, das Unternehmen und die Nachhaltigkeit zu erzielen. PSS werden auch im industriellen Maßstab zunehmend umgesetzt [MeUh17].

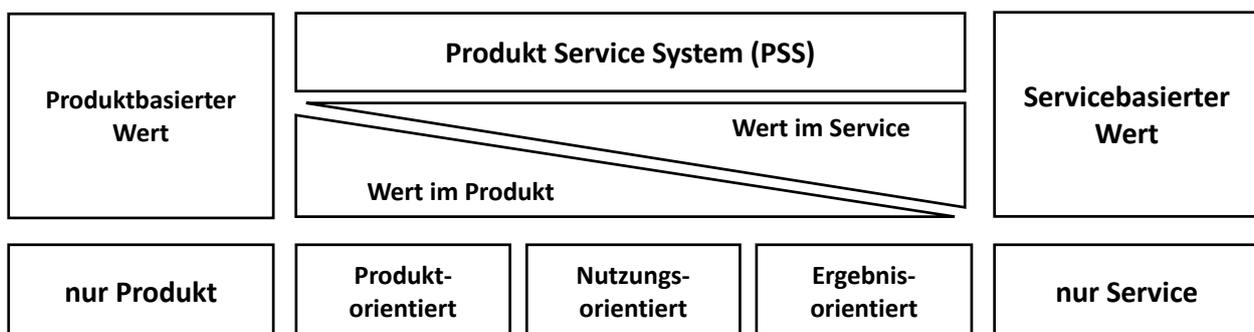


Abbildung 3-23: Produkt-Service-Systeme in Anlehnung an [Tukk04]

### 3.3.5 Synthesemethoden zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit

In diesem Kapitel werden Synthesemethoden zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit separat zusammengefasst. Teilweise bestehen hierbei starke Überschneidungen zu den Ecodesign-Strategien aus Kapitel 3.3.2. Wie die historische Entwicklung (Kapitel 3.1) aufzeigt, existiert eine Vielzahl an Strategien, Ansätzen und Methoden, die durch die politischen Bestrebungen zur Transformation hin zu einer Kreislaufwirtschaft nochmals ausgedehnt wurden. Da es keine einheitliche Klassifizierung der Methoden gibt, bestehen unterschiedliche Vorschläge diese einzuordnen

[BoPé18, DiRB22, DSRB21, MDRC16, MeCo17, ReVW18, Spre22], wovon eine Auswahl vorgestellt wird. Als Besonderheit gegenüber klassischen produktbezogenen Methoden, wird bei der Entstehung von zirkulären Systemen insbesondere die simultane Entwicklung von Produkt- und Geschäftsmodell als notwendig erachtet [BDBV16, DeBH17, MDRC16]. Es folgt eine Vorstellung verschiedener Klassifizierungen, um einen Überblick über die Strategien zu geben. Im Anschluss werden die Methoden der DIN 45560 [DIN23b], das C2C-Design nach Braungart und McDonough [BrMB07, McBr02], das CBMT nach Geissdörfer [GPPS20] und der „Morphologischer Kasten der Geschäftsmodelloptionen für die Kreislaufwirtschaft“ nach Lüdeke-Freund et al. [LüGB19] als Synthesemethoden vorgestellt.

### **Klassifizierungen der Strategien zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit**

Bocken et al. unterteilen die existierenden Produkt- und Geschäftsmodell bezogenen Ansätze in die drei Strategien „slowing, closing and narrowing loops“, also in das **Verlangsamem, Schließen und Reduzieren von Ressourcenkreisläufen**. In der ersten Strategie soll durch die Entwicklung von langlebigen Produkten und der Verlängerung der Produktlebensdauer (z. B. durch Reparaturen oder Wiederaufbereitung) auch die Nutzungsdauer erhöht oder die Nutzung intensiviert werden, was zu einer Verlangsamung der Ressourcenströme im Sinne der Kreislaufwirtschaft führt. Durch recyclingorientierte Gestaltung der Produktsysteme (beispielsweise durch einfach zerlegbare Produkte), sollen Kreisläufe nach der Nutzung geschlossen werden, um die Ressourcen in die Produktion neuer Produkte einfließen lassen zu können. Als Ergänzung zu diesen beiden Basisstrategien, versucht die dritte Strategie die Ressourcen pro Produktsystem insgesamt zu reduzieren, also die Ressourceneffizienz zu erhöhen. [BDBV16]

Eine detailliertere Einteilung ist mit der **10R-Typologie nach Reike et al.** [ReVW18] gegeben, die **zehn Werterhaltungsoptionen** (englisch: retention options) als Klassifizierung vorschlagen. Wie in Tabelle 3-7 dargestellt, können die verschiedenen Ansätze der Werterhaltung auf Produkt-, Komponenten- oder Materialebene wirken. Bei der Umsetzung der zehn Strategien werden Kernaktivitäten aus der Perspektive der Endkunden und der Produzenten getrennt betrachtet. Die farbliche Hinterlegung unterteilt die Werterhaltungsoptionen in **kurze (R0-R3), mittlere (R4-R6) und lange Kreisläufe (R7-R9)**. Die kurzen Kreisläufe befinden sich sehr nah am Kunden und werden in den meisten Literaturquellen aufgrund ihres hohen Werterhalts als zu bevorzugende Optionen bewertet. Die Verbindung zum Endkunden ist bei den mittleren Kreisläufen weniger direkt und es sind in der Regel fachkundige Geschäftsaktivitäten durch Unternehmen zur Umsetzung der Strategien notwendig. Die langen Kreisläufe sind am wenigsten zu bevorzugen, da diese Optionen mit größerem Umsetzungsaufwand verbunden sind und der Werterhalt schließlich insgesamt geringer ausfällt. Die genaue Beschreibung der einzelnen Werterhaltungsoptionen ist Tabelle 3-7 zu entnehmen. [ReVW18]

Tabelle 3-7: Die zehn Werterhaltungsoptionen nach Reike et al. [ReVW18]

R#	CE-Konzept	Zielobjekt	Aktivitäten aus Kundensicht	Aktivitäten aus Produzentensicht
R0	Refuse	Produkt	Konsum gänzlich vermeiden	Vermeiden von Verpackung, Giftstoffen, Neumaterial
R1	Reduce	Produkt	Konsum reduzieren, Produkte länger nutzen, Produkte gemeinschaftlich nutzen	Material- und Energieeinsatz minimieren
R2	Re-sell/ Re-use	Produkt	Kauf von Secondhand-Produkten, Verkauf nicht genutzter Produkte	Kaufen, sammeln, prüfen, reinigen, verkaufen
R3	Repair	Komponente	Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit des Produkts durch Reparatur oder Austausch beschädigter Teile	Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit des Produkts durch Reparatur oder Austausch beschädigter Teile
R4	Re-furbish	Komponente	Rückgabe zur Wartung im Rahmen eines Vertrags oder Rückgabe des Produkts	Austausch von Kernmodulen oder Komponenten, falls erforderlich
R5	Re-manufacture	Komponente	Rückgabe zur Wartung im Rahmen eines Vertrags oder Rückgabe des Produkts	Austausch von Kernmodulen oder Komponenten, falls erforderlich, Zerlegen, Wiederaussetzen
R6	Re-purpose (Rethink)	Komponente	Neues Produkt mit neuer Funktion kaufen	Entwerfen, entwickeln, vervielfältigen, verkaufen
R7	Re-cycle	Material	Abfalltrennung, Sekundärmaterial kaufen und verwenden	Erwerben, prüfen, trennen, zerkleinern, verteilen, verkaufen
R8	Recover (energy)	Energieinhalt	Nutzen von Energie aus thermischer Verwertung	Energieerzeugung als Nebenprodukt der Abfallbehandlung
R9	Re-mine	Deponiertes Material	Kauf und Verwendung von Sekundärmaterialien	Ausschlachten, Wiederaufbereiten, Verkaufen

Neben diesen eher produktorientierten Klassifizierungen, rücken durch die Notwendigkeit der Integration der Geschäftsmodellentwicklung [FGAH21] zunehmend Strategien auf Geschäftsmodellebene in den Vordergrund, wie die starke Zunahme an Veröffentlichungen zu diesem Thema in den letzten zehn Jahren zeigt [GPPS20].

Auf Basis der oben genannten Klassifizierung von Bocken et al. [BDBV16] und weiteren Vorarbeiten [GeVE18, GMDE18], unterteilen Geissdoerfer et al. die zirkulären Geschäftsmodelle in die vier grundlegenden Strategien „**Cycling, Extending, Intensifying, Dematerialising**“ [GPPS20]. Mittels eines entsprechenden Geschäftsmodells soll in der Strategie „**Cycling**“ Materialien und Energie innerhalb des Systems durch Wiederverwendung, Wiederaufbereitung, Aufarbeitung und Recycling in Kreisläufen geführt werden. Weiter kann durch die Geschäftsmodellstrategie „**Extending**“ die Nutzungsphase des Produkts durch langlebiges Design, Marketing, Wartung und Reparatur verlängert werden. Eine Intensivierung der Nutzungsphase („**Intensifying**“) kann durch

gemeinsame Nutzung, also Lösungen der Sharing Economy erreicht werden. Eine Dematerialisierung („**Dematerialising**“) kann erreicht werden, wenn das Geschäftsmodell den Produktnutzen ohne den Verkauf physischer Produkte durch den Ersatz mit Softwarelösungen oder Serviceleistungen (siehe auch PSS in Kapitel 3.3.4) bereitstellt. Durch diese Strategien können die Kernelemente des Geschäftsmodells auf unterschiedliche Weise gestaltet werden. Diese setzen sich in Anlehnung an das BMC (Kapitel 3.3.4) aus dem Wertangebot (Value proposition), der Wertgenerierung und -lieferung (Value creation & delivery), als auch der Wertschöpfung (Value capture) zusammen, wie unten im „Circular Business Model Tool“ gezeigt. [GPPS20]

Eine detaillierte Klassifizierung der Elemente wird von Lüdeke-Freund et al. in „A Review and Typology of Circular Business Model Patterns“ [LüGB19] gegeben. Sie unterteilen die genannten Elemente des Geschäftsmodells in **Hauptdimensionen** mit jeweils zwei Unterkategorien, wie in Tabelle 3-8 dargestellt. Zur Entwicklung von zirkulären Geschäftsmodellen präsentieren sie einen morphologischen Kasten mit 56 verschiedenen Gestaltungsoptionen, der unten im Anschluss an die produktbezogenen Synthesemethoden vorgestellt wird.

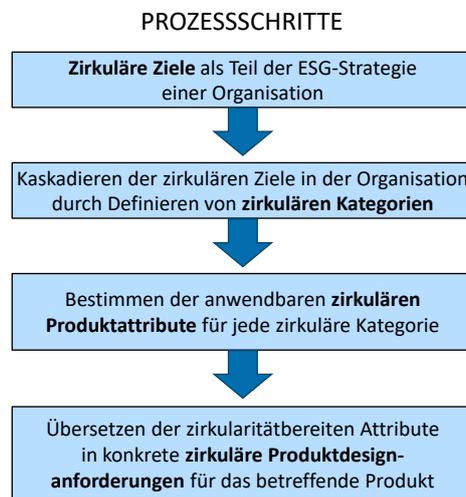
**Tabelle 3-8: Dimensionen eines zirkulären Geschäftsmodells nach [LüGB19] (frei übersetzt)**

Hauptdimension	Unterkategorie
Wertangebot (Value proposition)	Produkte
	Service
Wertlieferung (Value delivery)	Zielkunden
	Prozess der Wertlieferung
Wertgenerierung (Value creation)	Partner und Stakeholder
	Prozess der Wertgenerierung
Wertschöpfung (Value capture)	Erlöse
	Kosten

### **Gestaltung zirkulärer Produkte nach DIN EN 45560**

Der Normentwurf „DIN EN 45560 Methode zur Gestaltung von zirkulären Produkte“ [DIN23b] bietet eine systematische Synthesemethode zur Entwicklung von möglichst kreislauffähigen Produkten, auch wenn die Veröffentlichung noch aussteht. In dem Entwurf werden neben der Erläuterung der Grundbegriffe im Kontext des zirkulären Produktdesign auch Grundsätze und Konzepte zur Unterstützung dieses Designs beschrieben. Die drei Grundsätze erinnern an die Klassifizierung nach Bocken et al. [BDBV16] und lauten in Abgrenzung zu den in der Kreislaufwirtschaft unerwünschten linearen Flüssen „**Verringern, Verlangsamen und Schließen der Materialflüsse**“ [DIN23b]. Außerdem wird die gegenseitige Abhängigkeit der Zirkularität des Produktdesigns, des Geschäftsmodells und der Strategie einer Organisation betont. Um die Ziele der Kreislaufwirtschaft und der Materialeffizienz bestmöglich umzusetzen, beginnt die Umstellung auf zirkuläres Produktdesign auf **Organisationsebene**, wie in den **vier Prozessschritten** in Abbildung 3-24

dargestellt. **Zirkuläre Ziele** sollen in das bestehende Managementsystem integriert werden und somit auch Teil der ESG-Strategie einer Organisation werden. Ausgehend von den zirkulären Zielen werden im Folgeschritt sogenannte **zirkuläre Kategorien** identifiziert, die definiert sind als „von einer Organisation ausgewählte Themen, um Produkte zu gestalten, die mit den Grundsätzen einer Kreislaufwirtschaft übereinstimmen“ [DIN23b]. Dazu zählen beispielsweise **Geschäftsmodelle, die die Produkt- und Materialrückführung** innerhalb der Organisation verbessern können. In diesem Zusammenhang müssen die Grundsätze des Reduzierens, Verlangsamens und Schließens der Materialflüsse auf Organisations-, Geschäftsmodell- Produkt- und Materialebene berücksichtigt werden. Im nächsten Schritt werden für jede identifizierte Kategorie anwendbare **zirkuläre Produktattribute** bestimmt, die adressiert werden müssen, damit das jeweilige Produkt den Grundsätzen der Kreislaufwirtschaft entspricht. Dies erfordert eine umfassende Betrachtung aller Lebensphasen des Produkts und möglicher konstruktiver Hindernisse. Verpflichtende und unverbindliche zirkuläre Produktattribute müssen erörtert werden, um die angestrebten Ziele zu erreichen. Spezifische Fragen zur Designoptimierung sollten formuliert werden, wobei die **Materialwerthierarchie** zu berücksichtigen ist, um den Materialwert zu maximieren und Abfall zu minimieren. Zielkonflikte zwischen verschiedenen zirkulären Produktdesigns müssen in Einklang mit anderen Umweltauswirkungen und Qualitätsanforderungen gelöst werden. Bewährte Verfahren sollten über alle Lebensphasen hinweg berücksichtigt werden. Kapazitätsaufbau und Schulungen, einschließlich neuer Beziehungen zu den Nutzern, sind entscheidend, um die zirkulären Strategien erfolgreich zu implementieren und sicherzustellen, dass alle Beteiligten über die notwendigen Fähigkeiten und das Wissen verfügen. [DIN23b]



**Abbildung 3-24: Umsetzungsrelevanter Prozess des zirkulären Produktdesigns nach Normentwurf [DIN23b]**

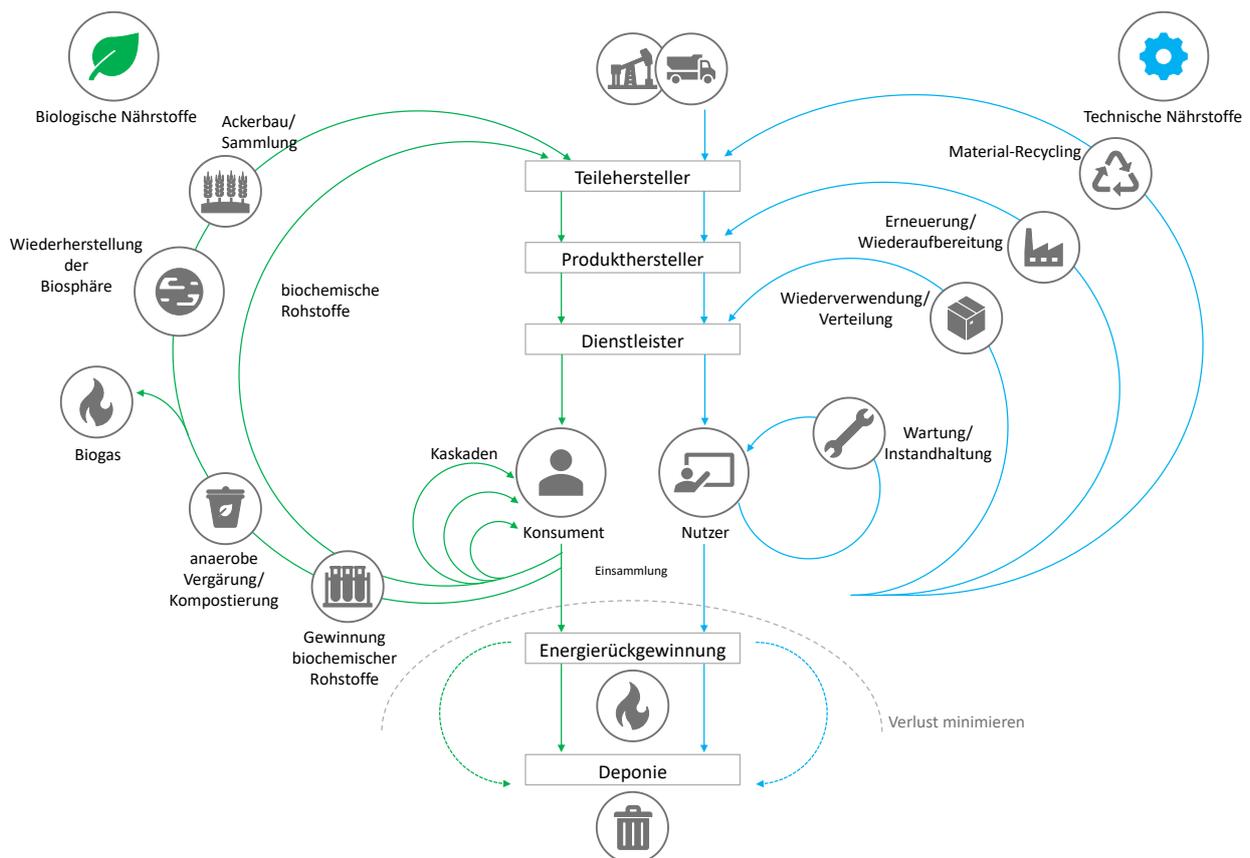
Im vierten und letzten Schritt müssen diese Produktattribute in konkrete zirkuläre Produktdesignanforderungen übersetzt werden. Zur Unterstützung dieses Prozessschritts werden für die möglichen Produktattribute mehrere unterstützenden Designfragen zur Bestimmung entsprechender Anforderungen bereitgestellt. Außerdem wird eine zirkuläre Produktdesignmatrix präsentiert, die die zirkulären Kategorien mit entsprechenden zirkulären Produktattributen verbindet und damit eine Hilfestellung zur Auswahl geeigneter Kreislaufkonzepte bietet. [DIN23b]

### ***Cradle-to-Cradle Design***

Als weitere Synthesemethode wird nun der oft als wegweisend bezeichnete Ansatz des Cradle-to-Cradle (C2C) Prinzip vorgestellt. Es wurde 2002 von McDonough und Braungart im Buch „Cradle to cradle: remaking the way we make things“ [McBr02] vorgestellt und 2007 in „Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design“ [BrMB07] von Braungart et al. in eine entsprechende Produktdesignstrategie überführt (vgl. Kapitel 3.1). Im Gegensatz zu herkömmlichen linearen Wirtschaftsmodellen, die nach dem Prinzip "Cradle-to-Grave" (frei aus dem Englischen übersetzt: von der Wiege bis zur Bahre) arbeiten und Produkte nach Gebrauch als Abfall entsorgen, verfolgt das C2C-Prinzip eine **kreislaufwirtschaftliche Herangehensweise**. Von der „Wiege“ werden Produkte und Systeme von Beginn an so gestaltet, dass sie nach ihrer Nutzungsphase wieder zur „Wiege“ für etwas Neues werden können. Die C2C-Idee orientiert sich dabei an der Natur, in der Abfall nicht existiert und alles in Kreisläufen zirkuliert. Denn in natürlichen Systemen werden alle Materialien wiederverwendet, sei es als Nährstoffe für andere Organismen oder als Bestandteile für neue Strukturen. Die Idee basiert auf der **Nachhaltigkeitsstrategie der Öko-Effektivität und soll Natur und Technik vereinen**, wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben. [BrMB07, McBr02]

Die Umsetzung der Öko-Effektivität erfordert ein grundsätzliches Umdenken in der gesamten Produktentstehung, denn im C2C-Design soll keinerlei Abfall entstehen. Produkte werden so gestaltet, dass ihre Komponenten entweder biologisch abbaubar sind und in den natürlichen Kreislauf zurückgeführt werden können (**biologische Nährstoffe**) oder wiederverwertbar sind und in technischen Kreisläufen bleiben (**technische Nährstoffe**). Biologische Nährstoffe können natürliche oder pflanzenbasierte Materialien sein, umfassen aber auch synthetische Substanzen wie Biopolymere, die für Mensch und Natur sicher sind. Der biologische Metabolismus umfasst Prozesse wie Rohstoffgewinnung, Herstellung, Nutzung durch den Kunden und schließlich die Rückführung dieser Materialien in natürliche Systeme, wo sie erneut zu Ressourcen für menschliche Aktivitäten werden können. Produkte, die als biologische Nährstoffe konzipiert sind, werden als Konsumprodukte bezeichnet. Beispiele hierfür sind Bremsbeläge oder Reifen, die während ihrer Lebensdauer abgebaut oder abgenutzt werden. Diese Produkte können nach ihrer Nutzung sicher in die natürliche Umwelt zurückgeführt werden, um dort als Nährstoffe für lebende Systeme zu dienen. Ein technischer Nährstoff hingegen kann als Material definiert werden, das häufig synthetisch oder mineralisch hergestellt wurde und das Potenzial hat, sicher in einem geschlossenen Kreislaufsystem von Herstellung, Rückgewinnung und Wiederverwendung (dem technischen Metabolismus) zu verbleiben, wobei es seinen höchsten Wert durch viele Produktlebenszyklen hindurch beibehält. Technische Nährstoffe werden als Dienstleistungsprodukte verwendet, die besonders langlebige Güter darstellen. Eine mögliche Umsetzung des technischen Metabolismus sind PSS (vgl. Kapitel 3.3.4), bei denen der Kunde das Produkt nutzt, während das Eigentum und damit die Verantwortung für die materiellen Ressourcen beim Hersteller verbleibt. Auf diese Weise soll die Philosophie von C2C umgesetzt werden, sodass jedes Produkt nach seinem Lebensende eine Ressource für ein neues Produkt werden kann. [BrMB07, McBr02]

Die Ellen MacArthur Foundation [Elle12] hat entsprechend der Beschreibung der beiden Kreisläufe nach [BrMB07, McBr02] ein Diagramm veröffentlicht, das in Abbildung 3-25 in deutscher Sprache nachgebildet wurde. Zentral befindet sich der Produktlebenszyklus, auf der linken Seite der biologische und auf der rechten Seite der technische Kreislauf. Nachdem die Materialien den Produktlebenszyklus durchlaufen haben, werden technische und biologische Nährstoffe getrennt gesammelt und sortiert. Anschließend können sie in verschiedenen Kaskadierungen im Sinne der Kreislaufwirtschaft zurückgeführt werden. Die biologischen Nährstoffe durchlaufen nach ihrer Nutzung Prozesse wie anaerobe Vergärung und Kompostierung, um in Biogas und biochemische Rohstoffe umgewandelt zu werden. Diese Rohstoffe werden alternativ in landwirtschaftliche, forstwirtschaftliche, aquakulturelle und ähnliche Systeme zurückgeführt, wo sie erneut als Ressourcen genutzt werden können. Der technische Kreislauf beginnt mit der Extraktion von begrenzten Rohstoffen, die in den Produktlebenszyklus einfließen. Nach der Nutzungsphase können die technischen Nährstoffe durch verschiedene Werterhaltungsoptionen wieder in einzelne Phasen des Produktlebenszyklus zurückfließen und somit kontinuierlich weiter genutzt werden. Im unteren Teil sind noch die thermische Verwertung und die Deponierung eingezeichnet, die aber beide im Sinne von C2C möglichst komplett vermieden werden sollten. [Elle12]



**Abbildung 3-25: Biologischer und technischer Kreislauf nach [Elle12] (frei übersetzt)**

Neben dieser in erster Linie materialorientierten Grundsätzen des C2C-Designs, werden Schadstofffreiheit und die Nutzung erneuerbarer Energien zur Umsetzung betont. Jedoch zählen die intransparente Kategorisierung der Materialien, die mangelnde Berücksichtigung des

Energieverbrauchs und die komplizierte Umsetzung des C2C-Prinzip in der Praxis zu den Kritikpunkten dieses Ansatzes [ToKM15].

**Circular Business Model Tool**

Wie bereits im Rahmen der Klassifizierungen angesprochen, stellen Geissdoerfer et al. in [GPPS20] auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche das „Circular Business Model Tool“ (CBMT) vor, das in Abbildung 3-26 abgebildet ist. Hierbei sind die **vier Strategien** „Cycling, Extending, Intensifying, Dematerialising“ [GPPS20] als Zeilen und die **drei Kernelemente des Geschäftsmodells** als Spalten aufgetragen, wodurch eine Tabelle mit zwölf Feldern entsteht. Die Strategien und Elemente sind jeweils mit Unterpunkten weiter detailliert, wodurch eine Varianz an Lösungsmöglichkeiten entsteht. Das CBMT kann bereits in frühen Phasen zur Entwicklung eines zirkulären Produktsystems einschließlich eines passenden Geschäftsmodells eingesetzt werden. Beispielsweise in einem Workshop können die Kernelemente des Geschäftsmodell durch die vier Strategien erarbeitet werden, wobei in einem Geschäftsmodell durchaus mehrere Strategien miteinander kombiniert werden können. [GPPS20]

<p style="text-align: center;"><b>CBMT</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Wertangebot</b> Hauptprodukte /-angebote Kundensegmente /-märkte Kundenbedarf /-probleme Wie sind sie zu adressieren?</p>	<p style="text-align: center;"><b>Wertschöpfung &amp; -lieferung</b> Kernelemente der Wertschöpfungskette Schlüsselkompetenzen Ressourcen und Kapazitäten</p>	<p style="text-align: center;"><b>Werterfassung</b> Einnahmequellen Treibende Kosten Einnahmemodell, z.B.: Finanzierung, „razor &amp; blade“, Plattformgebühren, etc.</p>
<p><b>Nutzung</b> Reuse Repair Remanufacture/Refurbish Recycling Design for X/ Modularität Rücknahme Logistik Angebote zur Materialrückgewinnung</p>			
<p><b>Erweiterung</b> Langlebige Produkte Updatefähigkeit Zeitloses Design Marketing / Kundenschulung zu langlebigen Produkten Instandhaltung/ Produktsupport</p>			
<p><b>Intensivierung</b> Sharing-Konzepte Miet- / Leasingmodelle Nutzerkooperativen Offene Elemente /Creative Commons Pooling-Modelle</p>			
<p><b>Dematerialisierung</b> Software statt Hardware Service statt Produkt Kundenaufklärung Rationalisierung der Nachfrage</p>			

**Abbildung 3-26: Circular Business Model Tool nach Geissdoerfer et al. [GPPS20] (frei übersetzt)**

***Morphologischer Kasten der Geschäftsmodelloptionen für die Kreislaufwirtschaft***

Eine ähnliche, jedoch noch detailliertere Hilfestellung zur Entwicklung von Geschäftsmodellen für die Kreislaufwirtschaft, ist von Lüdeke-Freund et al. [LüGB19] auf Basis des oben aufgeführten Literaturreviews im „Morphological box of CEBM (Circular Economy Business Model) design options“ (frei aus dem Englischen übersetzt: Morphologischer Kasten der Geschäftsmodelloptionen für die Kreislaufwirtschaft) zusammengestellt worden. In einem morphologischen Kasten stehen dabei für die einzelnen **Elemente bzw. Dimensionen des Geschäftsmodell** aus Tabelle 3-8 jeweils in der Literatur beschriebene **Lösungsmöglichkeiten** (englisch: design options) zur Verfügung. Wie in Abbildung 3-27 gezeigt, entsteht so eine Synthesemethode mit 56 Lösungsmöglichkeiten, die zu einem passenden Geschäftsmodell kombiniert werden können. [LüGB19]

CEBM-Designoptionen abgeleitet aus der Überprüfung von 26 CEBMs										
Geschäftsmodell-Dimensionen	Produkte					Langlebige Produkte		Gebrauchte Produkte, Komponenten, Materialien oder Produktionsinputs		Wiederverwendbare oder recycelbare Produktionsinputs
	Reparierte, aufbereitete, wiederhergestellte oder recycelte Produkte	Wiederverwendbare oder recycelbare Produkte	Produkte basierend auf recyceltem Abfall	Produkt-/ Dienstleistungs- funktionen	Wartung, Reparatur, Kontrolle	Produkt-/ Dienstleistungs- basierte Ergebnisse	Aufrüsten	Zusatzleistungen		
Wertangebot	Service	Erleichterung der Zusammenarbeit	Rücknahme- management	Kundenaufklärung	Abfallbehandlung, -verarbeitung	Produkt-/ Dienstleistungs- funktionen	Business-to-Business- Kunden	Business-to- Customer- Kunden	Business-to- Business- Lieferanten	Customer-to- Customer- Lieferanten
		Qualitätsbewusste Kunden	Kostenbewusste Kunden	Grüne Kunden	Bereitstellung von (produktbasierten) Dienstleistungen und Ergebnissen	Bereitstellung von Produkten, Komponenten, Materialien oder Abfall	Rücknahme gebrauchter Produkte, Komponenten, Materialien oder Abfall	Teilen von Produkten, Komponenten, Materialien oder Abfall		
Wertlieferung	Prozess der Wertlieferung	Verbindungen von Lieferanten und Kunden	Bereitstellung des Zugangs zu einer Produktfunktionalität	Einzelhändler	Hersteller	Dienstleister	Öffentliche Institutionen	Sammler von Produkten, Komponenten, Materialien oder Abfall	Andere (z.B. Forscher)	
		Lieferanten	Wiederaufbereitung oder Aufbereitung von Produkten, Komponenten	Recycling von Produkten, Komponenten, Materialien, Abfall	Aufrüsten oder Aufwerten von Produkten, Komponenten, Materialien, Abfall	Weiterverkauf von Produkten, Komponenten, Materialien, Abfall	Rücknahme von Produkten, Komponenten, Materialien, Abfall	Zurück- gewinnen von Basis- materialien	Nutzung gebrauchter Produkte, Komponenten, Materialien oder Abfall	Abgleich von Über- und Unter- kapazitäten
Wertgenerierung	Partner und Stakeholder	Wartung oder Reparatur von Produkten, Komponenten	Zusätzliche Einnahmen aus wiederverwendeten Produkten	Zahlungen pro Serviceeinheit		Zahlungen für Funktionen oder Ergebnisse		Preisprämien		
		Arbeitskosten	Reparatur, Wartung, Kontrolle	Abfallbehandlung, -verarbeitung	Herstellung	Ressourceninputs	Transport, Logistik	Lieferrisiken		

Abbildung 3-27: Morphologischer Kasten der Geschäftsmodelloptionen für die Kreislaufwirtschaft von [LüGB19] (frei übersetzt)

### **Weiterführende Literatur und Normen**

Neben den genannten Ansätzen gibt es eine Vielzahl an weiterführender Literatur zur Gestaltung kreislauffähiger Produkte und entsprechender Geschäftsmodelle, die aufgrund des Umfangs nicht Bestandteil dieser Arbeit sind. Es folgt daher nur eine Übersicht:

- DIN EN 45560 - Methode zur Gestaltung von zirkulären Produkten (Entwurf) [DIN23b]
- VDI 2243 - Recyclingorientierte Produktentwicklung [VDI02]
- ISO 14009 - Leitlinien zur Einbeziehung der Kreislaufführung von Materialien bei Design und Entwicklung [ISO20]
- VDI 2343 - Recycling elektrischer und elektronischer Geräte [VDI01]
- DIN/TS 35205 - Leitfaden zur Wiederverwendung und Vorbereitung zur Wiederverwendung - Empfehlungen für Aufbau, Durchführung und Optimierung entsprechender Geschäftsmodelle (Vornorm) [DIN23a]
- VDI 2882 - Obsoleszenzmanagement aus Sicht von Nutzern und Betreibern [VDI18]
- VDI 4010 - Zuverlässigkeitsverbesserung in der Produktnutzungsphase [VDI17b]
- ISO 59010 - Circular Economy - Leitfaden zur Umstellung von Geschäftsmodellen und Wertschöpfungsnetzwerken [ISO24d]
- Unterstützung der Entwicklung recyclinggerechter Produkte [Herr03]
- Products that last: product design for circular business models [BHHZ15]
- Products that flow: circular business models and design strategies for fast-moving consumer goods [HGZ18]
- Cradle to Cradle [BrMB07, McBr02]
- Design Thinking Tools to Catalyse Sustainable Circular Innovation [BBKD23]
- Zirkuläre Geschäftsmodelle: Barrieren überwinden, Potenziale freisetzen [HWFL21]

#### **3.3.6 Ganzheitliche Synthesemethoden**

In diesem Kapitel werden Synthesemethoden vorgestellt, die ganzheitlich die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit sowie Aspekte der Kreislauffähigkeit in den PEP integrieren. Wie in Kapitel 3.1 aufgezeigt, haben solche umfassenden Ansätze vor allem seit der Jahrtausendwende in der Forschung Einzug gehalten und gewinnen in der *Nachhaltigen Produktentstehung* zunehmend an Bedeutung. Diese Entwicklung wird ebenfalls in mehreren Literaturreviews beschrieben [AWTW18, CeGa16, ChCh12, GaLS12]. Die ganzheitlichen Synthesemethoden werden darin unterschiedlich bezeichnet. Die häufigsten Bezeichnungen im Englischen sind darunter Design for Sustainability, Sustainable Product Design, Sustainable Product Development, Sustainable Engineering Design, Life Cycle Design und Life Cycle Engineering. Aufgrund der Komplexität der Ansätze und deren Vielzahl, können hier nur stellvertretend Design for Sustainability, Whole System Design und Life Cycle Engineering vorgestellt werden.

### Design for Sustainability: A Step-by-Step Approach

Im Jahr 2009 wurde im Rahmen des UNEP ein ausführliches Handbuch mit dem Titel „Design for Sustainability (D4S): A Step-by-Step Approach“ [CrDR09] veröffentlicht. Dieses Handbuch dient als umfassende Anleitung für Produktentwickler und Fachleute aus der Industrie, um das Thema Nachhaltigkeit ganzheitlich in ihre Entwicklungsprozesse zu integrieren. Zusätzlich zu dem Handbuch wurden erweiternde Module mit Design-, Management- und Innovationstools sowie praktische Arbeitsblätter und Fallstudien zur Verfügung gestellt [TuUn23]. Der Ansatz ist sowohl für die **Neugestaltung bestehender Produkte** (Redesign), die **Entstehung neuer Produkte** und für die **Entwicklung von PSS** konzipiert und beschreibt für die drei Ansätze jeweils ein schrittweises Vorgehen. Wie in Abbildung 3-28 dargestellt, sind die **vier grundlegenden Schritte** „Politikformulierung (policy formulation), Ideenfindung (idea finding), Entwicklung (strict development) und Realisierung (realisation)“ [CrDR09]. Diese Schritte werden je nach Entwicklungsfokus unterschiedlich unterteilt, um spezifische Ziele und Anforderungen zu erfüllen, wie nachfolgend beschrieben.

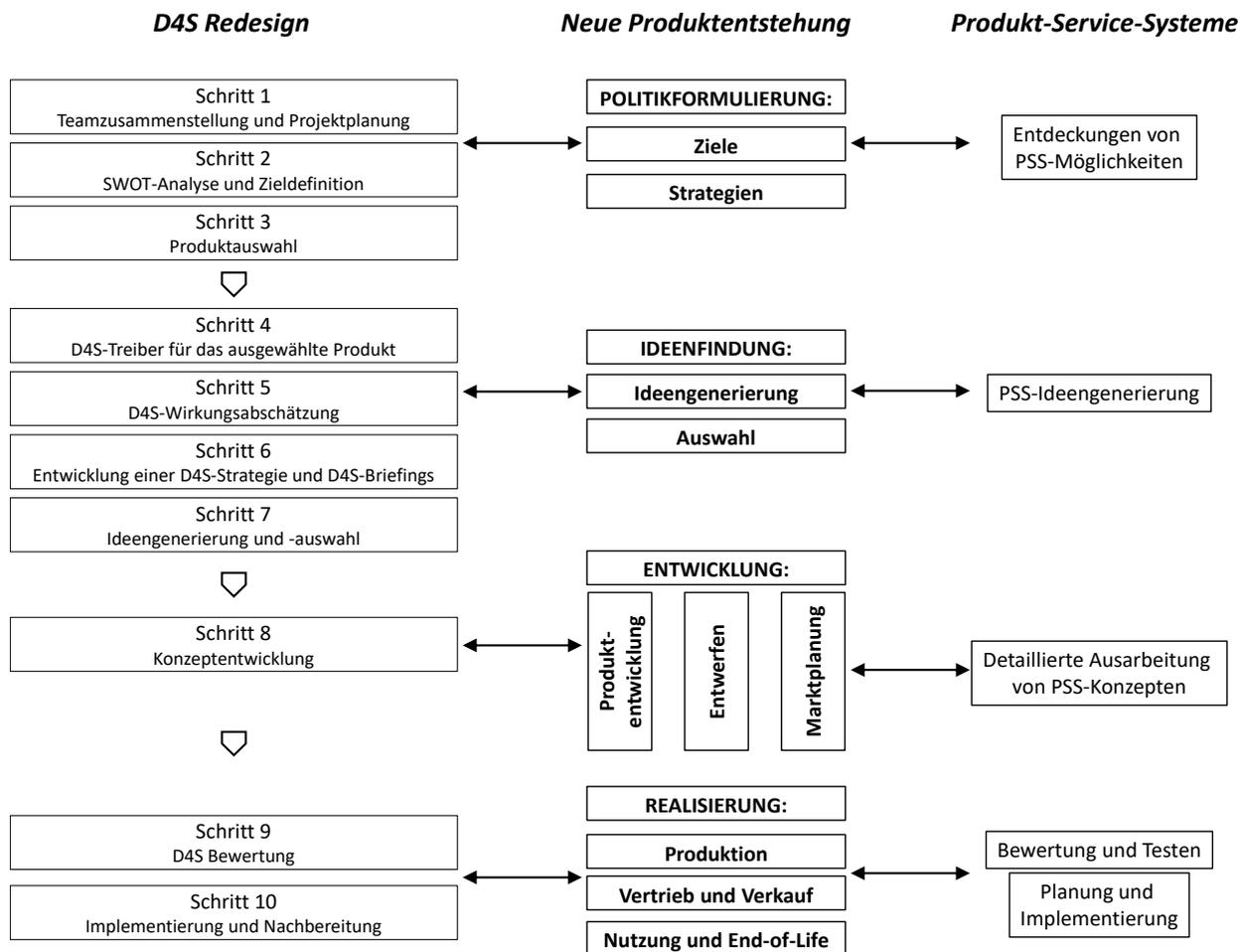


Abbildung 3-28: Design for Sustainability - Schrittweises Vorgehen bei Redesign, Neuentwicklung und PSS nach [CrDR09] (frei übersetzt)

Das **D4S-Redesign** zielt darauf ab, ein bestehendes Produkt eines Unternehmens unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit neu zu gestalten. Dieser inkrementelle Ansatz der

Produktinnovation birgt in der Regel geringere Risiken und Investitionen im Vergleich zu radikaleren Innovationsformen und folgt einem vorhersehbaren, schrittweisen Prozess. Zunächst wird im ersten Schritt ein interdisziplinäres Team zusammengestellt und ein detaillierter Projektplan erarbeitet. Im nächsten Schritt werden die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (englisch: Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats – SWOT) [SiGa02] des Unternehmens analysiert, um die Treiber und Ziele für das Redesign zu definieren. Anschließend wird ein bestehendes Produkt für das Redesign ausgewählt, basierend auf den Ergebnissen der SWOT-Analyse. Im vierten Schritt werden die spezifischen Nachhaltigkeitstreiber für das gewählte Produkt identifiziert. Danach werden die Umweltauswirkungen des aktuellen Produkts bewertet, um Verbesserungspotenziale zu identifizieren. Im sechsten Schritt werden eine klare Strategie und ein D4S-Briefing entwickelt, welche die Ziele und Anforderungen des Redesigns festlegen. Es folgt die kreative Phase, in der Ideen für das Redesign gesammelt und die vielversprechendsten Ansätze ausgewählt werden. Diese Ideen werden zu detaillierten Konzepten weiterentwickelt. Die entwickelten Konzepte werden dann anhand der D4S-Kriterien evaluiert, um das Nachhaltigste auszuwählen. Schließlich wird das ausgewählte Konzept umgesetzt und der Erfolg des Redesigns kontinuierlich überwacht und bewertet. [CrDR09]

Die inkrementellen Innovationsansätze des Redesigns sind jedoch in der Regel nicht ausreichend, um eine langfristige nachhaltige Entwicklung im Sinne der SDGs zu erreichen. Außerhalb der gewohnten Denkmuster liegende oder radikale Innovationsstrategien können hingegen zu nachhaltigeren Lösungen führen, bergen jedoch auch ein höheres Risiko. Angesichts der größeren Unsicherheit im PEP bei radikalen **Neuentwicklungen**, können keine standardisierten Regeln angewendet werden. Insbesondere die Phase der Ideenfindung muss hierbei lösungsoffen gestaltet werden. Eine Produktinnovation entsteht durch einen Entwicklungsprozess mit anschließender Realisierung des Produkts und erfolgreicher Marktpositionierung. Der Entwicklungsprozess umfasst dabei die drei Phasen Politikformulierung, Ideenfindung und Entwicklung, die iterativ durchlaufen werden. Jede Phase enthält dabei eine divergente Aktivität, die relevante Informationen auf kreative Weise identifiziert, und eine konvergente Aktivität, die diese Informationen bewertet. Die divergente Aktivität analysiert und definiert Probleme neu, generiert Ideen und kombiniert Konzepte. Die konvergente Aktivität legt Beurteilungen fest und umfasst Methoden, um Informationen zu verstehen, Elemente zu priorisieren, Lösungen zu vergleichen, Ideen zu bewerten und entsprechend Konzepte auszuwählen. Wie in Abbildung 3-28 dargestellt, laufen in der eigentlichen Entwicklungsphase auch Aktivitäten parallel ab. Gemeinsam mit der Entwicklung des Produkts sollten auch die Produktionsentwicklung und die Marketingplanung stattfinden. Um vor allem die offenere Phase der Ideenfindung methodisch zu unterstützen, werden verschiedene Kreativitätstechniken und die Szenariotechnik vorgestellt. Weiterhin werden neue Produkttechnologien wie Öko-Materialien, Nanotechnologie, erneuerbare Energiequellen und Informations- und Kommunikationstechnologien als weitere Inspirationsquellen für die radikale Neuentwicklung von Produkten genannt. [CrDR09]

Als dritter Ansatz im D4S wird die **Entwicklung von PSS** (siehe auch Kapitel 3.3.4) vorgeschlagen. Hierbei soll ein System von Produkten und Dienstleistungen, inklusive der dazugehörigen Infrastruktur, entworfen werden, das die Bedürfnisse bzw. Anforderungen der Kunden effizienter erfüllt und einen höheren Wert für Unternehmen und Kunden bietet als rein produktbasierte Lösungen. Da die Umsetzungsmöglichkeiten von PSS vielfältig sind, werden zunächst die Grundlagen und Vorteile des Übergangs zu PSS erläutert und die verschiedenen Arten von PSS klassifiziert (siehe Abbildung 3-23). Anschließend werden folgende fünf Schritte zur PSS-Entwicklung aufgeführt, die exemplarisch in einem PSS-Pilotprojekt umgesetzt werden sollten. In Abbildung 3-28 ist zu erkennen, dass diese in Wechselwirkung mit den vorher erläuterten PEP stehen. Im ersten Schritt werden Marktbedingungen, Kundenbedürfnisse und bestehende Angebote analysiert, um Potenziale für innovative PSS-Lösungen zu identifizieren. Dies umfasst eine gründliche Marktforschung sowie die Analyse interner und externer Faktoren. Anschließend werden durch kreative Methoden wie Brainstorming und Workshops vielfältige Ideen entwickelt und anschließend nach Kriterien wie Machbarkeit und Marktpotenzial bewertet. Nach der Auswahl der vielversprechendsten Ideen, werden diese konkret ausgearbeitet, wobei technische und marktbezogene Aspekte berücksichtigt werden. In der Realisationsphase werden die umgesetzten Konzepte zunächst getestet, wobei insbesondere Pilotprojekte dazu dienen, die Machbarkeit, den Nutzen und Wirtschaftlichkeit zu überprüfen. Nach erfolgreicher Testphase wird ein entsprechender Implementierungsplan entwickelt, der alle notwendigen Schritte und Ressourcen für die Markteinführung des PSS beschreibt. [CrDR09]

Durch die drei komplementären Prozesse sowie die weiterführenden Materialien und Werkzeuge ist eine umfangreiche Anleitung zum Design for Sustainability in [CrDR09, TuUn23] gegeben. Diese Ansätze bieten innerhalb der Nachhaltigkeitsdimensionen wirtschaftliche Vorteile durch neue Märkte und Einnahmequellen, ökologische Vorteile durch reduzierte Material- und Energieverbräuche sowie soziale Vorteile durch verbesserte Lebensqualität und die Einhaltung von sozialen Standards.

### **Whole System Design**

Eine weitere ganzheitliche Herangehensweise ist das „Whole System Design: an integrated approach to sustainable engineering“ [SSHD09] (WSD), das von Stasinopoulos et al. 2009 publiziert wurde. WSD stellt einen integrativen Designansatz dar, der darauf abzielt, komplexe Systeme ganzheitlich zu betrachten und Lösungen zu entwickeln, die sowohl ökologisch als auch ökonomisch und sozial verträglich sind. Es unterscheidet sich von traditionellen Designmethoden, indem es nicht nur isolierte Komponenten oder Prozesse optimiert, sondern das gesamte System in den Fokus nimmt. Dies erfordert eine umfassende Analyse und das Verständnis der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Systemkomponenten sowie der Auswirkungen von Designentscheidungen auf das Gesamtsystem. Hierfür wird der Ansatz des Systems Engineering nach Blanchard und Fabrycky [BIFa06] durch einen ganzheitlichen Systemansatz erweitert, mit dem Ziel, einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung zu leisten. Der **Basisprozess** besteht nach

[BIFa06] dabei aus den **vier Phasen** Bedürfnisdefinition (1. Need Definition), Konzeptioneller Entwurf (2. Conceptual Design), Vorläufiger Entwurf (3. Preliminary Design) und Detail-Entwurf (4. Detail Design).

Dieser Systems Engineering Prozess wird im WSD um folgende **zehn Elemente** erweitert. Im ersten Element (**Element 1: Ask the right questions**) soll der Entwicklungsauftrag hinterfragt werden, um zu identifizieren, was die eigentlich gewünschte Funktion ist, wie die Leistung optimal erbracht werden kann und ob es noch andere mögliche Ansätze dazu gibt. Hierbei wird auch empfohlen eine servicebasierte Perspektive (vergleiche PSS in Kapitel 3.3.4) einzunehmen, um mögliche Einschränkungen durch einen zu starken Fokus auf das Produkt zu vermeiden. Das nächste Element (**Element 2: Benchmark against the optimal system**) zielt darauf ab, ein Benchmarking gegen das theoretisch und praktisch optimale System durchzuführen, welches die identifizierten Bedürfnisse deckt. Es wird betont, dass dabei nicht der aktuelle Stand der Technik als Referenz dienen sollte, da dieser meist auf älteren und weniger nachhaltigen Lösungsprinzipien basiert. Das Benchmarking mit einem optimalen System bietet hingegen ein größeres Verbesserungspotential. Die Erstellung eines funktionalen Systemmodells kann hierbei unterstützend wirken. Im dritten Element (**Element 3: Design and optimize the whole system**) ist Kreativität und ein tiefgehendes technisches Verständnis gefordert. In diesem Schritt wird ein System von Grund auf neu entwickelt (englisch: Cleansheet-Design), basierend auf Anforderungen und ohne Beschränkungen oder vorgegebene Lösungsprinzipien. Dadurch wird eine flexible und kreative Umgebung geschaffen, um neuartige Lösungen zu finden und Kompromisse zu minimieren. Das System wird als Ganzes entworfen, insbesondere in den Konzept- und Vorentwurfsphasen, wobei Synergien zwischen den Teilsystemen identifiziert und optimiert werden. Multidisziplinäre Teams spielen eine Schlüsselrolle bei der Integration und Optimierung der Teilsysteme. Dabei werden viele Entscheidungen getroffen, die multiple Auswirkungen auf das Gesamtsystem und die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit haben können. Diese sollen im vierten Element des WSD (**Element 4: Account for all measurable impacts**) ganzheitlich berücksichtigt werden, um somit die möglichst optimalen Auswirkungen auf Gesamtebene realisieren zu können. Insbesondere bei der Optimierung eines Teilsystems müssen stets die potenziellen Auswirkungen auf Gesamtebene überprüft werden. Dabei kann es zu positiven Synergieeffekten kommen, es können jedoch durch Optimierungen eines Teilsystems auch versteckte negative Auswirkungen in anderen Teilsystemen oder Phasen des Produktlebenszyklus entstehen, die nicht direkt offensichtlich werden. Das darauffolgende Element (**Element 5: Design and optimize subsystems in the right sequence**) knüpft an diese Gegebenheit an und empfiehlt die Optimierung der Teilsysteme in der richtigen Reihenfolge. Die Entwicklungsschritte mit den größten Auswirkungen auf das Gesamtsystem sollten dabei zuerst durchgeführt werden. Ein weiteres Element dient dazu, bei der Optimierung der Teilsysteme Ressourceneinsparungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu erreichen (**Element 6: Design and optimize subsystems to achieve compounding resource savings**). Durch den Fokus auf die Endnutzung und die Steigerung der Effizienz in der Nutzungsphase können erhebliche Einsparungen von primären Ressourcen erreicht werden. Im siebten

Element (**Element 7**: Review the system for potential improvements), in der Phase des detaillierten Designs, wird empfohlen eine ganzheitliche Analyse des Systems durchzuführen und dieses in seiner Gesamtheit zu überprüfen, um potenzielle Verbesserungen der Umwelt-, Sozial- und Sicherheitsleistungen sowie der Kosteneffizienz des Systems zu ermitteln und umzusetzen. Über alle vier Phasen des Entwicklungsprozesses hinweg sollte das zu entwickelnde System modelliert werden (**Element 8**: Model the system). Dabei kann computergestützte Modellierung helfen, komplexe technische Systeme zu verstehen und zu optimieren. Weiterhin sollen technologische Neuerrungen und Innovationen im WSD genaustens beobachtet und nach Möglichkeit in das System integriert werden, wenn damit ein nachhaltigeres System umgesetzt werden kann. (**Element 9**: Track technology innovation). Das zehnte und letzte Element des WSD (**Element 10**: Design to create future options) zielt drauf ab, Systeme so zu gestalten, dass zukünftige technologische Entwicklungen optional integriert werden können. Neben den heute vorherrschenden Technologien und Randbedingungen sollte auch der mögliche zukünftige Kontext betrachtet werden und mit in die Entwicklung einfließen. Zur Veranschaulichung einer praktischen Umsetzung demonstrieren Stasinopoulos et al. in ihrem Buch den Ansatz des WSD anhand von fünf Praxisbeispielen. [SSHD09]

### **ISED - Integrated Sustainable Engineering Design Process**

Gagnon et al. haben aufbauend auf einem generischen konventionellen PEP und dem damaligen Stand der Forschung im Bereich der *Nachhaltigen Produktentstehung* einen integrierten nachhaltigen Entwicklungsprozess unter dem Namen „Integrated Sustainable Engineering Design Process (ISED)“ [Gagn13, GaLS12] erarbeitet.

Die Erweiterungen sind aus drei Schlüsselthemen aus dem Bereich der Nachhaltigkeitswissenschaft abgeleitet. Zum ersten soll das ISED Produktentwickler dabei unterstützen, die zahlreichen potenziellen **Interaktionen** zwischen einem Ingenieurprojekt, der Umwelt, einzelnen Individuen sowie der Wirtschaft und anderen sozialen Systemen zu identifizieren. Hierzu wurde ein Nachhaltigkeitsrahmenwerk für die Ingenieurwissenschaften separat entwickelt [GaLS09], indem die einzelnen Komponenten in Beziehung zueinander gesetzt werden. Zweitens müssen nachhaltige **Lösungen robust und flexibel** sein, um unter einer Vielzahl von zukünftigen Szenarien umsetzbar zu bleiben, da die Auswirkungen von Umwelt- und sozialen Veränderungen nur begrenzt vorhersagbar sind. Drittens erfordern nachhaltige Lösungen häufig **radikal andere Ansätze** als konventionelle Lösungen, um die notwendigen Effizienzsteigerungen und Umweltentlastungen zu erreichen. [Gagn13, GaLS12]

Ähnlich zum WSD ist der Prozess hierbei in **vier Entwicklungsstufen** gegliedert, die von einer Projektinitiierung ausgehen (siehe Abbildung 3-29 oben). Diese Stufen sind Planung und Problemdefinition (I. Planning and problem definition), Konzeptanalyse (II. Conceptual analysis), Vorläufiges Design (III. Preliminary design) und Detailliertes Design (IV. Detailed design). Abbildung 3-29 zeigt, inwiefern diese vier Entwicklungsstufen mit den **fünf Lebenszyklusphasen** des Produkts (A-E) interagieren. Dadurch soll die Bedeutung des Lebenszyklusdenkens während des

Entwicklungsprozesses betont werden. Der Entwicklungsprozess und der Produktlebenszyklus werden dabei als zwei separate Systeme dargestellt, die in wechselseitiger Beziehung stehen. Im Lebenszyklus werden Energie, Verpackung und Transport über alle Phasen hinweg betrachtet. Die Phasen reichen von der Entnahme der Rohmaterialien über die Komponentenherstellung zur Produktion und Nutzung bzw. Wartung des Produkts. Ausgehend vom anschließenden EoL werden auch Recyclingprozesse von Komponenten und Materialien berücksichtigt. [Gagn13, GaLS12]

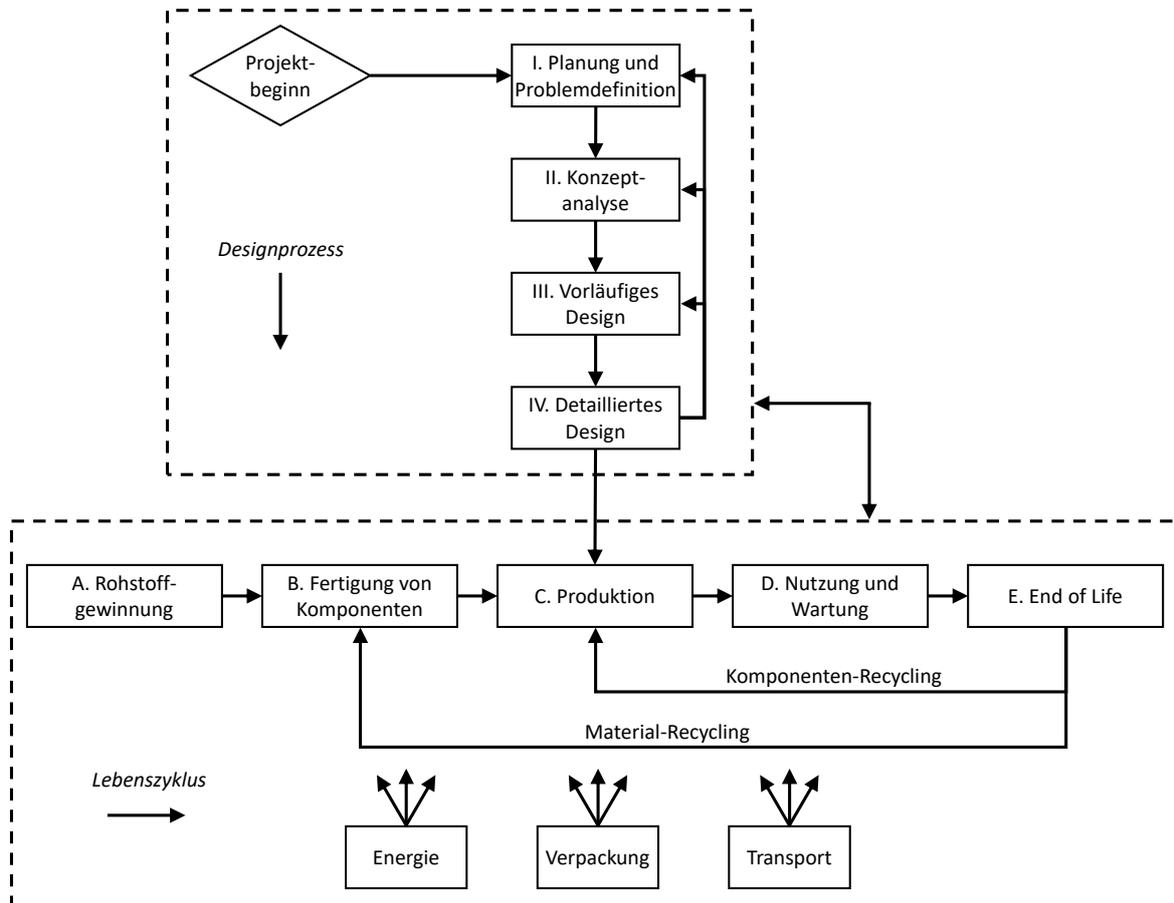


Abbildung 3-29: Entwicklungsstufen und Lebenszyklusphasen des ISEDP nach [GaLS12] (frei übersetzt)

Den vier Stufen des ISEDP werden insgesamt **22 spezifische Aufgaben** zugeteilt, wie in der nachstehenden Tabelle 3-9 ersichtlich wird. Die Aufgaben sind teilweise aus bestehenden Ansätzen der *Nachhaltigen Produktentstehung* übernommen und teilweise neu eingeführt, um den Herausforderungen der Integration der Nachhaltigkeit in den PEP gerecht zu werden. Die Aufgaben selbst sind Tabelle 3-9 zu entnehmen und werden an dieser Stelle nicht genauer beschrieben, wobei die **kritischen Aufgaben** nach Gagnon et al. hervorgehoben sind.

Tabelle 3-9: ISEDP - Integrated Sustainable Engineering Design Process [GaLS12] (frei übersetzt)

Entwicklungsstufen	Aufgaben
I. Planung und Problemdefinition	<b>1.) Multidisziplinäres Designteam bilden</b> <b>2.) Nachhaltigkeitsprinzipien definieren</b> 3.) Nachhaltigkeitskonzept entwickeln <b>4.) Nachhaltigkeitsprobleme im Zusammenhang mit dem definierten Problem identifizieren</b> 5.) Beziehungen zwischen Projekt und Elementen im Konzeptrahmen identifizieren 6.) Stakeholder analysieren und deren Beteiligung planen
II. Konzeptanalyse	<b>7.) Nachhaltigkeitskriterien im Einklang mit den zuvor identifizierten Nachhaltigkeitsproblemen und technischen Funktionen definieren</b> 8.) Vollständigkeit der Nachhaltigkeitskriterien mit dem Konzeptrahmen bestätigen 9.) Zukunftsvision entwickeln, in der die Funktionen unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeitsprinzipien erfüllt werden <b>10.) Mindestens ein alternatives Konzept, das radikal von konventionellen Konzepten abweicht, mit Hilfe von heterodoxen Denk-Werkzeugen generieren</b> 11.) Breite Szenarien definieren, in denen sich die alternativen Konzepte entwickeln könnten <b>12.) Nachhaltigkeitsindikatoren, die sich aus den Problemen oder Kriterien ableiten, parallel zu den technischen Spezifikationen definieren</b> <b>13.) Analysetools identifizieren, mit denen Daten für jeden der Indikatoren generiert werden</b> <b>14.) Ansatz zur Multi-Kriterien-Entscheidung definieren</b>
III. Vorläufiges Design	<b>15.) Leistung alternativer Konzepte nach den Nachhaltigkeitskriterien oder Indikatoren bewerten, einschließlich einer 'Benchmark-Alternative' als Vertreter der aktuellen Praxis</b> <b>16.) Ausgewählten Multi-Kriterien-Entscheidungsansatz validieren und verwenden, um ein bevorzugtes Konzept zu empfehlen</b> 17.) Leistung der alternativen Konzepte unter den identifizierten Szenarien validieren
IV. Detailliertes Design	<b>18.) Bewertung des bevorzugten Konzepts präzisieren</b> 19.) Leistung nach den Nachhaltigkeitskriterien oder Indikatoren des bevorzugten Konzepts optimieren 20.) Robustheit und Flexibilität des bevorzugten Konzepts unter den identifizierten Szenarien maximieren 21.) Empfehlungen für die Herstellungs-, Produktions-, Nutzungs- und End-of-Life-Phasen kommunizieren <b>22.) Set an Nachhaltigkeitsindikatoren zur Überwachung generieren</b>

Darüber hinaus wird von Gagnon et al. eine **Sammlung an Werkzeugen und Methoden** bereitgestellt, die in Heterodoxes Denken, Analyse und Synthese untergliedert ist. Zur einfacheren Implementierung der umfangreichen Aufgaben des ISEDP wird ergänzend ein vierstufiges Konzept vorgestellt, mit dessen Hilfe der nachhaltige Entwicklungsprozess geringfügig, teilweise, überwiegend bzw. vollständig in Projekten umgesetzt werden kann. [GaLS12]

Die Arbeiten von Gagnon et al. zeigen systematisch die Unterschiede zwischen konventioneller und nachhaltiger Produktentstehung auf und führen daraufhin ergänzende Perspektiven und Aufgaben für einen integrierten nachhaltigen PEP in Form des ISEDP ein.

### **Life Cycle Engineering**

Parallel zu den genannten Ansätzen haben sich auch die Begriffe des Life Cycle Engineering (LCE) oder des Life Cycle Design bereits seit den 1990er Jahren etabliert (siehe Kapitel 3.1). Jeswiet definiert LCE als „Ingenieurtätigkeiten, die die Anwendung technologischer und wissenschaftlicher Grundsätze bei der Herstellung von Produkten mit dem Ziel umfassen, die Umwelt zu schützen, Ressourcen zu schonen, den wirtschaftlichen Fortschritt zu fördern, soziale Belange und die Notwendigkeit der Nachhaltigkeit zu berücksichtigen und gleichzeitig den Lebenszyklus des Produkts zu optimieren sowie Umweltverschmutzung und Abfall zu minimieren“ (frei übersetzt aus dem Englischen aus [Jesw03]). Basierend auf der Definition und dem Stand der Forschung identifizieren Peças et al. folgende **drei zu erfüllende Bedingungen**, um einen Ansatz im Bereich des LCE klassifizieren zu können [PGHR16]: eine explizite Betrachtung des gesamten Lebenszyklus, wobei mehr als eine Lebenszyklusphase einbezogen wird, ein Fokus auf ingenieurtechnische Aktivitäten und Entscheidungen, insbesondere in den frühen Lebenszyklusphasen sowie die gleichzeitige Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Ziele innerhalb der Aktivitäten. Die untersuchten Ansätze, die diese Bedingungen erfüllen, können der vorgeschlagenen Taxonomie folgend in die **drei Arten** Richtlinien und Rahmenwerke, Werkzeuge und Methoden sowie empirische Studien eingeteilt werden [PGHR16]. Oftmals wird LCE auch als **Teil des ganzheitlichen Life Cycle Management** betrachtet [HBTH07, Herr10]. Hauschild et al. [HaHK17, HaKR20] haben ein umfassendes Rahmenwerk für das LCE entworfen und dieses außerdem in das Konzept der absoluten Nachhaltigkeit (Kapitel 2.3.2) integriert. Darauf basierend haben Kara et al. [KaHH23] einen entsprechenden Ansatz zur Operationalisierung des LCE abgeleitet, bei dem verschiedene Maßnahmen zur Minderung von Umweltauswirkungen in Bezug auf das Produkt, die zugehörigen Prozesse im Vordergrundsystem und die Prozesse im Hintergrundsystem aufgeschlüsselt werden.

Da unter LCE auch die lebenszyklusbasierten Analysemethoden (vergleiche Kapitel 3.2) gezählt werden können und es gleichzeitig eine große Vielfalt an Ansätzen gibt [PGHR16], die eine starke Überschneidung zu dem bereits vorgestellten Forschungsstand aufweisen, wird an dieser Stelle auf eine weitere Vorstellung des weitgefassten Themenbereichs LCE verzichtet.

### **Weiterführende Literatur**

Wie eingangs erwähnt, bestehen auch in dem Bereich der ganzheitlichen Synthesemethoden nach aktuellem Stand der Forschung viele weitere Ansätze, die von den beschriebenen jedoch grundsätzlich mit abgedeckt werden und daher an dieser Stelle nur als weiterführende Literatur aufgezählt werden.

- A Framework for Sustainable Product Development [KSHW17]
- Systematic Lifecycle Design for Sustainable Product Development [LZXG11]
- Sustainable Product Development: Tools, Methods and Examples [Su20]
- Design for Sustainability: Current Trends in Sustainable Product Design and Development [CKHC09]

- 
- Design for Sustainability - A practical Approach for developing economics [UnCD07]
  - Design for Sustainability - A Practical Approach [BhLo08]
  - Sustainable Solutions: Developing Products and Services for the Future [ChTi01]
  - Nachhaltige Produktentwicklung [ScAp14]
  - Praxishandbuch Nachhaltige Produktentwicklung [SPBH18]
  - An Integrated Framework for Life Cycle Engineering [HaHK17]

### 3.4 Positive Nachhaltigkeitswirkungen

Neben der Darstellung bestehender Analysemethoden, die primär auf die Untersuchung negativer Auswirkungen abzielen [DiSB22], und der Synthesemethoden, die darauf abzielen, diese negativen Auswirkungen zu minimieren, erfordert die Zielsetzung dieser Arbeit eine Erweiterung des Forschungsstands um ein weiteres Kapitel. Dieses Kapitel untersucht die theoretischen Grundlagen und praktischen Maßnahmen zur Kompensation von negativen Auswirkungen von Produkten und Systemen sowie die Entstehung positiver Auswirkungen durch diese. Nach einer Einführung in die Grundlagen und einer Klassifizierung dieser Auswirkungen, wird separat auf die drei Dimensionen, die Kreislaufwirtschaft und auf ganzheitliche Ansätze eingegangen. Abschließend erfolgt eine kritische Einordnung von Kompensationen, da diese im später vorgestellten Modell eine wichtige Rolle einnehmen.

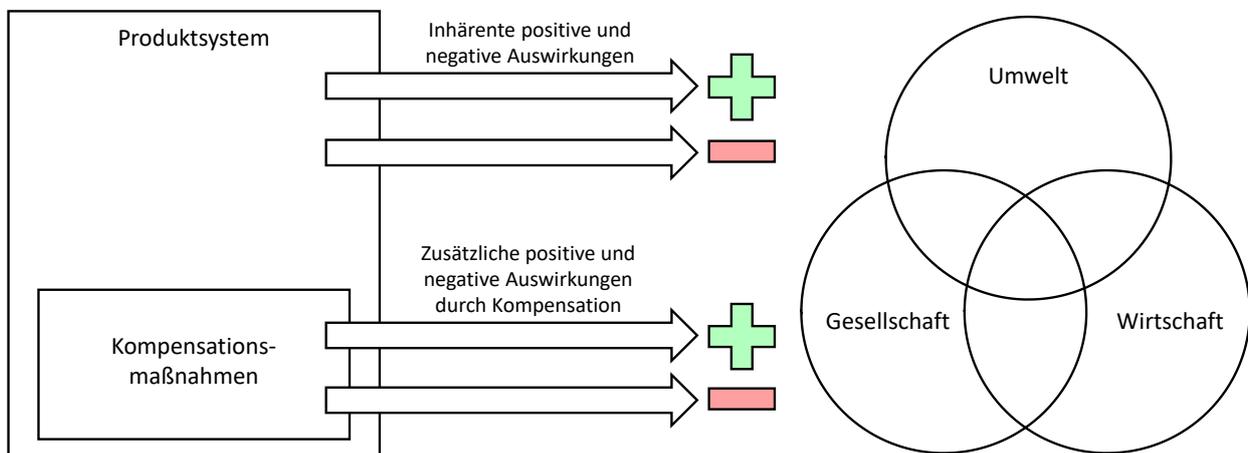
#### 3.4.1 Einführung und Klassifizierung

Die historische Betrachtung der Entwicklung der *Nachhaltigen Produktentstehung* in Kapitel 3.1 zeigt einen Fokus auf die Analyse und Reduktion von negativen Auswirkungen. Auch wenn dieser Fokus ein wichtiger Bestandteil in der Nachhaltigkeitsdiskussion bleibt, ist eine bloße Reduktion der negativen Auswirkungen nur ein Beitrag dazu „weniger schlecht“ zu sein und daher nicht ausreichend, um eine nachhaltige Entwicklung zu erreichen [BrMB07, DiSB22, Haus15]. Im Grundlagenkapitel 2.3.1 ist die Öko-Effektivität bzw. Konsistenz als eine Nachhaltigkeitsstrategie beschrieben, die diese Beschränkung überwinden soll und folglich Lösungen schafft, die einen positiven Beitrag zur Nachhaltigkeit leisten (siehe Abbildung 2-9). Wie solche positiven Beiträge zur nachhaltigen Entwicklung erbracht und gemessen werden können, ist Bestandteil der aktuellen Diskussion im Forschungsgebiet der *Nachhaltigen Produktentstehung* [DiSB22, DSSP18, EkHG18, GJTC22, KÜSH22, MNMV22, MöVi23].

Die Untersuchung von Gebler et al. [GJTC22] analysiert die bestehenden Konzepte zu negativen, neutralen und positiven Auswirkungen sozio-technischer Systeme und fasst den aktuellen Wissensstand zu sogenannten „positive impact“-Konzepten im Rahmen der absoluten Nachhaltigkeit zusammen. Darüber hinaus identifizieren die Autoren relevante Gestaltungsprinzipien mit Bezug zur Biosphäre, zur Gesellschaft und zur Wirtschaft, welche gemeinsam mit Managementfunktionen in einem Rahmenwerk integriert werden. Außerdem liefern sie die folgende **Definition für einen „positive impact“** (frei aus dem Englischen übersetzt): „Eine positive Auswirkung verringert den Druck auf die planetaren Grenzen, erhöht das menschliche Wohlergehen und/oder schafft nachhaltige Werte. In soziotechnischen Systemen ergeben sich positive Auswirkungen aus der Kombination von nachhaltigkeitsbezogenen Systemgestaltungsprinzipien mit einem integrierten Systemmanagement und unterstützen eine nachhaltige Entwicklung für absolute Nachhaltigkeit in einem größeren Systemrahmen. Dies erfordert eine strukturelle Ausrichtung in Ressourcen-, Stakeholder- und zirkulären Wertschöpfungsnetzwerken und eine kontinuierliche Entwicklung durch Innovation, Lernen und Anpassung.“ [GJTC22]

Das Review von Dijkstra-Silva et al. [DiSB22] untersucht verschiedene Forschungsansätze und identifiziert drei verschiedene Perspektiven auf die **Operationalisierung**, die **Transformation** und auf die **Stakeholder**. Die Autoren schlussfolgern, dass ein positiver Nachhaltigkeitsbeitrag eine Nachhaltigkeitstransformation herbeiführen soll, den ökologischen, sozialen und ökonomischen Kontext durch die Beteiligung von Stakeholdern berücksichtigt und operationalisiert wird, um die Entscheidungsfindung und die Umsetzung wirksamer Nachhaltigkeitsmaßnahmen zu erleichtern [DiSB22].

Für das in dieser Arbeit vorgestellte Modell ist eine genaue Betrachtung der Auswirkungen notwendig, wobei **zwei grundsätzliche Möglichkeiten** zur Generierung positiver Nachhaltigkeitswirkungen durch Produkte und Systeme unterschieden werden. Einerseits können Produktsysteme **inhärente positive Auswirkungen** auf die Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft erzeugen. Dies kann durch die Produktfunktionalität realisiert werden, wenn das Produkt beispielsweise nachhaltige Energie oder sauberes Trinkwasser zur Verfügung stellt. Die Reduzierung von Schadstoffen aus der Umwelt oder die Befriedigung der menschlichen Grundbedürfnisse wie Gesundheit und Sicherheit sind weitere denkbare positive Wirkungen, die inhärent durch das Produkt entstehen können. Je nach Produkt können solche Auswirkungen parallel zu den sonst überwiegend negativen Auswirkungen eines Produktsystems entstehen, wie im oberen Teil von Abbildung 3-30 dargestellt. Eine umfassendere Sammlung solcher dem Produktsystem direkt zugehörigen Auswirkungen wird in Kapitel 5.3.2 im Rahmen der Vorstellung des PIPE-Modells bereitgestellt. Daher wird an dieser Stelle diese erste Möglichkeit noch nicht näher ausgeführt, sondern der Fokus auf die weitere Option gelegt.

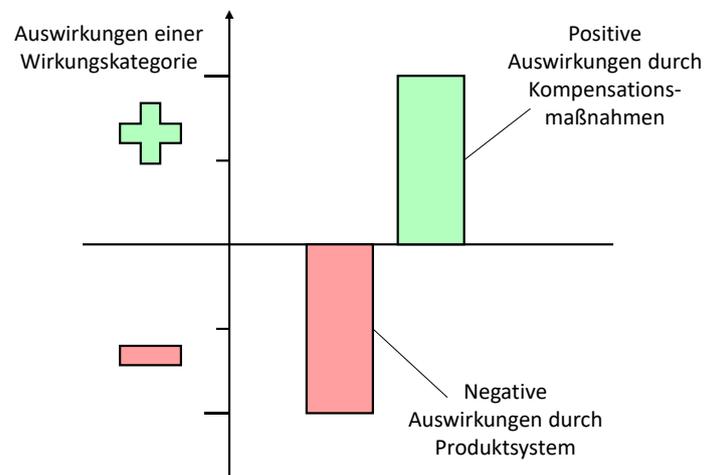


**Abbildung 3-30: Positive und negative Auswirkungen des Produktsystem und durch Kompensationsmaßnahmen auf die Dimensionen der Nachhaltigkeit**

Die zweite Möglichkeit zur Erzeugung positiver Auswirkungen ist durch die Umsetzung sogenannter **Kompensationsmaßnahmen** gegeben. Da in der Regel nicht sämtliche negativen Auswirkungen eines Produktsystems vermieden werden können, sind entsprechende zusätzliche Maßnahmen, die den negativen Auswirkungen entgegenwirken, eine Möglichkeit die Gesamtbilanz der Auswirkungen im Sinne der Nachhaltigkeit zu verbessern. Diese sind beispielhaft im unteren

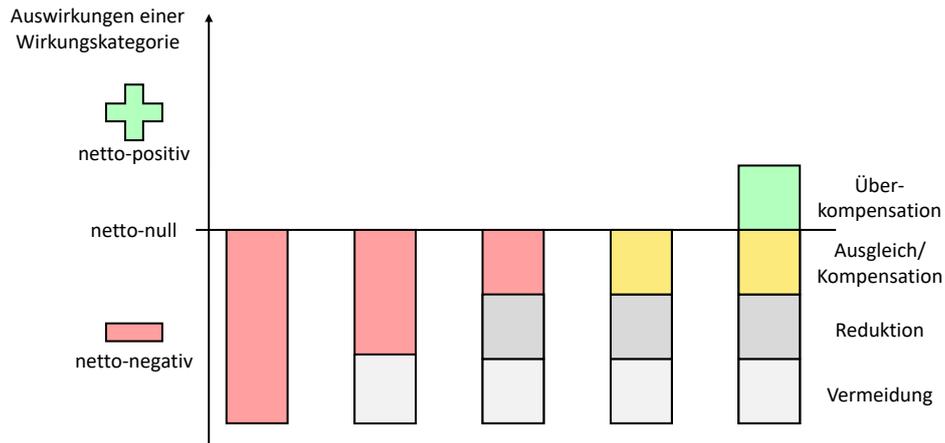
Bereich von Abbildung 3-30 als zusätzlicher Teil des Produktsystems mit separaten positiven (und möglicherweise negativen) Auswirkungen dargestellt.

In dieser Arbeit werden unter Kompensationsmaßnahmen also **gezielte und zusätzliche Maßnahmen** verstanden, die darauf abzielen negative Nachhaltigkeitswirkungen des Produktsystems durch positive Nachhaltigkeitswirkungen in der gleichen Wirkungskategorie zu vermindern, auszugleichen oder sogar zu überkompensieren. Abbildung 3-31 zeigt eine solche Bilanz von negativen Auswirkungen des Produktsystems in rot und den positiven Auswirkungen durch Kompensationsmaßnahmen in grün. Die jeweiligen Auswirkungen können innerhalb einer Wirkungskategorie in einer **Nettosumme** aufaddiert werden. Je nach Umfang der positiven und negativen Auswirkungen kann diese Nettosumme **netto-negativ, Null oder netto-positiv** sein. In der Regel dienen Kompensationsmaßnahmen dazu, die negativen Auswirkungen eines Produktsystems oder einer Organisation vollständig zu kompensieren bzw. zu neutralisieren, wie in Kapitel 3.4.2 näher beschrieben und in Abbildung 3-31 durch die betragsgleichen Auswirkungen dargestellt.



**Abbildung 3-31: Bilanz von Auswirkungen durch das Produktsystem und Kompensationsmaßnahmen**

Wie zu Beginn erwähnt, stellt die Vermeidung und Reduktion der negativen Auswirkungen ein wichtiger Bestandteil dar und sollte stets priorisiert werden, auch wenn entsprechende Kompensationsmaßnahmen möglich sind. Dadurch ergibt sich die sogenannte **Vermeidungshierarchie**, wie von Aiama et al. [AiLB15] beschrieben und in Abbildung 3-32 gezeigt. Ausgehend von den **ursprünglichen negativen Auswirkungen** eines Produktsystems innerhalb einer Wirkungskategorie sollte im ersten Schritt geprüft werden, ob diese gänzlich zu **vermeiden** sind. Ist dies nicht oder nur teilweise möglich, sollte versucht werden die negativen Auswirkungen weitestgehend zu **reduzieren**. Die verbleibenden, noch **netto-negativen** Auswirkungen können nun durch adäquate Kompensationsmaßnahmen **ausgeglichen** werden, wodurch sich die Summe der Auswirkungen zu **netto-null** ergibt. Soll in der entsprechenden Wirkungskategorie gar ein positiver Beitrag geleistet werden, können die Kompensationsmaßnahmen umfangreicher gestaltet werden, wodurch die negativen Auswirkungen **überkompensiert** werden. In der Wirkungsbilanz ergibt sich so ein **netto-positiver** Wert.



**Abbildung 3-32: Vermeidungshierarchie und Kompensation negativer Auswirkungen in Anlehnung an [AiLB15, Geb122]**

Eine weitere Begrifflichkeit im Rahmen von positiven Auswirkungen besteht im Konzept der „Handabdrücke“ (englisch: Handprints), die 2007 auf der „International Conference on Environment Education“ initiiert wurde [Cent07]. Sie wurde von Biemer et al. [BiDB13] 2013 komplementär zu dem Konzept der negativen ökologischen Fußabdrücke beschrieben und bezieht sich auf das Gute, was für die Umwelt getan wird. Der **Handabdruck** beschreibt „den gesellschaftlichen Mehrwert bzw. die positiven Nachhaltigkeitswirkungen von Produkten und bezieht die ökonomische und soziale Dimension in die Betrachtung mit ein“ [BEEG19].

In den folgenden Unterkapiteln werden die verschiedenen Möglichkeiten zur Erzeugung positiver Nachhaltigkeitswirkungen durch entsprechende Kompensationsmaßnahmen oder Handabdrücke jeweils im Rahmen der drei Nachhaltigkeitsdimensionen, in Bezug zur Kreislaufwirtschaft und ganzheitlich erläutert. Dabei wird die Kompensation von Treibhausgasemissionen wegen der größten Praxisrelevanz als beispielhaftes Modell am ausführlichsten beschrieben.

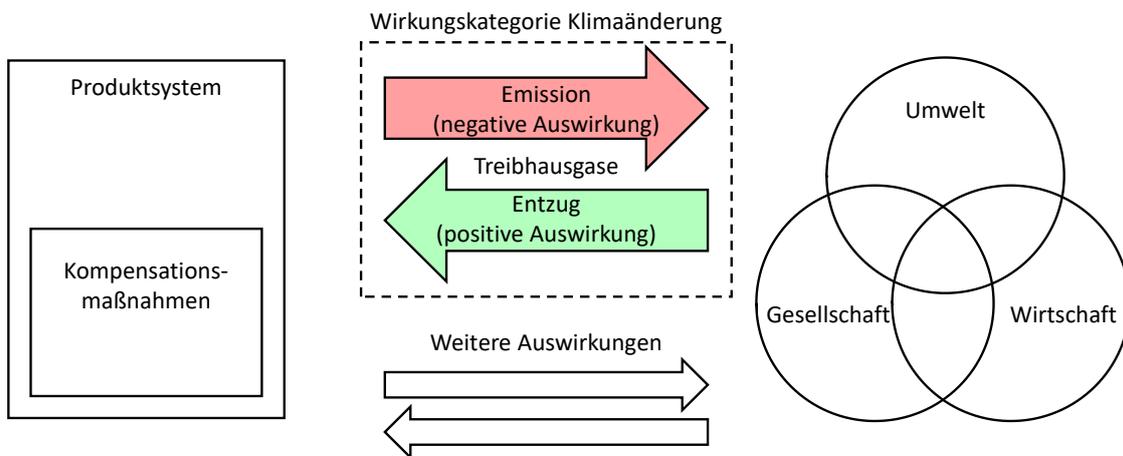
### 3.4.2 Kompensationen & positive Auswirkungen in der ökologischen Dimension

Kapitel 3.2.2 zeigt im Zuge der Vorstellung der Analyseverfahren zum einen die Vielfalt der ökologischen Auswirkungen in den diversen Wirkungskategorien und zum anderen den Fokus auf die Messung von negativen Auswirkungen des Produktsystems. Diese negativen Auswirkungen können auch durch die Anwendung von Synthesemethoden der *Nachhaltigen Produktentstehung* wie z.B. Ecodesign (siehe Kapitel 3.3.2) üblicherweise nicht gänzlich vermieden werden. Um diese nicht vermeidbaren negativen Auswirkungen zu kompensieren, existieren unterschiedliche Maßnahmen mit positiver Auswirkung auf die ökologische Dimension.

#### **Kompensation von Treibhausgasemissionen**

Insbesondere im Bereich der Treibhausgasemissionen haben sich hierbei zahlreiche Konzepte etabliert, die bereits in größerem Umfang angewendet werden [AFLS21]. Dadurch eignen sich diese Auswirkungen und die entsprechenden Kompensationen als Leitbeispiel. Wie in Abbildung 3-33 dargestellt, können beispielsweise Treibhausgase durch Teile eines Produktsystems als Emissionen an die Umwelt abgegeben werden, jedoch durch andere Teile, wie zum Beispiel

passende Kompensationsmaßnahmen, auch wieder der Umwelt entzogen werden. Dabei wird die Emission von Treibhausgasen in die Atmosphäre allgemein als negative Auswirkung auf die Umwelt angesehen und der Entzug dieser Gase folglich als positiv. Es ist zu beachten, dass hierbei stets nur die **Wechselwirkungen innerhalb einer bestimmten Wirkungskategorie** (vergleiche Tabelle 3-3) miteinander in Relation gestellt werden sollten. Üblicherweise existieren noch weitere Auswirkungen in anderen Wirkungskategorien, wobei positive Auswirkungen in einer Kategorie nicht die negativen Auswirkungen in einer anderen Kategorie kompensieren können. Zur näheren Erläuterung der Kompensationsmaßnahmen wird das grundlegende Vorgehen am Beispiel der Wirkungskategorie „Klimaänderung“ umfassend beschrieben. Dieses Vorgehen lässt sich auf weitere Wirkungskategorien transferieren.



**Abbildung 3-33: Wechselwirkungen positiver und negativer Auswirkungen am Beispiel von Treibhausgasen**

Zur Bilanzierung solcher Wechselwirkungen existieren mehrere ISO-Normen mit Bezug zur Wirkungskategorie Klimaänderung. Wie in Kapitel 3.2.2 erwähnt, behandelt die **ISO 14067** den „Carbon footprint von Produkten“ [ISO19], also die Bilanz der Emissionen und des Entzugs von Treibhausgasen entlang des gesamten Produktlebenszyklus. Hierin sind genaue Vorgaben zur Quantifizierung des CFP beschrieben. Das Ergebnis der Bilanzierung aller Treibhausgase wird in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>e) angegeben, was die Auswirkung einer in die Atmosphäre emittierten Tonne CO<sub>2</sub> auf das Klima widerspiegelt. Da der CFP eines Produkts in der Regel größer Null ist, werden zum Erreichen von Klimaschutzziele entsprechende zusätzliche Projekte und Maßnahmen umgesetzt. Die **ISO 14064** Teil 2 bietet hierzu eine „Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung, Überwachung und Berichterstattung von Reduktionen der Treibhausgasemissionen oder Steigerungen des Entzugs von Treibhausgasen auf Projektebene“ [DIN20a]. Darin werden Grundsätze zur Durchführung und genaue Anforderungen an Klimaschutzprojekte formuliert. Ziel solcher Projekte ist häufig, „**klimateutral**“ (englisch: carbon neutral) zu werden, also den CFP vollständig auszugleichen. Die kürzlich veröffentlichte **ISO 14068** „Management des Klimawandels - Übergang zu Netto-Null - Teil 1: Treibhausgasneutralität“ [ISO23] definiert Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien zur Erreichung und zum Nachweis von Kohlenstoffneutralität durch Quantifizierung, Reduzierung und anschließende Kompensation des CFP. Sie basiert auf

der bisher international anerkannten Spezifikation „**PAS 2060:2014** - Specification for the demonstration of carbon neutrality“ [BSI14] und soll diese zukünftig ersetzen.

Nach [ISO23] zeigt Abbildung 3-34, welche Teile in die Bilanzierung des Nettoergebnis miteinbezogen werden. Wie oben beschrieben, sind im CFP, der nach ISO 14067 [ISO19] bestimmt wird, alle Emissionen in und der Entzug von Treibhausgasen aus der Atmosphäre mit Bezug zum Produktlebenszyklus enthalten. Durch zusätzliche Klimaschutzprojekte können Emissionsgutschriften in Form von Zertifikaten mit einberechnet werden. An dieser Stelle ist es wichtig zwischen dem **offiziellen Emissionshandel**, wie zum Beispiel dem ETS der EU (siehe [Gome23, Yami05] und Kapitel 3.1.3) und sogenannten **freiwilligen Kompensationsprojekten** (englisch: Voluntary Carbon Markets (VCM)) zu unterscheiden. Bei Letzterem werden **drei Formen von Emissionsgutschriften** durch Projekte als Kompensationsmaßnahmen unterschieden. Die Projektmaßnahmen können Treibhausgasemissionen, die ohne die Projekte normalerweise entstehen würden, **vermeiden, reduzieren oder aktiv Treibhausgase aus der Atmosphäre entnehmen** (vergleiche Tabelle 3-10). In der Bilanz werden vom verursachten CFP des Produktlebenszyklus die Emissionsgutschriften abgezogen, die ebenfalls in CO<sub>2</sub>e angegeben werden. Daraus ergibt sich das Nettoergebnis, das unter der Vorgabe der Treibhausneutralität gleich null sein sollte. Bei einem Nettoergebnis größer null gilt das Ziel als verfehlt. Bei einem Ergebnis kleiner null werden mehr Treibhausgase der Atmosphäre entzogen, als in diese emittiert. Oftmals wird eine solche Bilanz als „netto-negativ“ oder „klimapositiv“ bezeichnet, wohingegen die Norm solche Fälle ebenfalls als „treibhausgasneutral“ einordnet [ISO23].

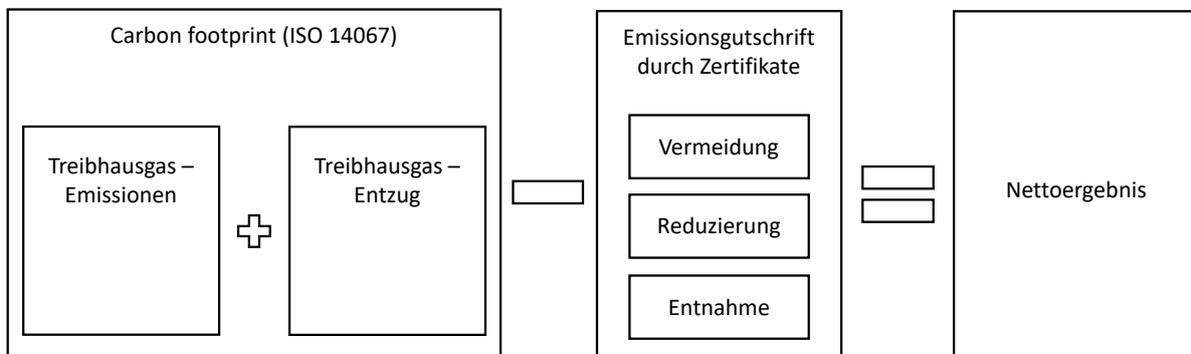


Abbildung 3-34: Bilanz der Treibhausgase zu einem Nettoergebnis nach [ISO23]

Im Rahmen solcher Maßnahmen zum Management der Treibhausgase stellt die **ISO 14080** als weitere Norm wichtige methodische Grundlagen bereit. Sie umfasst „Grundsätze und Prinzipien für Entwickler von Methoden hinsichtlich klimarelevanter Maßnahmen“ [ISO18] und schafft somit Grundlagen für die Weiterentwicklung und Verbesserung solcher Maßnahmen und Projekte. Der praxisnahe „Ratgeber: **Freiwillige CO<sub>2</sub>-Kompensation durch Klimaschutzprojekte**“ [WoSG18] des Umweltbundesamt beschreibt das Vorgehen zur Auswahl passender Projekte in **vier Schritten**. Zunächst soll geprüft werden, ob die eigenen Treibhausgasemissionen gänzlich vermieden oder zumindest reduziert werden können. Anschließend erfolgt die Berechnung der verbleibenden Treibhausgasemissionen, die durch zusätzliche Maßnahmen kompensiert werden

sollen. Im dritten Schritt werden die Qualitätsstandards entsprechender Anbieter von Zertifikaten geprüft und im letzten Schritt geeignete Zertifikate ausgewählt und erworben. Um die Qualität von Klimaschutzprojekten sicherzustellen, müssen **acht verschiedene Kriterien** geprüft werden. Zuerst muss die **Zusätzlichkeit** gewährleistet sein, da die Projekte beispielsweise Emissionen reduzieren müssen, die ohne die Zertifikatsverkäufe nicht vermieden worden wären. Zweitens muss die **Dauerhaftigkeit** der Emissionseinsparungen garantiert werden. Drittens sind **transparente Berechnung, Monitoring und Verifizierung** der Emissionen bzw. Treibhausgasentzüge notwendig. Weitere wichtige Aspekte sind die **Vermeidung von Doppelzählungen** durch zentrale Register, die **Einbindung von lokalen Stakeholdern** und die **Förderung nachhaltiger Entwicklung**, die über die reine Emissionsreduktion hinausgeht und zusätzliche soziale und ökologische Vorteile bietet. [WoSG18]

In der Praxis haben sich im Bereich der freiwilligen Kompensationsmaßnahmen von Treibhausgasemissionen vielfältige Projekte am Markt etabliert. Wie in Tabelle 3-10 zu sehen, lassen sich diese in Anlehnung an [ISO23] in die **drei Projektklassen** Vermeiden, Reduzieren und Entnahme (oder Einbindung) von Treibhausgasemissionen einteilen. Für jede der Klassen werden verschiedene Projekte beispielhaft aufgezählt. Eine umfassende Beschreibung aller beworbenen Kompensationsprojekte ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, weswegen auf weiterführende Literatur wie [BaHH09, BaKL24, BFTB24, BGFH24, LöAM24, WoSG18] und die „Carbon offset platform“ [Unit24b] der UN verwiesen wird.

**Tabelle 3-10: Beispiele für Kompensationsmaßnahmen in der Wirkungskategorie Klimaänderung**

Klasse	Beispielhafte Projekte
Vermeidung von Treibhausgasen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Methan-Vermeidung durch Gas auffangsysteme an Kläranlagen, Mülldeponien oder landwirtschaftlichen Systemen</li> <li>• Investition in erneuerbare Energien, um die Nutzung fossiler Brennstoffe zur Stromerzeugung zu vermeiden</li> </ul>
Reduzierung von Treibhausgasen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installation energieeffizienter Beleuchtung zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen durch Stromnutzung</li> <li>• Verwendung von Abwärme aus der Industrie zur Beheizung von Gebäuden oder zur Stromerzeugung</li> <li>• Bereitstellung effizienter Kochöfen in Entwicklungsländern zur Reduktion des Brennstoffbedarfs in Privathaushalten</li> </ul>
Entnahme (Einbindung) von Treibhausgasen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufforstung und Wiederaufforstung: Pflanzung neuer Bäume oder Wiederherstellung von Wäldern, die CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre binden</li> <li>• Schutz von Waldgebieten: Verringerung von Emissionen aus Entwaldung und Waldschädigung (englisch: REDD+)</li> <li>• Moor- und Torferhaltungsprojekte: Schutz und Wiederherstellung von Mooren, die CO<sub>2</sub> speichern</li> <li>• Carbon Capture and Storage (CCS): Technologien, die CO<sub>2</sub> aus Industrieabgasen oder direkt aus der Luft abscheiden und sicher speichern, beispielsweise in erschöpften Öl- und Gasfeldern</li> </ul>

Auch wenn diese freiwilligen Kompensationsprojekte eine wünschenswerte Maßnahme zum Ausgleich nicht vermeidbarer negativer Auswirkungen in der Wirkungskategorie Klimaänderung darstellen, gilt es zu erwähnen, dass zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen in jüngster Zeit die Effektivität solcher Maßnahmen deutlich in Frage stellen [BBCF23, BFHH22, DLKW24, GiKH24, HAAB23, Haya10, Haya19, HCSG20, HEBB23, OCFH23, RiWP15, SNPB23, WBSK20, WeBF19, WeBH24, West16, WWSB23]. West et al. haben exemplarisch 26 Projekte zur Vermeidung von Entwaldung (englisch: REDD+ Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation) in sechs verschiedenen Ländern untersucht und festgestellt, dass diese die Entwaldung nicht signifikant verringert haben und damit die Einbindung von CO<sub>2</sub> deutlich geringer ausfällt als behauptet [WWSB23]. Grund für die große Diskrepanz sind unter anderem methodische Schwachstellen in der Berechnung des Basisszenario, welches die erwartete Entwaldung ohne die entsprechenden Projekte berechnet [WeBH24]. Ähnliche Abweichungen zwischen prognostizierten und realen Emissionsreduzierungen wurden bei Projekten festgestellt, die effizientere Kochöfen zur Verfügung gestellt haben [GiKH24], um nur zwei der Untersuchungen zu nennen. Um die **Effektivität und Glaubwürdigkeit** von freiwilligen Kompensationsmaßnahmen zu verbessern, wird daher eine **höhere Transparenz** in den Projekten sowie eine **solidere Bewertungsgrundlage** gefordert [DLKW24]. Außerdem wird eine **strengere Regulierung des Kompensationsmarkts** mit entsprechenden **Qualitätskriterien** für die Projekte für notwendig erachtet [BGFH24]. Hierdurch sollen auch Doppelzählungen vermieden und eine bessere Abstimmung mit den nationalen Klimaschutzziele gemäß des Pariser Klimaabkommens von 2015 erreicht werden [BGFH24]. Diese Forderungen decken sich mit den oben genannten Kriterien des Umweltbundesamts [WoSG18] und denen der ISO 14068 [ISO23]. Trotz der Kritik an einer Vielzahl von Kompensationsprojekten, existieren auch Projektanbieter, die auf Basis unabhängiger Untersuchungen empfohlen werden [HaVo10, Stif22]. In Kapitel 3.4.7 findet eine übergreifende kritische Einordnung von Kompensationen statt, nachdem auf die anderen Wirkungskategorien und Nachhaltigkeitsdimensionen bzw. Aspekte eingegangen wurde.

#### ***Kompensation weiterer Auswirkungen in der ökologischen Dimension***

Auch wenn die meisten bekannten Kompensationsmaßnahmen in erster Linie auf die Senkung der Treibhausgaskonzentration in der Erdatmosphäre abzielen, ist es für eine ganzheitlich nachhaltige Entwicklung notwendig, den „Tunnelblick“ (englisch: Carbon Tunnel Vision) [DeOs23, Koni22] zu erweitern. Die Analysemethoden der ökologischen Dimension in Kapitel 3.2.2 und die darin gezeigten Wirkungskategorien nach ReCiPe2016 [HSES17] verdeutlichen das Spektrum der möglichen negativen Auswirkungen über die Klimaänderung hinaus. Für das in dieser Arbeit vorgestellte Produktentstehungsmodell (Kapitel 5) ist die Möglichkeit zur **Kompensation der Auswirkungen in den weiteren Wirkungskategorien** von grundlegender konzeptioneller Bedeutung. Daher wird im Folgenden auf Ansätze zur Kompensation solcher Auswirkungen eingegangen. Als Basis zur Analyse der zu kompensierenden Auswirkungen wird das Vorgehen der Ökobilanz (Kapitel 3.2.2) vorausgesetzt, da diese die umfassendste und international anerkannteste

Methode zur Messung von Umweltauswirkungen bietet. Zur besseren Übersichtlichkeit wird dabei nur auf die Wirkungskategorien nach ReCiPe2016 [HSES17] eingegangen. Theoretisch denkbar wären auch Kompensationsmaßnahmen in anderen Ebenen des Umweltwirkungsmechanismus (siehe Abbildung 3-7 und Kapitel 3.2.2), wie den einzelnen Sachbilanzergebnissen oder den Wirkungsendpunkten. Da die Sachbilanzergebnisse jedoch zu vielfältig sind, die jeweiligen Wirkungsendpunkte mehreren Wirkungen ausgesetzt sein können und das Leitbeispiel der Kompensation von Treibhausgasemissionen ebenfalls auf der **Ebene der Wirkungskategorie** stattfindet, wird im Folgenden nur auf die übrigen Wirkungskategorien eingegangen, die abschließend in Tabelle 3-11 zusammengefasst sind.

Auch wenn das Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht und das Montreal-Protokoll (siehe Kapitel 3.1.1) eine positive Wirkung zur Regeneration der Ozonschicht in der Stratosphäre zeigen [Worl22], können dennoch Auswirkungen durch Produkte und Systeme entstehen, die zum **Ozonabbau in der Stratosphäre** beitragen. Dreyfus et al. [DMAF24] stellen eine Methode zur Berechnung der Kompensation dieses Ozonabbaus vor, wobei die vorgeschlagenen Maßnahmen auch Synergien zur Minderung der Klimaänderung aufzeigen. Die Autoren schlagen unter anderem vor, ineffiziente Kühlgeräte zu ersetzen, ozonschichtschädigende Substanzen aus verschiedenen Quellen zu sammeln und zu zerstören sowie die Reduktion dieser Substanzen schneller umzusetzen, als es im Montreal-Protokoll vorgeschrieben ist [DMAF24].

Da **ionisierende Strahlung** die Zellen und genetisches Material von Menschen, Tieren und Pflanzen irreversibel schädigen kann, wobei die Schäden auch langfristige Auswirkungen über Generationen haben können, konnten keine Kompensationsmöglichkeiten in dieser Wirkungskategorie gefunden werden. Es gilt das Prinzip der Vermeidung von Exposition sowie das der Prävention. Die Belastungen durch die **Bildung von Feinstaub** werden seit Jahrzehnten untersucht und es bestehen entsprechend viele Ansätze zur Verminderung dieser Belastungen [Umwe07, Umwe12]. Sofern sie im Produktsystem selbst nicht gänzlich vermieden werden können, bietet sich die Kompensation durch die Vermeidung und Reduzierung an anderen Quellen analog zu den Treibhausgasen an. Ähnlich zu den Klimaschutzprojekten hat der Energiekonzern Eskom Projekte initiiert, um die Feinstaubemissionen eines Kohlekraftwerks an anderer Stelle einzusparen [Esko21]. In Übereinstimmung mit der „Air Quality Offsets Guideline“ Südafrikas [Depa16] soll die Luftverschmutzung durch Müllverbrennung verhindert werden und die Verbrennung von Kohle und Holz in Haushalten durch Substitution mit Gas oder Elektroheizungen, besserer Gebäudedämmung oder den Einsatz von energieeffizienter Beleuchtung reduziert werden [Esko21]. Da es eine Vielzahl an Filtermöglichkeiten für Feinstaub gibt [JHTL23], wäre auch der Einbau von Filteranlagen bei maßgeblichen Emittenten als Kompensationsprojekte denkbar. Neben den technischen Filtermöglichkeiten, existieren auch Ansätze zur Reduzierung der Luftbelastungen durch Pflanzen, wie Moose [FrSa07] und Wein [Thön06]. Entsprechende Begründungen könnten als lokale Kompensationsprojekte zur Luftreinigung zum Beispiel in urbanen Räumen umgesetzt werden [Gree20].

Während eine höhere Konzentration von Ozon in der Stratosphäre erwünscht ist, kann eine Zunahme von Ozon und anderen Oxidantien in der bodennahen Luftschicht Mensch und Umwelt schaden [Baye21]. Diese reaktiven Sauerstoffverbindungen werden selten direkt emittiert, sondern entstehen unter Sonneneinstrahlung aus Vorläufersubstanzen wie Stickstoffoxiden und flüchtigen Kohlenwasserstoffen (englisch: Volatile Organic Compounds (VOC)), die natürlichen oder anthropogenen Ursprungs sein können [Baye21]. Da keine Kompensationsmaßnahmen zur **photochemischen Ozonbildung** bekannt sind, gilt es die Emission der Vorläufersubstanzen möglichst zu vermeiden. Denkbare Kompensationsmaßnahmen für nicht vermeidbare Emissionen wären, analog zu den anderen Luftschadstoffen, die Emission an anderer Stelle zu vermeiden. Potentielle Maßnahmen könnten bei den Hauptemittenten der Vorläufersubstanzen, also dem Straßenverkehr, Feuerungsanlagen sowie der Herstellung und Verwendung von Lösemitteln [Umwe11] umgesetzt werden.

In der Wirkungskategorie **terrestrische Versauerung** wird in erster Linie auf die Versauerung von Böden eingegangen, da der Versauerung der Ozeane durch erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration theoretisch mit Maßnahmen aus Tabelle 3-10 entgegengewirkt werden kann. Ursächlich sind auch hier meist Emissionen in die Luft, die versauernde Schwefel- und Stickstoffeinträge in die Land-Ökosysteme zur Folge haben [Umwe13a]. Als Kompensationsmaßnahme könnte wiederum die Vermeidung und Reduktion der ursächlichen Emissionen an anderen Quellen in Betracht gezogen werden. Die Versauerung von Waldböden wird seit Jahrzehnten mit der Ausbringung von Kalk ausgeglichen [Bund17, Fvaf13]. Die Kalkung von Waldböden ist jedoch umstritten und kann unter Umständen zur Eutrophierung beitragen [RSER14]. In der Schweiz werden außerdem waldbauliche Maßnahmen vorgeschlagen, wie eine Reduzierung der Vollbaumernte oder eine angepasste Baumartenwahl [Bund17].

Unter Eutrophierung wird die Anreicherung von Nährstoffen in Ökosystemen verstanden, weswegen sie oft umgangssprachlich als Überdüngung bezeichnet wird. Dabei kann zwischen terrestrischer Eutrophierung von Land-Ökosystemen [Umwe13b] und aquatischer Eutrophierung ursprünglich nährstoffarmer Gewässer [Umwe10] unterschieden, die unter anderem durch den Eintrag von Phosphorverbindungen aus Landwirtschaft, Industrie, Energiewirtschaft und Verkehr verursacht werden können. In der Wirkungsabschätzung nach ReCiPe2016 wird die **Frischwasser Eutrophierung** auf Basis der Phosphoremissionen bewertet [HSES17]. Neben internationalen Bemühungen diese globalen Probleme durch eine Regulierung der Nährstoffeinträge anzugehen [Unep24], bestehen Forschungsansätze zum Ausgleich der erhöhten Nährstoffwerte in Ökosystemen [LBGJ23]. Solche Ansätze wären als Kompensationsmaßnahmen denkbar, jedoch steht die Implementierung noch vor Herausforderungen [LBGJ23]. Ein Ansatz besteht im Anlegen von Muschelfarmen, die in Küstennähe die Nährstoffkonzentration senken können [GrLL09]. Ebenfalls wird die Renaturierung von Feuchtgebieten als Nährstoffsенke gesehen [Euro16, GrEJ97, GrSW97], wodurch sowohl die terrestrische Eutrophierung reduziert, als auch der Eintrag in aquatische Gebiete in der Folge verringert werden könnte. Außerdem werden die Vermeidung

der Nährstoffeinträge in die Ökosysteme durch veränderte Landwirtschaft und Landnutzung sowie die entsprechende Reinigung von Abwässern als wirksame Maßnahmen genannt [Euro16]. In der Wirkungskategorie **Humantoxizität** konnten keine passenden Kompensationsmaßnahmen identifiziert werden. Da die Vergiftung von Menschen in der Regel irreversible Schäden verursacht, ist eine wirkungsvolle Kompensation derzeit nicht darstellbar. Einmal aufgetretene gesundheitliche Schäden, wie genetische Mutationen, Krebs oder neurologische Störungen, können durch nachträgliche Maßnahmen nicht rückgängig gemacht werden. Es besteht lediglich ein Ansatz zur Bepreisung der Schäden durch Wirkungen zur Humantoxizität in Form von Umweltpreisen [PBJV21].

In der Wirkungskategorie **Ökotoxizität** werden die Auswirkungen chemischer und anderer Substanzen auf terrestrische und marine Ökosysteme sowie auf Frischwasser zusammengefasst. Da analog zur Humantoxizität irreversible Schäden entstehen, konnten hier keine adäquaten Kompensationsmaßnahmen gefunden werden. Daher sind solche Auswirkungen durch präventive Maßnahmen von vornerein zu verhindern.

Die **Landnutzung** stellt in den meisten Produktsystemen eine unvermeidbare Wirkung dar, die Einfluss auf die biologische Vielfalt (Biodiversität), die biotische Produktion und die ökologische Bodenqualität nehmen kann. Die Wirkungen hängen dabei von der Intensität und der Art der Nutzung sowie der damit verbundenen Transformation ab [MBDD07]. Da die Schäden durch die Wirkungen der Landnutzung teilweise irreversible Verluste der Biodiversität bewirken können, gilt auch hier grundsätzlich eine Vermeidungshierarchie bevor es zur Nutzung von Kompensationen kommt [CaFB23, MAPS10, Tuck22]. Es bestehen verschiedene Kompensationsmaßnahmen, die genutzte oder veränderte Landflächen bzw. Eingriffe in die Biodiversität kompensieren sollen [Oecd16]. Die Gestaltung effektiver und gleichwertiger Maßnahmen hängt dabei stark von den ursprünglichen Eigenschaften des genutzten Land ab, da zwei Flächen nicht ökologisch identisch sein können [Oecd16]. Die Maßnahmen sollten daher individuell und abhängig von dem genutzten Land gestaltet werden, wobei ebenso komplexe und individuelle Bewertungsmethoden bestehen und zusätzlich gesetzliche Rahmenbedingungen existieren können, wie beispielsweise in [Brun07] gezeigt wird. Neben den in der Wirkungskategorie Klimaänderung genannten Schutz- und Aufforstungsprojekten, sind Beispiele für solche Maßnahmen Artenschutzprojekte für Wildbienen oder bedrohte Vogelarten und Projekte zur Begrünung von urbanen Gebieten. Auch die Renaturierung oder Entsiegelung nicht mehr genutzter versiegelter Flächen zählen zu den möglichen Maßnahmen.

Die **Wassernutzung** stellt eine weitere Wirkungskategorie dar. Da Wasser sowohl eine lebenswichtige Grundlage für Menschen und Ökosysteme darstellt als auch in der Landwirtschaft und industriellen Produktion benötigt wird, ist ein nachhaltiges Wassermanagement erforderlich [TzPA20]. Hinzukommen die regionalen Unterschiede in der Wasserknappheit [Alli19]. Ist die Nutzung von Wasser in Produktsystemen nicht vermeidbar, sollte Wasser im Sinne der Kreislaufwirtschaft betrachtet werden und der WFP (siehe Kapitel 3.2.2 und [DIN16]) mit entsprechenden Maßnahmen kompensiert werden. Zu möglichen Maßnahmen zählen die Reinigung von

genutztem Wasser vor der Abgabe an die Umwelt [HBKS15], die Nutzung von Regen- oder Salzwasser statt Grundwasser [TzPA20] oder waldbauliche Maßnahmen zur Erhöhung des Grundwassereintrags [Trin16]. Zusätzlich existieren zahlreiche Projekte zur besseren Trinkwasserversorgung in Ländern mit Trinkwasserknappheit, wie der Bau von Brunnen, Nebelnetzen oder zur Verbesserung der Hygiene- und Sanitärsituation [Glob24, Viva24].

Um eine Verknappung von **fossilen und mineralischen Ressourcen** zu verhindern, sollten diese im Sinne der Kreislaufwirtschaft genutzt werden, um am Lebensende des Produktsystems in möglichst gleicher Qualität weiter verwendet werden zu können (siehe Kapitel 3.3.5 und Tabelle 3-7). Beispiele hierfür sind das Materialrecycling am EoL sowie die Rückgewinnung von Ressourcen aus Mülldeponien oder aus Umweltverunreinigungen, wie etwa auf den Ozeanen treibende Kunststoffe. Alternativ können diese gegebenenfalls durch erneuerbare Ressourcen aus nachhaltigen Quellen substituiert werden. Beispielsweise sind die Verwendung von biobasierten Produkten und Kunststoffen, biologischen Kraftstoffen oder Biogas zu nennen, wie die Bemühungen der Europäischen Kommission zeigen [Euro24c]. Allerdings sollte bei einer solchen Substitution darauf geachtet werden, dass die Quellen der erneuerbaren Ressourcen die Grundsätze der Nachhaltigkeit erfüllen, um Problemverschiebungen zu vermeiden, wie unter anderem die „Food versus Fuel“-Debatte [ToHe16] verdeutlicht. Die nachhaltige Waldwirtschaft [Umwe13c] ist hierzu ein Beispiel, welches bereits seit langer Zeit im Rahmen der Nachhaltigkeit diskutiert wird (vergleiche Kapitel 2.1.1).

Die Maßnahmensammlung aus Tabelle 3-11 bietet einen umfassenden Überblick über die Vielfalt möglicher Auswirkungen und deren Kompensationsmöglichkeiten, ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Die Bewertung der einzelnen Maßnahmen und deren Wechselwirkungen inklusive möglicher negativer Nachhaltigkeitswirkungen (beispielsweise sozialer Auswirkungen [TuHH22]), gehen über das Fachgebiet dieser Arbeit hinaus und stellen komplexe Fragestellungen im Forschungsbereich der Biologie, Geologie, Chemie, Soziologie und anderen Fachrichtungen dar. Daher werden diese hier nicht weiter diskutiert.

Tabelle 3-11: Mögliche Kompensationsmaßnahmen in ökologischen Wirkungskategorien

Wirkungskategorien nach ReCiPe2016	Beispielhafte Maßnahmen mit weiterführenden Verweisen
Klimaänderung	Siehe Tabelle 3-10
Ozonabbau	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ersetzen ineffizienter Kühlgeräte [DMAF24]</li> <li>• Sammlung und Zerstörung ozonschichtschädigender Substanzen aus Klimaanlage, Kühlschränken und industrieller Produktion [DMAF24]</li> <li>• Beschleunigung der Reduktion ozonschichtschädigender Substanzen als im Montreal-Protokoll vorgeschrieben [DMAF24]</li> </ul>
Ionisierende Strahlung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Kompensationsmaßnahmen identifiziert</li> </ul>
Bildung von Feinstaub	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einbau technischer Filteranlagen bei anderen Emittenten [JHTL23]</li> <li>• Verhinderung von Müllverbrennung [Esko21]</li> <li>• Reduktion von Kohle und Holzverbrennung in Haushalten durch effizientere Öfen, Substitution von Brennstoffen, Wärmedämmung und energieeffiziente Beleuchtung [Esko21]</li> <li>• Pflanzen zur Luftreinigung [FrSa07, Gree20, Thön06]</li> </ul>
Photochemische Ozonbildung (terrestrische Ökosysteme & menschliche Gesundheit)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Kompensationsmaßnahmen identifiziert</li> <li>• Potenziell: Vermeidung der Vorläufersubstanzen der photochemischen Ozonbildung an anderen Quellen</li> </ul>
Terrestrische Versauerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kalkung von Böden [Bund17, Fvaf13, RSER14]</li> <li>• Waldbauliche Maßnahmen [Bund17]</li> <li>• Potenziell: Vermeidung und Reduktion der ursächlichen Emissionen an anderen Quellen</li> </ul>
Frischwasser Eutrophierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vermeidung von Nährstoffeinträgen in die Ökosysteme durch veränderte Landwirtschaft und Landnutzung [Euro16]</li> <li>• Abwasserreinigung [Euro16]</li> <li>• Renaturierung von Feuchtgebieten als Nährstoffsinken [Euro16, GrEJ97, GrSW97]</li> <li>• Anlegen von Muschelfarmen zur Nährstoffbindung [GrLL09]</li> <li>• Potenziell: Vermeidung von Nährstoffeinträgen aus anderen Quellen</li> </ul>
Humantoxizität	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Kompensationsmaßnahmen identifiziert</li> <li>• Kostenberechnung in Form von Umweltkosten [PBJV21]</li> </ul>
Ökotoxizität (terrestrisch, Frischwasser, marin)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Kompensationsmaßnahmen identifiziert</li> </ul>
Landnutzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Renaturierung, Begrünung, Entsiegelung von Flächen [Nabu07]</li> <li>• Gewässerverbessernde Maßnahmen [Nabu07]</li> <li>• Habitatprojekte für bedrohte Tierarten [BiKn16]</li> <li>• Schutzgebiete [BiKn16]</li> <li>• Mehrfachnutzung von Flächen [Bioö24]</li> <li>• Siehe auch Tabelle 3-10</li> </ul>

Wassernutzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasserkreisläufe etablieren: Kläranlagen in der industrielle Produktion [HBKS15]</li> <li>• Projekte zur Trinkwasserversorgung (Brunnen, Pumpen, Nebelnetze, Wasserfilter, etc.) [Glob24, Viva24]</li> <li>• Projekte zur Verbesserung der Hygiene und sanitären Versorgung [Viva24]</li> <li>• Entsalzungsprojekte [TzPA20]</li> <li>• Regenwassernutzung [TzPA20]</li> <li>• Waldbauliche Maßnahmen zur Erhöhung des Grundwassereintrags [Trin16]</li> </ul>
Ressourcenverknappung: mineralisch & fossil	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Werterhaltung fossiler und mineralischer Ressourcen im Sinne der Kreislaufwirtschaft (siehe Kapitel 3.3.5 und Tabelle 3-7)</li> <li>• Substitution fossiler und mineralischer Ressourcen durch erneuerbare Ressourcen aus nachhaltigen Quellen [Euro24c]</li> <li>• Projekte zum nachhaltigen Anbau erneuerbarer Ressourcen, wie in der nachhaltigen Waldwirtschaft [Umwe13c]</li> </ul>

### ***Circular Ecosystem Compensation Approach***

Als gesonderter Ansatz zur Kompensation von negativen Auswirkungen ist der „Circular Ecosystem Compensation Approach“ (CEC-Approach) [MBFH23a] oder zu Deutsch „„Gemeinsam umweltneutral handeln“-Standard“ [MBFH23b] nach Moore et al. zu nennen. Er zielt als Erweiterung des „Projekt Greenzero“ [GrHi20], welches versucht ein klimaneutrales Leben zu erreichen, darauf ab, einen Schritt weiterzugehen und die sogenannte **Umweltneutralität** zu erreichen. Wie in Abbildung 3-35 dargestellt, besteht der Ansatz aus insgesamt **sechs Schritten**, beginnend mit der **Erstellung einer Ökobilanz** gemäß [DIN21a, DIN21c] des entsprechenden Produkts oder der Dienstleistung. Im zweiten Schritt erfolgt die **Reduktion der Umweltauswirkungen** basierend auf den Ergebnissen der Ökobilanz, um dem Grundsatz „Reduktion vor Kompensation“ [MBFH23b] gerecht zu werden. Der dritte Schritt umfasst die Umrechnung der verbleibenden Umweltauswirkungen in sogenannte **Umweltkosten** nach einer Methode der CE Delft, dem „Environmental Prices Handbook“ [SSML18]. Diese Kosten werden anhand von Kostensätzen für die verschiedenen Wirkungskategorien berechnet und im Ökobilanz-Bericht festgehalten. Anhand dieser Umweltkosten wird im vierten Schritt ein **Umweltwert** generiert, indem degradierte Flächen ökologisch aufgewertet werden. Die Gesamtkosten dieser Aufwertung sollen dabei den verursachten Umweltkosten entsprechen. Dadurch entsteht im fünften Schritt eine naturschutzfachliche und ökologische **Aufwertung** dieser Flächen, um einen Ausgleich der durch die Produkte oder Dienstleistungen verursachten negativen Umweltauswirkungen zu bewirken. Im letzten Schritt wird ein **Monitoring-Konzept** erstellt, um die Wirksamkeit der umgesetzten Maßnahmen langfristig zu überwachen und sicherzustellen. [MBFH23a, MBFH23b]

Schritte	Beschreibung und Resultate	Methode
1. Ökobilanz	Analyse und Ermittlung der Umweltauswirkungen eines Produkts, einer Organisation oder einer Person mittels Ökobilanz <b>Ergebnis:</b> Umweltauswirkungen für verschiedene Wirkungskategorien	Ökobilanz
2. Reduktion	Reduktion der Umweltauswirkungen eines Produkts, einer Organisation oder einer Person mit Hilfe der Ökobilanz <b>Ergebnis:</b> Reduzierte Umweltauswirkungen nach dem Prinzip „Reduktion von Kompensation“	
3. Umweltkosten	Umrechnung der ermittelten Umweltauswirkungen in externe Kosten mittels Monetarisierung <b>Ergebnis:</b> Umweltkosten in €, aufsummiert für die Wirkungskategorien	Monetarisierung
4. Umwert	Der Umweltwert, der die Umweltkosten ausgleicht, wird generiert mittels Monetarisierung der ökologischen Aufwertung von degradierten Flächen <b>Ergebnis:</b> Umweltwert in €, ermittelt über Vollkostenbetrachtung der Flächenaufwertung	
5. Ökologische Aufwertung	Naturschutzfachliche Aufwertung und langfristige Entwicklung von degradierten Flächen zum Ausgleich der ermittelten Umweltauswirkungen <b>Ergebnis:</b> ökologisch aufgewertete Flächen mit positiven Wirkungen für Biodiversität und menschliche Gesundheit	Renaturierung
6. Monitoring	Langfristige Überwachung und Sicherstellung des Erreichens der Ziele der ökologischen Aufwertung der Flächen <b>Ergebnis:</b> Langfristige Überwachung und Sicherstellung des Erreichens der formulierten Entwicklungs- und Aufwertungsziele	

Abbildung 3-35: Sechs Schritte des „Gemeinsam umweltneutral handeln“-Standard [MBFH23b, MBFH23a]

Der Kompensationsansatz nach Moore et al. stellt einen der ersten wissenschaftlich fundierten Ansätze zur Kompensation sämtlicher Auswirkungen in der ökologischen Dimension dar und verfolgt dabei einen transparenten und anwendungsfreundlichen Weg. Die Vereinheitlichung der vielseitigen Umweltauswirkungen in dem monetarisierten Betrag der Umweltkosten und die Kompensation durch eine einzelne Maßnahme, in Form der Aufwertung von degradierten Flächen, lässt jedoch die Frage offen, ob eine solche Kompensation wirkungsgerecht und effektiv die vielfältigen negativen Umweltauswirkungen von Produktsystemen ausgleichen kann und somit wirklich von „Umweltneutralität“ gesprochen werden kann.

### 3.4.3 Kompensationen & positive Auswirkungen in der sozialen Dimension

Kapitel 3.2.3 hat gezeigt, dass durch Produktsysteme auch vielerlei soziale Auswirkungen positiver und negativer Art entstehen können. Im Unterschied zur Analyse ökologischer Aspekte, betrachten die sozial orientierten Analysemethoden, wie S-LCA, auch explizit positive Auswirkungen wie die lokale Beschäftigung, Technologieentwicklung und der Beitrag zur wirtschaftlichen Entwicklung durch Produkte oder Organisationen [UBSL20]. Dabei werden **positive Auswirkungen definiert als Vorteile**, die im Laufe des Produktlebenszyklus entstehen und einen positiven Beitrag zur **Verbesserung des menschlichen Wohlbefindens** leisten [UBSL20]. Ekener et al. [EkHG18] und Di Cesare et al. [DSSP18] diskutieren Ansätze zur Adressierung solcher positiver Auswirkungen innerhalb der S-LCA Methode. Die „Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations“ [UBSL20] unterscheiden **drei Typen** von positiven sozialen

Auswirkungen, die simultan auftreten oder auch kombiniert werden können. **Typ A** bezeichnet positive soziale Leistung, die über das übliche Maß hinaus gehen, **Typ B** sind positive soziale Auswirkung, die nur durch die Anwesenheit des Produkts oder der Organisation entstehen und **Typ C** sind positive soziale Auswirkungen, die durch den Produktnutzen entstehen (vergleiche auch Kapitel 3.4.1 und Kapitel 5.3.2) [UBSL20].

In den S-LCA Guidelines wird ausdrücklich betont, dass positive soziale Auswirkungen dabei nicht mit negativen Auswirkungen gemeinsam aggregiert werden sollten, auch wenn es sich um Auswirkungen in der gleichen Wirkungskategorie handelt. Da soziale Auswirkungen auf Einzelpersonen oder auf Gruppen von Einzelpersonen einwirken, können positive Auswirkungen auf bestimmte Personen nicht negative Auswirkungen auf andere Personen ausgleichen. Daher sollten die positiven und negativen Ergebnisse stets separat ausgewiesen werden, um die notwendige Transparenz zu wahren. Aus diesem Grund sind **Kompensationsmaßnahmen im S-LCA weder vorgesehen, noch akzeptiert.** [UBSL20]

Der Grundsatz, keine Kompensationen in der sozialen Dimension zuzulassen, wird auch in in dieser Arbeit vorgestellten Modell (Kapitel 5) übernommen, da Kompensationen im sozialen Bereich als ein ethisches und moralisches Problem zu werten sind. Hingegen sollten durch ein ganzheitliches Vorgehen die negativen Auswirkungen bestmöglich reduziert und die positiven sozialen Auswirkungen durch zusätzliche Maßnahmen maximiert werden.

### **Social Handprints**

Eine Möglichkeit positive soziale Auswirkungen von Produktsystemen zu vergrößern bzw. zu generieren, besteht im sogenannten „**Social Handprinting**“ oder in **sozialen Handabdrücken**. Sie sind die Ergebnisse von Veränderungen der üblichen Geschäftspraxis (englisch: business as usual), die positive soziale Auswirkungen aufweisen, sei es durch die Reduzierung des sozialen Fußabdrucks oder durch zusätzliche, nicht damit zusammenhängende positive soziale Effekte, welche sich auf die Wertschöpfungskette von Produkten oder Organisationen beziehen oder auch darüber hinausgehen können [UBSL20]. Benoit Norris et al. [BNAP19] beschreiben eine Methode zur Erzeugung solcher sozialen Handabdrücke. Die Möglichkeiten zur Umsetzung innerhalb von Handabdruck-Projekten sind mit der individuellen Situation der von der Wertschöpfungskette betroffenen Stakeholder verbunden und können vielfältig sein. In Tabelle 3-12 ist eine Sammlung an potenziellen Maßnahmen aufgeführt, die in die **Kategorien „Bildung & Ausbildung, Gesundheit, Arbeitsbedingungen & -rechte, Gleichberechtigung & Inklusion und Entwicklung & Infrastruktur“** eingeteilt ist. Diese Kategorien orientieren sich unter anderem an den 17 Nachhaltigkeitszielen (Abbildung 1-2) und den Wirkungskategorien des S-LCA (Tabelle 3-4). Analog zur Maßnahmensammlung aus Tabelle 3-11 in der ökologischen Dimension, soll die nachfolgende Tabelle 3-12 einen Überblick über die Bandbreite an potenziellen Projekten mit positiven sozialen Auswirkungen geben und erhebt folglich keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 3-12: Mögliche Projekte zur Erzeugung positiver sozialer Auswirkungen (Social Handprints)

Kategorien	Beispielhafte Maßnahmen mit weiterführenden Verweisen
Bildung & Ausbildung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Förderung der schulischen Bildung [Plan24a, Unic24a, Worl24b]</li> <li>• Ausbildungsprogramme [Worl24c]</li> </ul>
Gesundheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betriebliche Gesundheitsförderung [Bund24]</li> <li>• Hygiene in Krisengebieten [Unic24b]</li> <li>• Verbesserung der Hygiene und sanitären Versorgung [Viva24]</li> <li>• Globale Gesundheitsinitiativen [Ärzt24, Worl24d]</li> </ul>
Arbeitsbedingungen & -rechte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Förderung der Rechte von Arbeitern [Fair24]</li> <li>• Faire Bezahlung [Fair24]</li> <li>• Sicherheit und Arbeitsschutz entlang der gesamten Wertschöpfungskette [Inte24b]</li> <li>• Einführung von Versicherungen für Mitarbeiter gegen Arbeitslosigkeit, Krankheit, etc. [Inte21]</li> </ul>
Gleichberechtigung & Inklusion	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Förderung der Chancengleichheit [Unic24c]</li> <li>• Förderung der Gleichberechtigung [Soci22]</li> <li>• Inklusionsprojekte für Menschen mit Behinderung [Akti24]</li> </ul>
Entwicklung & Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bau von Schulen und Straßen [Plan24b]</li> <li>• Wasserversorgung [Glob24, Viva24]</li> <li>• Energieversorgung [Sola24]</li> </ul>

#### 3.4.4 Kompensationen & positive Auswirkungen in der ökonomischen Dimension

Die ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit stellt auch im Bereich der Kompensationen und positiven Auswirkungen die am wenigsten erforschte Dimension dar. Aufgrund der unklaren Definition ökonomisch nachhaltigen Handelns (Kapitel 2.1.4) und der fehlenden ökonomischen Nachhaltigkeitsbewertung (Kapitel 3.2.4), fällt es schwer negative und positive ökonomische Auswirkungen von Produkten und Dienstleistungen voneinander zu trennen. Daher können **keine konkreten Maßnahmen** analog zur ökologischen und sozialen Dimension hergeleitet werden. Jedoch sind die ökologischen und sozialen Kompensationsmaßnahmen in der Regel mit zusätzlichen **Kosten für die Finanzierung der Kompensationsprojekte** verbunden, deren Betrachtung in diesem Kapitel behandelt werden soll.

Die negativen ökologischen Auswirkungen von Produkten verursachen erhebliche Kosten [Navr23, SSML18], die in der Regel nicht vom verursachenden Unternehmen oder dem Endkunden, sondern von der Gesamtgesellschaft und der Umwelt getragen werden. Kompensationsmaßnahmen sind eine Möglichkeit diese Kosten in die Lebenszykluskosten zu übertragen und damit auszugleichen. In der Regel werden Kompensationsprojekte durch den Hersteller von Produkten oder den Dienstleister finanziert, wodurch sich ein **neuer Kostenanteil** bildet, wie in Abbildung 3-36 als Erweiterung der Lebenszykluskosten aus Kapitel 3.2.4 dargestellt. Im Vergleich zu den Lebenszykluskosten ohne Kompensationsmaßnahmen ergibt sich auch ein höherer Zielpreis für den Kunden.

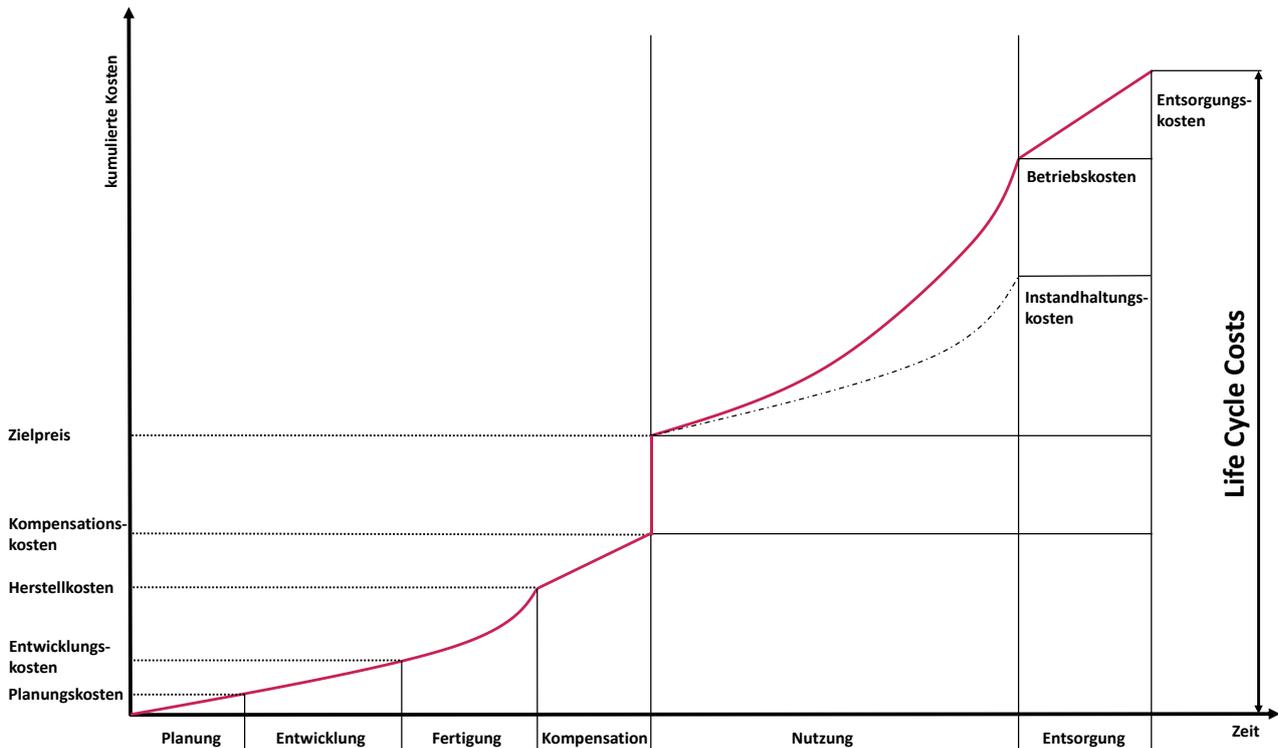


Abbildung 3-36: Erweiterung der Life Cycle Costs (nach [EKLM14, VDI05]) um die Kompensationskosten

Es können jedoch auch **ökonomische Vorteile** durch die Umsetzung von Kompensationsmaßnahmen entstehen, da sich Produkte mit kompensierten Nachhaltigkeitswirkungen zertifizieren und die positiven Auswirkungen bzw. Handabdrücke entsprechend vermarkten lassen [TPGL24]. Durch die Übertragung der Kosten auf das Unternehmen entsteht ein zusätzlicher **finanzieller Anreiz** die negativen zu kompensierenden Maßnahmen weiter zu vermeiden und zu reduzieren, wodurch die Nachhaltigkeit der Produkte verbessert werden kann.

### 3.4.5 Kompensationen & positive Auswirkungen in der Kreislaufwirtschaft

Die Nutzung von Ressourcen jeglicher Art stellt in der Regel eine grundlegende Voraussetzung zur Realisierung von Produktsystemen dar und kann daher gemeinhin nicht gänzlich vermieden werden. In Kapitel 3.4.2 und Tabelle 3-11 werden innerhalb der Wirkungskategorie Ressourcenverknappung bereits Maßnahmen zur wirkungsgerechten Kompensation der Nutzung und Verknappung von Ressourcen genannt, wobei Wasser sowie mineralische, fossile und erneuerbare Ressourcen unterschieden werden. Diese Maßnahmen basieren größtenteils auf den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, weswegen eine starke Überschneidung zu diesem Kapitel besteht. Es konnten keine Maßnahmen oder Projekte identifiziert werden, die direkt und ausschließlich negative Auswirkungen auf die Kreislaufwirtschaft kompensieren sollen. Es bestehen jedoch starke Synergien zu einigen der bisher erläuterten Kompensationsmaßnahmen. Weiter lassen sich aus den beschriebenen Analyse- und Synthesemethoden bezüglich der Kreislaufwirtschaft (Kapitel 3.2.5 und 3.3.5) entsprechende Maßnahmen ableiten. Daher wird nachfolgend nur verkürzt auf **allgemeine Maßnahmen** eingegangen, die in einer Kreislaufwirtschaft als positiv betrachtet werden können.

Im Sinne der Kreislaufwirtschaft (Kapitel 2.1.5) können die in Tabelle 3-13 gelisteten Maßnahmen im Produktsystem selbst oder an anderer Stelle umgesetzt werden. Dabei können **drei Klassen** für eine positive Veränderung identifiziert werden. Erstens, die **Vermeidung oder Reduzierung des Abbaus primärer, nicht erneuerbarer Ressourcen** durch Substitution mit Sekundärmaterialien oder mit erneuerbaren Ressourcen sowie durch den Einsatz erneuerbarer Energien. Zweitens, die **Werterhaltung aktuell genutzter Ressourcen** durch verschiedene Strategien wie Re-Sell, Re-Use, Repair, und Materialrecycling im biologischen oder technischen Kreislauf. Drittens, die Bereitstellung zusätzlicher Ressourcen durch die **Rückgewinnung von Rohstoffen** aus Altlasten, Umweltverschmutzungen und nicht mehr genutzten Ressourcen, wie beispielsweise der Sammlung und Aufbereitung von Plastikmüll aus der Umwelt.

**Tabelle 3-13: Beispiele positiver Effekte in einer Kreislaufwirtschaft**

Klasse	Beispielhafte Projekte und Maßnahmen
Vermeiden oder Reduzieren des Abbaus primärer, nicht erneuerbarer Ressourcen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Substitution von Primärmaterialien durch Sekundärmaterialien: Nutzung von Materialien aus bestehenden Kreisläufen</li> <li>• Substitution abiotischer Primärmaterialien durch erneuerbare Ressourcen, die nachhaltig gewonnen werden:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen wie Holz</li> <li>○ Verwendung biobasierter Rohstoffe für Kunst- und Kraftstoffe</li> </ul> </li> <li>• Substitution fossiler Energie durch erneuerbare Energie</li> </ul>
Werterhaltung aktuell genutzter Ressourcen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Werterhaltungsoptionen nach [ReVW18]: siehe Tabelle 3-7               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Re-sell, Re-use, Repair, Refurbish, Remanufacture, Re-purpose</li> </ul> </li> <li>• Materialrecycling im Sinne von C2C [BrMB07, McBr02]:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ biologischer Kreislauf</li> <li>○ technischer Kreislauf</li> </ul> </li> </ul>
Bereitstellung zusätzlicher Ressourcen aus Altlasten, Umweltverschmutzungen und nicht mehr genutzten Ressourcen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remine: Gewinnung von Rohstoffen aus Mülldeponien oder Altlasten [EBWV22, Maes23]</li> <li>• Sammeln und Rückführung von Kunststoffen aus der Umwelt [JoKB21, MSSS19]</li> <li>• Aufbereitung von verschmutztem oder kontaminiertem Wasser (siehe Tabelle 3-11)</li> </ul>

### 3.4.6 Ganzheitliche Ansätze

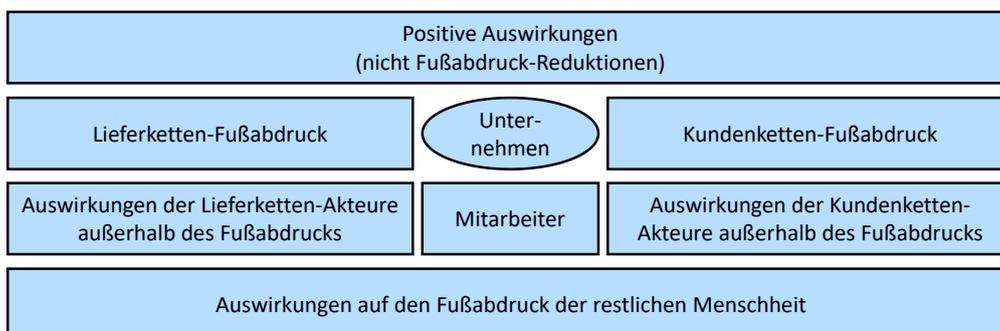
Neben einzelnen Maßnahmen in den jeweiligen Nachhaltigkeitsdimensionen und mit Bezug zur Kreislaufwirtschaft, bestehen auch Kompensationsprojekte mit einem ganzheitlichen Nachhaltigkeitsfokus [Soci24] und zunehmend mehr Ansätze im Bereich der Synthesemethoden, die eine (netto-) positive Wirkung anstreben (vergleiche Kapitel 3.1). Eine der ersten Ansätze zu „Positive Development“ oder „Net-Positive Design“ entstammen aus dem Fachbereich der Architektur und der urbanen Entwicklung von Janis Birkeland [BiKn16, Birk08, Birk18, Birk20, Birk22] und weiteren Forschern des Fachbereichs [Atti16, Cole15]. Weiterhin existieren Vorschläge zur Umsetzung des Konzepts „net-positive“ auf Unternehmens- und Geschäftsmodellebene [PoWi21, Wwft14].

Die einzelnen Ansätze innerhalb der *Nachhaltigen Produktentstehung* und im Schnittfeld dazu werden im Folgenden einzeln vorgestellt.

### **SHINE and Pure Net Positive Change Framework**

Das "Sustainability and Health Initiative for NetPositive Enterprise" (SHINE) (frei übersetzt: Nachhaltigkeits- und Gesundheitsinitiative für netto-positive Unternehmen) des Massachusetts Institute of Technology ist ein Forschungszentrum, das ehemals in Harvard angesiedelt war und sich darauf konzentriert, die **wissenschaftliche Grundlage zur Bewertung von Netto-Positivität** zu verbessern [Shin24]. SHINE ist eine Zusammenarbeit von Forschern und Industriepartnern, die das Ziel verfolgen, ihre positiven Einflüsse (Handabdrücke) größer als ihre negativen (Fußabdrücke) zu gestalten [Shin24]. Unter der Leitung von Gregory A. Norris wurden sowohl **Grundlagen für Handabdrücke** [Norr13], als auch mehrere **Fallstudien** veröffentlicht [BNAP19, NoPh15]. Weitere Publikationen behandeln in erster Linie die **Analyse von Handabdrücken** und bieten **methodische Rahmenwerke** [NBMK21, Norr15, Norr17]. Das „Pure Net Positive Change Framework“ aus [Norr17] bietet darunter einen guten Überblick über den möglichen Handlungsspielraum eines Unternehmens, wie in Abbildung 3-37 wiedergegeben.

Das Rahmenwerk zeigt dabei auf, an welcher Stelle eine positive Veränderung umgesetzt werden kann, sei es durch eine Reduktion von negativen Auswirkungen oder der Generierung von positiven Auswirkungen. Um netto-positiv zu werden, gilt der einfache Grundsatz, dass ein Unternehmen einen größeren Handabdruck als sein Fußabdruck schaffen muss, wobei betont wird, dass jeweils jede Wirkungskategorie separat betrachtet werden muss. Wie die Kapitel 3.4.2 und 3.4.3 sowie Abbildung 3-37 aufzeigen, bestehen vielseitige Möglichkeiten für positive Veränderungen im Handlungsspielraum der Unternehmen. Neben den direkten Auswirkungen des Unternehmens und seinen Mitarbeitern, kann der Fußabdruck ebenso in der vorgelagerten Lieferkette oder der nachgelagerten Kundenkette reduziert werden. Dabei können jeweils auch Auswirkungen fokussiert werden, die außerhalb des Fußabdrucks des verursachenden Unternehmens liegen. Weiters Verbesserungspotential existiert in der Reduktion von Auswirkungen der restlichen Menschheit oder in der Generierung von direkten positiven Auswirkungen. [Norr17]



**Abbildung 3-37: "Pure Net Positive Change" Framework [Norr17] (frei übersetzt)**

Eine Detaillierung des Ansatzes ist im „SHINE handprint framework“ [NBMK21] beschrieben. Dieses basiert auf dem Vorgehen einer Ökobilanz (Kapitel 3.2.2) und soll die Art und Weise, wie die

ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen von Akteuren berücksichtigt werden, erweitern und dazu beitragen, die Schaffung und Einschätzung positiver Auswirkungen zu fördern [NBMK21].

### **Living Product Challenge**

Ein Ansatz zur Zertifizierung netto-positiver Produkte ist die „Living Product Challenge“ (LPC) [Inte18, Inte24c] des International Living Future Institute, die mit der „Living Building Challenge“ auch einen Ansatz für netto-positive Gebäude verfolgen. Die LPC ist ein wissenschaftlich fundiertes **Zertifizierungsprogramm**, das darauf abzielt, Produkte zu fördern, die nicht nur umweltschonend sind, sondern auch aktiv zur Regeneration der Natur und zur Verbesserung der Lebensqualität beitragen. Im Zentrum des Ansatzes steht die Abkehr vom reinen Effizienz-Gedanken nur „weniger schlecht“ zu sein, hin zu einer **produktiven und positiven Wirkung auf die Umwelt und Gesellschaft**. Die Zertifizierung erfolgt dabei in **sieben Leistungsbereichen**, den „Petals“ (frei übersetzt: Blütenblätter), in denen es insgesamt **20 verschiedene Vorgaben** bzw. „Imperative“ gibt. Sie sind in Tabelle 3-14 frei ins Deutsche übersetzt.

**Tabelle 3-14: Übersichtsmatrix zur Zertifizierung nach der Living Product Challenge [Inte18] (frei übersetzt)**

Leistungsbereich (Petal)	Vorgabe (Imperative)		
Ort	01. Verantwortungsbewusster Ort		
	02. Lebensraumaustausch		
	03. Beschaffung für eine nachhaltige Wirtschaft		
Wasser	04. Wasser-Fußabdruck		
	05. Netto-positives Wasser		
Energie	06. Energie-Fußabdruck		
	07. Netto-positive Energie		
Gesundheit und Glück	08. Rote Liste		
	09. Transparente Materialgesundheit		
	10. Menschliches Gedeihen		
Material	11. Verantwortungsvolle Industrie		
	12. Regenerative Materialien		
	13. Netto-positiver Abfall		
	14. Netto-positiver Kohlenstoff		
Gerechtigkeit	15. Ethische Lieferkette		
	16. Gerechte Investitionen		
	17. Gerechte Organisationen		
	18. Sozialer Zusatznutzen		
Schönheit	19. Inspiration & Bildung		
	20. Schönheit & Geist		
<i>Farblegende</i>	<i>Kernvorgabe</i>	<i>Notwendig für Zertifizierung</i>	<i>Vorgaben für Handabdrücke</i>

Zu den Leistungsbereichen zählen der Ort, Gesundheit und Glück, Gerechtigkeit, Schönheit, Wasser, Energie und Material, wovon die letzten drei zwingend für eine Zertifizierung notwendig sind. Innerhalb der 20 Vorgaben werden Kernvorgaben, Vorgaben für Handabdrücke und zusätzlichen Vorgaben unterschieden, wie farblich in Tabelle 3-14 hervorgehoben. Das Programm soll Hersteller von Produkten dazu anregen, konsequent jeden Aspekt ihrer Produkte zu durchdenken und diese mittels Handabdrücken und Reduktion der Fußabdrücke in netto-positive Produkte zu wandeln. [Inte18, Inte24c]

Die Grundlagen des Zertifizierungsprogramms sind im „LPC Standard“ [Inte18] zusammengefasst und zusätzlich bietet das „LPC Handbook“ [Inte24c] eine ausführliche Anleitung zur Zertifizierung und Dokumentation. Außerdem werden zahlreiche Fallstudien verschiedener Produkte bereitgestellt [Inte24d].

Da das Programm zwar als Inspiration zur Gestaltung und Zertifizierung netto-positiver Produkte dient, jedoch die Produktentstehung nicht detailliert beschreibt und im Forschungsgebiet bislang wenig diskutiert wird, wird an dieser Stelle auf eine weitergehende Erläuterung verzichtet.

#### ***Handabdruck – positive Nachhaltigkeitseffekte***

Positive Nachhaltigkeitseffekte waren ebenfalls Untersuchungsgebiet im Forschungsprojekt „Der Handabdruck: ein komplementäres Maß positiver Nachhaltigkeitswirkung von Produkten“ [Coll24], aus dem mehrere Veröffentlichungen stammen. Das erste Arbeitspapier gibt einen Überblick über bestehende Ansätze aus Literatur und Praxis, die ein Grundverständnis sowie Möglichkeiten zur Messung positiver Nachhaltigkeitswirkungen vermitteln [KHSS17]. Im zweiten Arbeitspapier des Forschungsprojekts wird „Ein Ansatz zur Messung positiver Nachhaltigkeitswirkungen von Produkten“ [BEEH17] vorgeschlagen. Dieser wird in Fallstudien in den Branchen „Food, Konsumgüter und Bauen & Wohnen“ [BEEG19] in Form von Pilotprojekten angewendet. Die Handabdruck-Methode dient in erster Linie zur Analyse und Bewertung von positiven Nachhaltigkeitseffekten und hat keinen Synthescharakter.

Der erarbeitete Ansatz wurde auch in englischer Sprache als „Handprint approach“ [KSBE19] publiziert und soll im Rahmen eines LCSA (Kapitel 3.2.6) die positiven Beiträge zur nachhaltigen Entwicklung im Sinne der 17 SDGs (Abbildung 1-2) analysieren und bewerten. Er unterscheidet **drei Fälle von positiven Nachhaltigkeitswirkungen**: Die Erzeugung einer eigenen positiven Wirkung durch die Schaffung und Vermehrung von etwas Wünschenswertem (Handabdruck), die Beseitigung oder Umwandlung bestehender negativer Wirkung, die durch andere verursacht wurden (Handabdruck), und die Reduzierung und Vermeidung selbst verursachter negativer Wirkung (Reduzierung des Fußabdrucks) [BEEH17, KSBE19]. Basierend auf dem Vorgehen der Ökobilanz nach [ISO06b] besteht der Ansatz ebenfalls aus **vier Phasen**, die in Abbildung 3-38 dargestellt sind.



**Abbildung 3-38: Handprint approach [KSBE19] (frei übersetzt)**

Ergänzend zu den Aktivitäten im Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanz werden im „Handprint approach“ in der ersten Phase Indikatoren ausgewählt und priorisiert. Hierzu existieren **37 Indikatoren aus drei Bereichen**: Soziale Aspekte, Umweltaspekte sowie Aspekte wirtschaftlicher, politischer und institutioneller Art. Die Indikatoren wurden aus den **17 SDGs und deren 169 Unterzielen** abgeleitet, um die Beziehung zwischen den organisatorischen Maßnahmen und ihrem Beitrag zu den oft unspezifischen Zielen aufzuzeigen. Es folgt eine klassische Sachbilanz in der zweiten Phase, in der auch eine Wirkungsabschätzung für Umweltauswirkungen umgesetzt werden kann. Die dritte Phase ist im Gegensatz zur Ökobilanz die Bewertungsphase, in der das Potenzial des Produkts positive Nachhaltigkeitsbeiträge zu den SDGs zu leisten bewertet wird. Da die Zielsetzungen der SDGs oft vage und unscharf formuliert sind und daher die Erreichung schwer zu quantifizieren ist, basiert das Bewertungsverfahren auf der Fuzzy-Set-Theorie. Hierbei werden jedem ausgewählten Indikator ein Zugehörigkeitsgrad zwischen null (keine Beiträge zu den SDGs) und eins (maximale Beiträge zu den SDGs) zugewiesen. Dadurch wird eine differenzierte Bewertung der Beiträge von Unternehmen zu den SDGs ermöglicht, indem der Grad der Zielerreichung durch unscharfe, aber nachvollziehbare Funktionen abgebildet wird. Abschließend werden die Ergebnisse des Handprint-Ansatzes interpretiert und kritisch hinsichtlich ihrer Robustheit und des Potenzials zur Steigerung positiver Beiträge eines Produkts zur nachhaltigen Entwicklung beurteilt. [BEEH17, KSBE19]

Es bestehen weitere Publikationen zur Messung und Bewertung positiver Nachhaltigkeitseffekte von Teilnehmern des Projekts und darüber hinaus [AHTS20, CrVe20, KHSS17, KüHa19, KüSH22].

### **Positivfabrik**

Als gesonderter Ansatz aus der Produktion, als Teilgebiet der *Nachhaltigen Produktentstehung*, wird das Konzept der Positivfabrik beschrieben. Das Konzept wurde 2015 von Herrmann et al. erstmals als „**Positive Impact Factory**“ [HBKS15] vorgestellt und in der Dissertation von Malte Gebler unter dem Titel „Planung und Gestaltung einer Positivfabrik als Beitrag für eine absolute Nachhaltigkeit“ [Geb122] weiter ausgearbeitet. Die Arbeit untersucht die folgende Forschungsfrage: „Wie kann das Design eines Fabriksystems gestaltet sein, sodass positive Nachhaltigkeitswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft entstehen können?“ [Geb122]

Die Konzeptentwicklung der Positivfabrik erfolgt in den **fünf Stufen des Design für Systeminnovation und Transition** und umfasst darunter eine Vision, eine Systemdefinition und Modellierung, einen Prototyp, Prozesse und Methoden zur Umsetzung sowie ein Organisationsmodell der Positivfabrik. Wie bereits im Titel deutlich wird, ist das übergreifende Ziel durch eine solche Fabrik einen **positiven Beitrag zum Konzept der absoluten Nachhaltigkeit** nach Hauschild [HaKR20] zu leisten (siehe Kapitel 2.3.2). Die Positivfabrik soll nicht nur innerhalb der planetaren Grenzen operieren, sondern auch die nachhaltige Entwicklung durch positive ökologische und soziale Wirkungen fördern. Gebler unterscheidet hierfür zwei Bedingungen. Die **Effektivitätsbedingung** fordert, dass die Fabrik ökologisch effektiv operiert und das menschliche Wohlbefinden der Gesellschaft sichert. Als weiteren Schritt setzt die **Positivbedingung** voraus, dass die Fabrik „einen ökologischen und sozialen Entwicklungsbeitrag für die Verbesserung von Ökosystemen und zur Steigerung des menschlichen Wohlbefindens innerhalb der Fabrik oder im Umfeld“ [Geb122] erzeugt. Dadurch werden grundlegende Systemeigenschaften und die Definition der Positivfabrik abgeleitet, wie in Abbildung 3-39 dargestellt. Die Positivfabrik ist auf der Ebene der Volkswirtschaft dargestellt, die mit den beiden anderen Ebenen der Gesellschaft und Biosphäre über verschiedene In- und Outputs interagiert. Die planetaren Grenzen stellen die Effektivitätsgrenze der Umwelt dar und das menschliche Wohlbefinden die der Gesellschaft. Innerhalb dieser wird auf Inputseite eine verantwortliche Nutzung gesellschaftlicher und ökologischer Ressourcen als grundlegende Systemeigenschaft gezeigt. Auf der Seite der Outputs soll eine Steigerung des menschlichen Wohlbefindens sowie eine Verbesserung der Ökosysteme stattfinden. [Geb122]

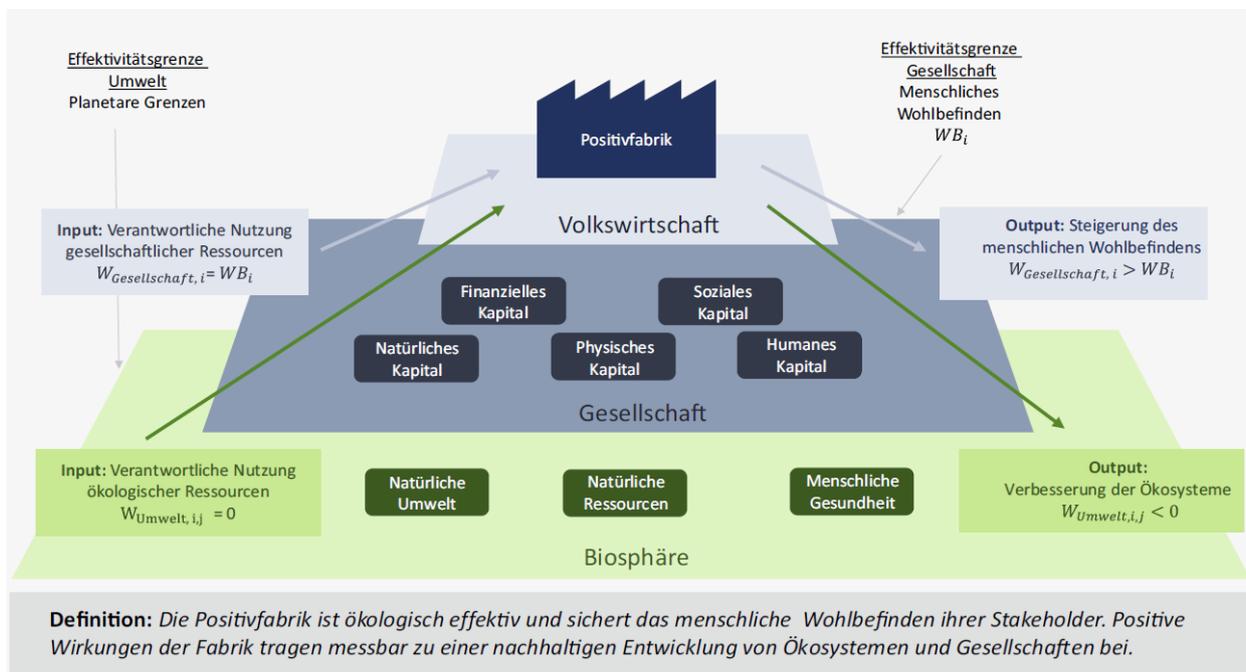


Abbildung 3-39: Grundlegende Systemeigenschaften der Positivfabrik [Geb122]

Das Konzept wird auf **drei Systemebenen** in Form des Umfelds (Makro-Ebene), der Fabrik selbst (Meso-Ebene) und der Teilsysteme bzw. Stakeholdergruppen (Mikro-Ebene) umfangreich erläutert. Es folgen Modelle und Visualisierungen des Konzepts und die Ableitung von Indikatoren zur

Messung des Erfüllungsgrads. Das Konzept wird abschließend beispielhaft auf eine moderne Automobilfabrik transferiert. [Geb122]

Die Positivfabrik bietet wichtige Grundlagen für diese Arbeit und stellt durch die konsequente Verfolgung des Ziels, positive Nachhaltigkeitseffekte zu leisten, ein visionäres Konzept im Bereich der nachhaltigen Produktion dar. Die Umsetzung solcher Fabriken könnte einen wesentlichen Teil zur nachhaltigen Entwicklung beitragen.

Im Ausblick skizziert Gebler das Potenzial, das Konzept der Positivfabrik auf die Produktebene auszuweiten, wodurch weiterführende wissenschaftliche Fragestellungen entstehen, beispielsweise die Definition von Nachhaltigkeitsanforderungen für Produkte innerhalb einer solchen Positivfabrik [Geb122]. Diese Erweiterung könnte eine systematische Integration der Wirkungen auf relevante Stakeholder, wie Kunden und Nutzer, ermöglichen und so eine umfassende Nachhaltigkeitsvision von „positiven Produkten aus positiven Fabriken“ [Geb122] fördern.

### 3.4.7 Kritische Einordnung von Kompensationen

Nachdem die verschiedenen Möglichkeiten zur Erzeugung positiver Nachhaltigkeitswirkungen durch inhärente Wirkungen oder zusätzliche Kompensationsmaßnahmen im Rahmen der drei Nachhaltigkeitsdimensionen, der Kreislaufwirtschaft sowie aus einer ganzheitlichen Perspektive vorgestellt wurden, erfolgt eine kritische Einordnung von Kompensationen. Dabei liegt der Fokus insbesondere auf der Generierung positiver Wirkungen durch **Kompensationsmaßnahmen**, da diese im späteren Modell eine zentrale Rolle einnehmen und der Einsatz solcher Maßnahmen umstritten ist. Der erläuterte Forschungsstand zeigt, dass die Effektivität dieser Maßnahmen teilweise kritisch bewertet wird und bereits Forderungen bestehen, die darauf abzielen, ihre Wirksamkeit sicherzustellen (siehe Kapitel 3.4.2 und [BBCF23, BFHH22, DLKW24, GiKH24, HAAB23, Haya10, Haya19, HCSG20, HEBB23, OCFH23, RiWP15, SNPB23, WBSK20, WeBF19, WeBH24, West16, WWSB23]). Diese beschränken sich in erster Linie auf Kompensationen in der ökologischen Wirkungskategorie Klimaänderung. Um den Einsatz von Kompensationen aus einer ganzheitlichen Perspektive zu betrachten, werden an dieser Stelle die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken von Kompensationsmaßnahmen zur Erreichung netto-positiver Wirkungen in Form einer eigens erstellten **SWOT-Analyse** untersucht. Die SWOT-Analyse ist in Tabelle 3-15 zusammengefasst und wird nachfolgend erläutert.

Die **Stärken** solcher Maßnahmen liegen darin, dass sie es grundsätzlich ermöglichen, negative Nachhaltigkeitswirkungen auszugleichen. Durch gezielte Überkompensation können sogar netto-positive Effekte erzielt werden (Abbildung 3-32). Zudem bieten Kompensationsmaßnahmen die Möglichkeit, Umwelt- und soziale Kosten in den Produktpreis zu integrieren, wodurch ein Bewusstsein für die tatsächlichen Auswirkungen von Produkten, insbesondere bei Produktentwicklern, geschaffen wird. Kompensationsprojekte schaffen außerdem zusätzliche Arbeitsplätze und fördern den Einsatz von Analysemethoden im PEP, da zunächst die zu kompensierenden Wirkungen erfasst werden müssen.

Potenzielle **Schwächen** ergeben sich jedoch aus möglichen Defiziten in der Transparenz und Effektivität der Projekte, die insbesondere im Bereich der Maßnahmen der Wirkungskategorie von aktuellen Untersuchungen aufgedeckt wurden, wie beispielsweise [DLKW24, WBSK20, WeBH24]. Auch wenn die zusätzlichen Kosten durch Kompensation ökonomisch einfach einpreisbar sind, könnten diese eine wirtschaftliche Belastung darstellen, insbesondere für kleinere Unternehmen. Es besteht zudem das Risiko, dass Kompensationsprojekte zusätzliche unerwünschte Nachhaltigkeitswirkungen verursachen (vgl. Abbildung 3-30). Problematisch scheint zudem, dass sich irreversible Schäden nicht kompensieren lassen, und bestehende Kompensationsmöglichkeiten, insbesondere in sozialen und ökonomischen Bereichen, noch unzureichend erforscht sind. Hinzu kommt ein Mangel an standardisierten Bewertungsmethoden, die die langfristige Wirksamkeit der Maßnahmen objektiv beurteilen und transparent zertifizieren können. Auch der Einfluss des räumlichen und zeitlichen Abstands zwischen der zu kompensierenden Auswirkung und der Kompensation ist bislang nicht ausreichend untersucht.

**Chancen** bieten sich durch die Möglichkeit, die Marktposition zu stärken, indem Produkte mit kompensierten Nachhaltigkeitswirkungen angeboten werden. Investitionen in innovative Kompensationsprojekte könnten neue Märkte schaffen und Unternehmen dabei unterstützen, einen aktiven Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung zu leisten. Durch transparente Ansätze lässt sich potenziell das Vertrauen der Konsumenten erhöhen und die Kundenbindung stärken.

Mögliche **Risiken** bestehen vor allem in der Gefahr einer sogenannten „Ablassmentalität“, bei der Unternehmen bzw. Produktentwickler die Vermeidung und Reduktion negativer Wirkungen zugunsten von einfach umsetzbaren Kompensationen vernachlässigen. Hierbei würde die Vermeidungshierarchie aus Abbildung 3-32 nicht eingehalten und der Grundsatz „Reduktion vor Kompensation“ [MBFH23b] missachtet werden. Außerdem könnte durch diese Mentalität die Erzeugung negativer Auswirkungen verharmlost werden. Bei unzureichender Umsetzung oder ineffektiven Maßnahmen kann der Eindruck von „Greenwashing“ entstehen und das Vertrauen von Konsumenten mindern. Dabei besteht auch die Gefahr des Betrugs durch gefälschte oder ineffektive Kompensationsprojekte, insbesondere wenn diese in entfernten Regionen umgesetzt werden.

Der SWOT-Analyse zufolge können Kompensationsmaßnahmen ein effektives Instrument sein, um negative Nachhaltigkeitswirkungen von Produkten und Systemen zu verringern und sogar netto-positive Wirkungsbilanzen zu erzeugen. Dennoch weist der Ansatz derzeit zahlreiche Schwachstellen und Risiken auf, die je nach Anwendungsfall eine Verbesserung der Nachhaltigkeitsbilanz verhindern können. Um die langfristige Wirksamkeit und Glaubwürdigkeit von Kompensationsmaßnahmen zu gewährleisten, sind daher klare Rahmenbedingungen erforderlich. Die Ergebnisse der Analyse dienen, zusammen mit den Erkenntnissen aus dem Forschungsstand, als Grundlage für die Formulierung von **Anforderungen an Kompensationsmaßnahmen** für den Einsatz im Modell dieser Arbeit (siehe Kapitel 5.4.1, Tabelle 5-2).

Tabelle 3-15: SWOT-Analyse zu Kompensationsmaßnahmen

Strengths - Stärken	Weaknesses - Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Möglichkeit, negative Nachhaltigkeitswirkungen auszugleichen</li> <li>• Erzeugung netto-positiver Effekte durch Überkompensation</li> <li>• Ökonomisch einpreisbar – Umwelt- und soziale Kosten werden eingepreist</li> <li>• Neue Arbeitsplätze durch Kompensationsprojekte</li> <li>• Förderung des Einsatzes von Analysemethoden im PEP</li> <li>• Steigerung des Bewusstseins für Nachhaltigkeitswirkungen bei Produktentwicklern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehlende Transparenz und Effektivität</li> <li>• Zusätzliche Kosten durch Kompensation</li> <li>• Zusätzliche (unerwünschte) Nachhaltigkeitswirkungen durch Kompensationsprojekte</li> <li>• Auswirkungen, die irreversible Schäden hervorrufen, sind nicht kompensierbar</li> <li>• Kompensationsmöglichkeiten in der ökologischen Dimension nicht genügend ausgebaut</li> <li>• Keine Kompensation in der sozialen Dimension</li> <li>• Kompensation in der ökonomischen Dimension und mit Bezug zur Kreislaufwirtschaft unklar</li> <li>• Kompensation durch „Vermeidung von Wirkungen an anderer Stelle“ ist langfristig begrenzt</li> <li>• Mangel an standardisierten und verlässlichen Methoden zur Bewertung von Kompensationen</li> <li>• Langfristige Wirksamkeit von Kompensationen muss kontinuierlich beobachtet werden</li> <li>• Abhängigkeit von externen Anbietern und deren Fähigkeit zur effektiven Umsetzung von Kompensation</li> <li>• Einfluss des räumlichen und zeitlichen Abstands zwischen Wirkung und Kompensation unklar</li> </ul>
Opportunities - Chancen	Threats - Risiken
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stärkung der Marktposition durch das Angebot von Produkten mit kompensierten Wirkungen</li> <li>• Erweiterung des Portfolios durch Investitionen in innovative Kompensationsprojekte</li> <li>• Schaffung eines neuen Marktes für Kompensationen</li> <li>• Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung</li> <li>• Stärkere Kundenbindung durch Vertrauen in transparente und effektive Kompensationsmaßnahmen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gefahr der „Ablässmentalität“, bei der Unternehmen sich zu stark auf Kompensation verlassen und die negativen Auswirkungen nicht reduzieren</li> <li>• Relativierung negativer Auswirkungen</li> <li>• Wahrnehmung der Kompensation als „Greenwashing“</li> <li>• Möglicher Vertrauensverlust bei Konsumenten, wenn Kompensationsmaßnahmen nicht effektiv</li> <li>• Gefahr des Betrugs durch gefälschte oder ineffektive Kompensationsprojekte</li> </ul>

## 4 Defizite und Handlungsbedarf

Dieses Kapitel reflektiert den in Kapitel 3 präsentierten Stand der Forschung kritisch und soll die aktuellen Defizite im Forschungsgebiet der *Nachhaltigen Produktentstehung* anhand einer Bewertung aufzeigen (Kapitel 4.1). Im Anschluss an die Diskussion der Defizite wird in Kapitel 4.2 erneut auf die eingangs gestellten Forschungsfragen (Kapitel 1.2.2) eingegangen und aufgezeigt, an welchen Stellen dieser Arbeit deren Beantwortung erfolgt. Gemeinsam aus den Forschungsfragen und der Bewertung des Forschungsstands wird in Kapitel 4.3 ein Handlungsbedarf in Form von Anforderungen an das in dieser Arbeit vorgestellte Modell abgeleitet.

### 4.1 Bewertung des Stands der Forschung

Im Stand der Forschung dieser Arbeit werden zahlreiche Ansätze mit unterschiedlichen Zielsetzungen und Schwerpunkten beschrieben, wodurch ein breites Forschungsgebiet thematisiert wird. Innerhalb der einzelnen Teilgebiete der Analyse- und Synthesemethoden sowie den positiven Wirkungen existieren jeweils mehrere Reviews, Kritiken und Vorschläge für Weiterentwicklungen, die hier nicht umfassend diskutiert werden können. Daher werden die vorgestellten Ansätze in erster Linie hinsichtlich der für diese Arbeit relevanten **Bewertungskriterien** analysiert und bewertet. Die Bewertungskriterien setzen sich zum einen aus jenen Kriterien zusammen, die zur Klassifizierung des Forschungsstands aus der historischen Entwicklung der *Nachhaltigen Produktentstehung* abgeleitet wurden (Tabelle 3-2), und zum anderen aus einer Zusammensetzung verschiedener Grundsätze einzelner Methoden und Ansätze des Forschungsstands, wie beispielsweise [CrDR09, DIN21a, ISO02]. Die Kriterien werden im Folgenden einzeln erläutert.

- **Art der Aktivität:** In diesem Kriterium wird untersucht, ob und in welchem Maße die Methode Aktivitäten der **Analyse** und/oder der **Synthese** unterstützt.
- **Nachhaltigkeitsfokus:** Hier wird bewertet, ob und in welchem Maße die Methode die **ökologische**, die **soziale** und die **ökonomische Dimension** der Nachhaltigkeit sowie Aspekte der **Kreislaufwirtschaft** berücksichtigt.
- **Lebenszyklusbetrachtung:** Es wird analysiert, ob die Methode den gesamten oder nur Teile des Produktlebenszyklus behandelt.
- **Systembetrachtung:** Dieses Kriterium arbeitet heraus, ob und bis zu welchem Umfang die Methode aus System Sicht eine umfassende Betrachtung aller relevanten Teilsysteme, wie dem Geschäftsmodell und den beteiligten Stakeholdern, unternimmt.
- **Komplexität:** Der Methode wird in mehreren Stufen eine hohe bis niedrige Komplexität zugeordnet, um die Anwendbarkeit und den Umsetzungsaufwand zu bewerten.
- **Einsetzbarkeit im PEP:** In diesem Kriterium wird die Einsetzbarkeit der jeweiligen Methode entlang des PEP untersucht. Dabei wird die Möglichkeit zum Einsatz in den vier Hauptphasen **Planen und Klären der Aufgabe (Phase 1)**, **Konzipieren (Phase 2)**, **Entwerfen (Phase 3)** und **Ausarbeiten (Phase 4)** einzeln von hoch bis niedrig bewertet.

- **Kompensation und positive Wirkungen:** Hier wird eingeordnet, ob und in welchem Maße die Methode Kompensationen und positive Nachhaltigkeitswirkungen (Positive Impact (PI)) untersucht oder deren Entstehung fördert.

Die Bewertung anhand dieser Kriterien erfolgt jeweils in fünf Stufen von „voll erfüllt“ (●) bis „nicht erfüllt“ (○) bzw. von „hoch“ (●) bis „niedrig“ (○).

Die Bewertungskriterien werden nachfolgend auf die drei Teilgebiete Analyse (Kapitel 3.2), Synthese (Kapitel 3.3) und positive Wirkungen (Kapitel 3.4) einzeln angewendet und die Schlussfolgerungen daraus diskutiert. Es wird nur auf die näher vorgestellten Ansätze eingegangen, wobei aus Übersichtlichkeitsgründen auf eine Bewertung weiterführender Quellen verzichtet wird.

#### 4.1.1 Defizite der Analysemethoden

Zunächst werden die in Kapitel 3.2 vorgestellten Analysemethoden der *Nachhaltigen Produktentstehung* gemeinsam anhand der vorgestellten Kriterien bewertet. In Tabelle 4-1 sind die detailliert vorgestellten Methoden den jeweiligen Kapiteln dieser Arbeit zugeordnet und anhand der Bewertungskriterien aufgeführt, wodurch ein systematischer Vergleich der Methoden ermöglicht wird.

Es wird deutlich, dass die gewählten Methoden auf die **reine Analyse** von Nachhaltigkeitsaspekten ausgelegt sind und in der Regel keinen direkten Beitrag zu Syntheseaktivitäten leisten. Dabei kann der **Nachhaltigkeitsfokus stark variieren**, da der überwiegende Teil der Methoden auf einzelne Dimensionen der Nachhaltigkeit oder die Kreislauffähigkeit spezialisiert ist. Die ganzheitlichen Ansätze wie LCSA und C-LCSA decken durch die Kombination der Einzelmethode einen breiten Nachhaltigkeitsfokus ab. Die Einzelmethode werden dabei aber eher additiv kombiniert, wie das Schema „LCSA = LCA + LCC + SLCA“ [Klöp08] verdeutlicht. Es fehlt an einer **übergreifenden, integrierten Vorgehensweise**, die die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Methoden berücksichtigt und die einzelnen Aspekte stärker miteinander in Verbindung setzt [SMGD12, VBTS21]. Das Kriterium der **Lebenszyklusbetrachtung** gilt bei den meisten Ansätzen als wichtiger Grundsatz und wird folglich überwiegend erfüllt. Hierbei weisen jedoch einige der vereinfachten Ansätze zu Gunsten der Anwendbarkeit bestimmte Defizite auf. Eine ähnliche Beobachtung lässt sich bei der Bewertung der **Systembetrachtung** feststellen. Bei den lebenszyklusbasierten Methoden ist eine umfassende Systembetrachtung in der Regel der Fall, wohingegen vereinfachte Methoden nur auf bestimmte Teile des Systems eingehen und andere vernachlässigen. Indirekt spiegeln sich die beiden Kriterien auch in der **Komplexität** der Methoden wider. Je umfassender der Untersuchungsrahmen in Form von Lebenszyklus- und Systembetrachtung definiert wird, desto höher ist auch der Umsetzungsaufwand und damit die Komplexität. Die vereinfachten Methoden weisen erwartungsgemäß eine niedrige Komplexität auf, liefern jedoch auch ungenauere Ergebnisse. Bei der Auswahl von Analysemethoden lässt sich somit ein Zielkonflikt zwischen einfacher Anwendbarkeit und der Erzielung genauer sowie umfassender Ergebnisse feststellen. Betrachtet man die Einsetzbarkeit im PEP über die vier Hauptphasen, zeigt sich, dass die meisten Methoden erst spät im PEP eingesetzt werden können, also erst wenn das Produktsystem

größtenteils oder vollständig definiert ist. Auch Kammerl et al. [KSHW17] bestätigen diese **meist retrospektive Anwendung der Analyseverfahren**. Es ist evident, dass die Produkte zunächst vollständig im Rahmen des PEP definiert werden müssen, um eine umfassende Analyse und Bewertung ihrer Nachhaltigkeit zu ermöglichen [BhHM03, PCMP12]. Allerdings können dann keine Änderungen mehr zu Gunsten der Nachhaltigkeit umgesetzt werden, wie auch im Ecodesign-Paradoxon beschrieben [CLWS21]. Eine stärkere Integration der Analyseaktivitäten in die frühen PEP-Phasen ist daher notwendig [HMMM16]. Hier können die vereinfachten Methoden bereits teilweise entgegenwirken. Durch die eher qualitative Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten werden weniger genaue Spezifikationen des Produkts benötigt, wodurch eine frühe Bewertung, beispielsweise auf Konzeptebene, ermöglicht wird. Als Sonderfall können die Analysemethoden auf organisatorischer Ebene betrachtet werden, wie die ESRS [Euro23a]. Leiten sich auf Unternehmensebene hierauf basierende Ziele und Vorgaben ab, können diese als Maßstab für die Nachhaltigkeitsbewertung in sämtlichen Phasen des PEP dienen. Sie sind jedoch nicht produktspezifisch und stellen lediglich organisationspezifische Leitlinien dar. In den etablierten Analysemethoden steht die Betrachtung von **Kompensationen und positiven Wirkungen** nicht im Vordergrund und wird teilweise gänzlich ausgelassen. In der Regel werden die negativen Wirkungen fokussiert [KüSH22]. Es bestehen jedoch einzelne Ansätze zur Erweiterung der Methoden, um positive Wirkungen zu berücksichtigen [CrVe20, EkHG18, KüHa19, ShCY15, UBSL20].

Tabelle 4-1: Bewertung der Analysemethoden aus dem Stand der Forschung

Kapitel	Ansatz	Kriterien		Nachhaltigkeitsfokus						Einsetzbarkeit im PEP				Kompensation & PI	
		Art der Aktivität		ökologisch	sozial	ökonomisch	Kreislauffähigkeit	Lebenszyklusbetrachtung	Systembetrachtung	Komplexität	Phase 1	Phase 2	Phase 3		Phase 4
3.2.2	LCA	●	○	●	○	○	○	●	●	●	○	○	○	○	○
	EcoDesign-Checklist	●	○	●	○	○	○	●	●	●	○	○	○	○	○
	MET-Matrix	●	○	●	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○
	Datenbanken	●	○	●	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
3.2.3	S-LCA	●	○	○	●	○	○	●	●	●	○	○	○	○	○
	SA 8000	●	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Risikoanalyse	●	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3.2.4	LCC	●	○	○	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○
3.2.5	MCI	●	○	○	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○
	DIN 45550ff	●	○	○	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○
	ISO 59020	●	○	○	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○
3.2.6	LCSA	●	○	●	●	●	○	●	●	○	○	○	○	○	○
	C-LCSA	●	○	●	●	●	○	●	●	○	○	○	○	○	○
3.2.7	ESRS	●	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

● voll erfüllt / hoch    ◐ größtenteils erfüllt    ◑ teilweise erfüllt    ◒ wenig erfüllt    ○ nicht erfüllt / niedrig

Zusätzlich zu den in der Tabelle aufgezeigten Defiziten der vorgestellten Analysemethoden werden im Folgenden weitere **Schwachstellen** betrachtet, die in der **Literatur** thematisiert werden. Die **Verfügbarkeit von Daten** ist einer der wesentlichen Kritikpunkte im Rahmen der Nachhaltigkeitsanalyse [CIDr16, ZaPS13]. Zwar existieren mehrere Datenbanken, diese bieten jedoch nur generische Daten, die nicht immer für den jeweiligen Anwendungsfall zutreffend sind. Eine Erhebung von spezifischen Realdaten stellt hingegen einen erheblichen zusätzlichen Aufwand dar. Darüber hinaus fehlt bei ganzheitlichen Ansätzen wie LCSA eine **Standardisierung**, wie sie beispielsweise bei der Ökobilanz vorhanden ist [VBTS21]. In dem LCSA sollte auch die potenzielle Doppelzählung von Auswirkungen in mehreren Dimensionen vermieden werden [Bach13, CIDr16, Zama12]. Außerdem werden eine höhere **Transparenz** und bessere **Kommunikation** der Ergebnisse der mehrdimensionalen Analysen gefordert [VBTS21], um diese zum Beispiel nachvollziehbarer für Entscheidungsträger zu gestalten. Die Forderung nach mehr **praktischen Anwendungen** der Analysemethoden [CCJZ13, CIDr16] zielt darauf ab, ein besseres Verständnis der Methoden zu erreichen und eine Grundlage für bewährte Praktiken zu schaffen. Der hohe **Umsetzungsaufwand** und die Komplexität der Methoden könnte unter anderem durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz reduziert werden [OdOL21]. Im Bereich der ökonomischen Analysen wird kritisiert, dass Kosten aus **unterschiedlichen Perspektiven**, wie beispielsweise der des Herstellers und der des Endkunden, betrachtet werden müssen. Wie bereits in Kapitel 2.1.4 und 3.2.4 thematisiert fehlt außerdem der Bezug zwischen den Lebenszykluskosten und einer klaren Definition ökonomischer Nachhaltigkeit.

### **Zusammenfassung der Defizite**

Die wichtigsten Defizite im Bereich der Analysemethoden, die aus der Bewertung in Tabelle 4-1 und der Literatur identifiziert wurden, sind nachfolgend noch einmal zusammengefasst:

- Kein direkter Beitrag zu Syntheseaktivitäten
- Spezialisierte Methoden mit begrenztem Nachhaltigkeitsfokus
- Fehlende integrierte Vorgehensweise zur übergreifenden Berücksichtigung aller Nachhaltigkeitsaspekte
- Zielkonflikt zwischen einfacher Anwendbarkeit und der Erzielung umfassender Ergebnisse
- Einsetzbarkeit erfolgt meist retrospektiv nach dem PEP
- Unzureichende Betrachtung positiver Wirkungen
- Datenverfügbarkeit
- Fehlende Standardisierung
- Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse
- Keine Bewertung der ökonomischen Nachhaltigkeit

### 4.1.2 Defizite der Synthesemethoden

Die Synthesemethoden der *Nachhaltigen Produktentstehung*, die in Kapitel 3.3 eingehender vorgestellt wurden, werden in Tabelle 4-2 anhand der ausgewählten Bewertungskriterien untersucht. Die Spalten der Aktivitäten zeigen kongruent zur Bewertung der Analysemethoden, dass auch hier eine **Kombination beider Arten** nur in wenigen Fällen vorhanden ist. So beinhalten die ganzheitlichen Ansätze aus Kapitel 3.3.6 zum Teil auch die Analyse von Nachhaltigkeitsaspekten in den vorgeschlagenen Entwicklungsprozessen. Wiederum haben die meisten Methoden einen sehr spezifischen **Nachhaltigkeitsfokus**, wobei die anderen Dimensionen oder die Kreislauffähigkeit meist vernachlässigt werden [AWTW18]. Eine gleichwertige und umfassende Betrachtung wird auch von den ganzheitlichen Ansätzen nicht vollständig erfüllt. Hier steht die ökologische Dimension nach wie vor im Vordergrund (vergleiche Kapitel 3.1). Im überwiegenden Teil der Methoden werden die **Lebenszyklus- und Systembetrachtung** als wichtige Grundsätze beschrieben und konsequent verfolgt [AWTW18]. Analog zu den Analysemethoden werden zur Vereinfachung der Methoden hier ebenfalls Defizite akzeptiert, wie beispielsweise bei den „Ten Golden Rules“ [LuLa06] zu sehen. Die Komplexität der Methoden variiert dabei stark in der Bewertung. Es liegt nahe, dass ganzheitliche Ansätze mit einem umfassenden Nachhaltigkeitsfokus einen erhöhten **Umsetzungsaufwand** erfordern. Dies lässt sich durch die zusätzlichen Randbedingungen im PEP, die zum Beispiel durch ökologische und soziale Ziele entstehen, erklären. Im Gegensatz dazu stehen erneut die vereinfachten Methoden. Die **Einsetzbarkeit** von Synthesemethoden im PEP ist grundsätzlich deutlich höher als bei Analysemethoden, da diese Methoden zur Integration im PEP entwickelt wurden oder gar einen eigenständigen PEP darstellen und somit über alle Phasen hinweg angewendet werden können. Es ist jedoch anzumerken, dass viele der Methoden gegen Ende des PEP nicht mehr effektiv eingesetzt werden können, da hier bereits viele Produkteigenschaften festgelegt sind und die Einflussmöglichkeit fehlt (vergleiche Ecodesign-Paradoxon [CLWS21]). Die Berücksichtigung von **Kompensationen und positiven Wirkungen** wird auch bei den klassischen Synthesemethoden der *Nachhaltigen Produktentstehung* nicht ausreichend erfüllt. Durch den Fokus auf die Vermeidung negativer Auswirkungen durch **Effizienzansätze** in diesen Synthesemethoden fehlt eine klare Zielsetzung bezüglich der Nachhaltigkeit des entwickelten Produktsystems. Durch die aktuellen Methoden können Produktsysteme zwar „weniger schlecht“ gestaltet werden, aber inwiefern diese wirklich ganzheitlich nachhaltig sind, bleibt offen.

Tabelle 4-2: Bewertung der Synthesemethoden aus dem Stand der Forschung

Kapitel	Kriterien Ansatz	Art der Aktivität		Nachhaltigkeitsfokus				Lebenszyklusbetrachtung	Systembetrachtung	Komplexität	Einsetzbarkeit im PEP				Kompensation & PI
		Analyse	Synthese	ökologisch	sozial	ökonomisch	Kreislauffähigkeit				Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	
3.3.2	EcoDesign	○	●	●	○	○	◐	●	◐	◐	●	●	●	◐	○
	Bionik	◐	●	◐	○	◐	○	○	○	◐	◐	●	●	◐	○
	Ten Golden Rules	○	●	●	○	○	◐	◐	◐	○	●	●	●	◐	○
3.3.3	DfBoP	○	●	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐	●	●	◐	◐	◐
	Design für Alle	○	●	○	●	○	○	○	○	◐	●	●	◐	◐	◐
3.3.4	Target Costing	◐	●	○	○	●	◐	●	◐	◐	●	◐	◐	◐	○
	Phasenmodell	○	●	◐	◐	●	◐	◐	◐	◐	●	◐	◐	○	○
	TLBMC	◐	●	●	●	●	◐	◐	◐	◐	●	◐	◐	○	◐
	PSS	○	●	◐	◐	●	●	●	●	◐	●	●	◐	◐	○
3.3.5	DIN EN 45560	○	●	◐	○	◐	●	●	●	●	●	●	●	◐	○
	C2C-Design	○	●	●	○	○	●	●	◐	◐	◐	●	●	◐	◐
	CBMT	◐	●	◐	○	●	●	◐	◐	◐	●	◐	◐	○	○
	Morph. Kasten CEBM	○	●	◐	○	●	●	◐	◐	◐	◐	●	◐	○	○
3.3.6	D4S	◐	●	●	◐	◐	●	●	●	●	●	●	●	●	○
	WSD	◐	●	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐	●	●	●	●	○
	ISED	◐	●	●	●	◐	◐	●	●	●	●	●	●	●	○
	LCE	◐	●	●	◐	◐	◐	●	●	◐	●	●	●	●	○

● voll erfüllt / hoch    ◐ größtenteils erfüllt    ◑ teilweise erfüllt    ◒ wenig erfüllt    ○ nicht erfüllt / niedrig

Zusätzlich können auch bei den Synthesemethoden weitere **Schwachstellen aus der Literatur** und Reviews des Forschungsstands abgeleitet werden. So bemängeln Ahmad et al. [AWTW18] die **inkonsistente Nomenklatur** der Ansätze, wobei zahlreiche Ansätze nur eine der Dimensionen betrachten, ihre Benennung jedoch eine ganzheitliche Vorgehensweise impliziert. Die Autoren stellen außerdem fest, dass die meisten Ansätze nur als konzeptionelle Rahmenwerke existieren, die **Wechselwirkungen** der Nachhaltigkeitsdimensionen unzureichend berücksichtigt werden und die multidisziplinären Ansätze auch zusätzliche Herausforderungen im PEP hervorrufen können [AWTW18]. Gagnon et al. [GaLS12] betonen außerdem die Relevanz des Einsatzes von Methoden, die **heterodoxes und kreatives Denken** unterstützen, um neue nachhaltige Lösungen zu finden. Außerdem kann festgestellt werden, dass Synthesemethoden oft unterschiedliche Innovationslevel im Bereich der Nachhaltigkeit anstreben [CeGa16], etwa auf Produktebene, Geschäftsmodellebene oder auf sozio-technischer Ebene. Die Betrachtung einer Kombination unterschiedlicher Innovationslevel könnte hierbei vorteilhaft sein [CeGa16]. Insbesondere zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit von Produktsystemen, sollte das **Geschäftsmodell** im

Entstehungsprozess integriert werden [FGAH21]. Hauschild et al. [HaHK17] betonen die Notwendigkeit, die bestehenden Methoden stärker auf das Konzept der **absoluten Nachhaltigkeit** auszurichten. Weiter sollten grundlegendere Funktions- oder Systeminnovation unterstützt werden, um den Fokus auf Effizienzansätze mehr in Richtung der Ansätze zur Öko-Effektivität zu verschieben [HaKR20].

### **Zusammenfassung der Defizite**

Auch hier werden die wichtigsten Defizite im Bereich der Synthesemethoden kompakt zusammengefasst:

- Unzureichende Integration von Analyseaktivitäten im PEP
- Kein ganzheitlicher und ausgewogener Nachhaltigkeitsfokus
- Unzureichende Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen den Dimensionen
- Hoher Umsetzungsaufwand ganzheitlicher Ansätze
- Unzureichende Ausrichtung auf positive Wirkungen
- Fehlende Unterstützung des heterodoxen und kreativen Denkens
- Unterschiedliche Ausrichtung auf Innovationslevel
- Vernachlässigung der Systemsicht und des Geschäftsmodells
- Unzureichende Ausrichtung auf absolute Nachhaltigkeit und öko-effektive Lösungen

#### **4.1.3 Defizite im Bereich der positiven Nachhaltigkeitswirkungen**

Der in Kapitel 3.4 beschriebene Stand der Forschung im Bereich der positiven Nachhaltigkeitswirkungen und Kompensationsmaßnahmen stellt das jüngste der drei Teilgebiete dar und ist dementsprechend nur im geringen Umfang Gegenstand von Untersuchungen [DiSB22]. Die ausgewählten Ansätze sind in Tabelle 4-3 gemeinsam mit den bekannten Bewertungskriterien dargestellt. Die **Analysemethoden** sind hier **stärker ausgeprägt** als die Ansätze zur Synthese von positiven Wirkungen und Kompensationen. Mit Ausnahme der Positivfabrik [Geb122], welche auf die Gestaltung einer Fabrik und nicht eines Produkts abzielt, konnten keine Ansätze identifiziert werden, die die Entstehung positiver Wirkungen durch Produkte im Sinne einer Synthesemethode systematisch fördern. Der **Nachhaltigkeitsfokus** wird vor allem in der ökologischen Dimension partiell abgedeckt. Es gibt zwar vielfältige Untersuchungen und praktische Maßnahmen zur Kompensation von Treibhausgasemissionen, jedoch mangelt es an einer umfassenden Berücksichtigung der **übrigen Wirkungskategorien** oder an **effektiven wirkungsgerechten Kompensationen**, wie beispielhaft am CEC-Approach deutlich wird. Die SWOT-Analyse in Kapitel 3.4.7 zeigt weitere aktuelle Vor- und Nachteile von Kompensationen auf. Die soziale Dimension bietet bisher nur wenige Ansätze, wohingegen in der ökonomischen Dimension lediglich die Kosten untersucht werden und keine direkten positiven Wirkungen identifiziert werden konnten. Ebenso werden die positiven Wirkungen im Bereich der Kreislauffähigkeit bisher nicht explizit erforscht oder wissenschaftlich klar definiert. Die ganzheitlichen Ansätze berücksichtigen einerseits einen größeren Nachhaltigkeitsfokus, stellen aber andererseits eher **konzeptionelle Rahmenwerke oder**

**Zertifizierungsansätze** dar. Die **Lebenszyklusbetrachtung** wird überwiegend erfüllt, da viele Ansätze die Grundsätze der lebenszyklusbasierten Analysemethoden verwenden. Seltener findet hingegen eine vollumfängliche **Systembetrachtung** statt. Grund hierfür könnten die zusätzlichen Maßnahmen und Projekte sein, die zwangsläufig zur mehr Wirkbereichen führen [Norr17]. Die **Komplexität** ist aufgrund der meist nicht ganzheitlichen Betrachtungsweise als eher gering einzustufen. Es ist naheliegend, dass durch die **fehlenden Syntheseansätze** eine Integration im PEP bisher kaum erreicht wird. Die Analyse oder die darauffolgenden Kompensationen werden in der Regel erst am Ende des PEP retrospektiv umgesetzt. Daher lässt sich zusammenfassen, dass positive Wirkungen im Rahmen der untersuchten Methoden und Ansätze aktuell im Forschungsgebiet der *Nachhaltigen Produktentstehung* nicht in voller Effektivität integriert werden und somit hier mehr Potenzial ausgeschöpft werden könnte.

**Tabelle 4-3: Bewertung der Ansätze für positive Wirkungen aus dem Stand der Forschung**

Kapitel	Kriterien Ansatz	Art der Aktivität		Nachhaltigkeitsfokus				Lebenszyklusbetrachtung	Systembetrachtung	Komplexität	Einsetzbarkeit im PEP				Kompensation & PI
		Analyse	Synthese	ökologisch	sozial	ökonomisch	Kreislauffähigkeit				Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	
3.4.2	THG-Kompensation	●	◐	◐	○	○	○	●	◐	◐	○	○	○	◐	●
	Andere Kompensation	●	◐	◐	○	○	◐	●	◐	◐	○	○	○	◐	◐
	CEC-Approach	●	◐	●	○	◐	◐	●	◐	◐	○	○	○	◐	◐
3.4.3	Social Handprints	○	◐	◐	●	◐	○	○	◐	◐	○	○	○	◐	◐
3.4.4	ökonomisch	◐	○	○	○	◐	○	◐	○	◐	○	○	○	◐	○
3.4.5	Kreislauffähigkeit	◐	◐	◐	○	○	●	◐	◐	◐	○	◐	◐	◐	◐
3.4.6	SHINE	●	◐	●	●	◐	○	●	●	●	○	○	○	◐	●
	LPC	●	○	●	●	○	◐	●	◐	◐	○	○	○	◐	◐
	Handabdruck	●	○	●	●	◐	◐	●	●	◐	○	○	○	◐	◐
	Positivfabrik	◐	●	●	●	◐	◐	◐	●	●	○	○	○	◐	●

● voll erfüllt / hoch    ◐ größtenteils erfüllt    ◑ teilweise erfüllt    ◒ wenig erfüllt    ○ nicht erfüllt / niedrig

Die in der **Literatur vorliegenden Erkenntnisse** bestätigen die in Tabelle 4-3 dargestellten Beobachtungen und betonen die Notwendigkeit einer vertieften **Untersuchung der theoretischen Grundlagen** [DiSB22]. Darüber hinaus bedarf es einer **Operationalisierung**, um die Entscheidungsprozesse für positive Nachhaltigkeitsbeiträge zu unterstützen und zu evaluieren, inwiefern diese Beiträge tatsächlich als positiv bewertet werden können [DiSB22]. Hierfür müssen entsprechende Grundsätze und **Anforderungen an Kompensationen** erarbeitet werden, die die Effektivität der Maßnahmen sicherstellen. Gebler et al. fordern außerdem eine weitergehende Integration der Ansätze für positive Wirkungen auch in die **Managementprozesse** und sehen mögliche methodische Herausforderungen durch den multisystemischen Charakter des Themas [GJTC22].

In Anlehnung an die Autoren sollte die zukünftige Forschung auf die **Entwicklung von Bewertungsmethoden, Designstrategien und Geschäftsmodellen** zur Förderung positiver Nachhaltigkeitswirkungen ausgerichtet sein [GJTC22]. Norris thematisiert das Problem der **inakzeptablen irreversiblen Auswirkungen**, die in einem netto-positiven Unternehmen bzw. System gänzlich vermieden werden sollten [Norr17]. Das Konzept der Positivfabrik könnte im Sinne „einer ganzheitlichen Nachhaltigkeitsvision für „positive Produkte aus positiven Fabriken““ [Geb12] um eine Produktsicht erweitert werden.

### ***Zusammenfassung der Defizite***

Die wesentlichen Defizite im Bereich der Kompensationen und positiven Nachhaltigkeitswirkungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Unzureichende theoretische Grundlagen im Bereich der Analyse
- Unzureichende theoretische Grundlagen im Bereich der Synthese
- Fehlende Grundsätze und Rahmenbedingungen für effektive Kompensationen
- Erweiterung auf alle Dimensionen und Wirkungskategorien notwendig
- Unzureichende Integration in den PEP
- Integration der Geschäftsmodellsicht notwendig
- Umgang mit irreversiblen negativen Auswirkungen nicht ausreichend definiert
- Produktsicht nicht ausreichend untersucht

## 4.2 Forschungsfragen

An dieser Stelle werden die in Kapitel 1.2.2 formulierten Forschungsfragen erneut aufgegriffen. Durch die Beschreibung und Bewertung des aktuellen Forschungsstands lassen sich bereits erste Teilaspekte dieser Fragen beantworten. Darüber hinaus wird hier dargelegt, in welchen der folgenden Kapitel die noch offenen Fragen behandelt werden, wodurch eine klare Zuordnung der jeweiligen Fragen zu den entsprechenden Abschnitten der Arbeit möglich ist. Dies erfolgt für die vier Forschungsfragen jeweils separat.

### **1.) Wie können Produktsysteme so gestaltet werden, dass sie positive Nachhaltigkeitswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft haben?**

Die erste Frage stellt die Hauptforschungsfrage dieser Arbeit dar und definiert zugleich deren Gesamtziel. Die Beantwortung dieser zentralen Frage erfolgt durch die Vorstellung des sogenannten PIPE-Modells in Kapitel 5, das als Produktentstehungsmodell für die Gestaltung von Produktsystemen mit netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen dient. In Kapitel 6 wird dieses Modell anhand zweier Fallstudien praktisch veranschaulicht, um die Umsetzbarkeit des Ansatzes zu demonstrieren. In der anschließenden Diskussion in Kapitel 7.3 wird die Forschungsfrage abschließend umfassend beantwortet, indem die Erkenntnisse aus dem Fallbeispiel kritisch reflektiert und im Kontext des Modells bewertet werden. Eine Herleitung und Beschreibung der Anforderungen an das PIPE-Modell, die für die Beantwortung der Frage von grundlegender Bedeutung sind, erfolgen in Kapitel 4.3.

Die übergreifende Forschungsfrage unterteilt sich in diese Unterfragen, die nachfolgend besprochen werden.

### **2.) Wie lässt sich die Nachhaltigkeitswirkung von Produktsystemen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft bestimmen?**

Die zweite Forschungsfrage lässt sich bereits an dieser Stelle angemessen beantworten. Die in Kapitel 3.2 vorgestellten Analysemethoden bieten vielseitige Ansätze und Richtlinien, um die Nachhaltigkeitswirkungen in den jeweiligen Dimensionen gesondert und auch ganzheitlich zu bestimmen. Zusätzlich stehen Rahmenwerke aus Kapitel 3.4 zur Verfügung, die speziell auf die Bestimmung positiver Nachhaltigkeitswirkungen abzielen. Auch wenn in beiden Teilgebieten im Rahmen der Bewertung des Stands der Forschung noch Defizite aufgedeckt werden konnten (Kapitel 4.1.1 und 4.1.3), bieten die vorgestellten Methoden eine adäquate Grundlage, um die Nachhaltigkeitswirkung von Produktsystemen zu bestimmen und diese effektiv im präsentierten PIPE-Modell zu integrieren.

### **3.) Wie können (netto-)positive Nachhaltigkeitswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft durch Produktsysteme entstehen?**

In Kapitel 3.4 werden diverse Kompensationsmaßnahmen und Projekte zur Generierung von Handabdrücken mit positiven Nachhaltigkeitswirkungen in den verschiedenen Dimensionen und Wirkungskategorien beschrieben. Durch die Umsetzung solcher Maßnahmen innerhalb des Produktsystems, können unter gewissen Umständen (Anforderungen Kapitel 4.3) netto-positive Nachhaltigkeitswirkungen entstehen. Die Bewertung dieser Ansätze und Maßnahmen (Kapitel 4.1.3) hat in diesem Bereich einen weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufgedeckt. Dennoch können durch die vorgestellten Maßnahmen in einem großen Wirkungsbereich netto-positive Bilanzen erzeugt werden, auf welchen sich das vorgestellte PIPE-Modell konzentriert. Als weitere Möglichkeit können inhärente positive Eigenschaften des Produktsystems, wie beispielsweise durch dessen Funktionalität selbst, zusätzliche positive Nachhaltigkeitswirkungen erzeugt werden. Diese Alternative wird näher im Rahmen des Modells (Kapitel 5.3.2) vorgestellt. Somit stehen durch die inhärenten positiven Eigenschaften des Produktsystems und die zusätzlichen Kompensationsmaßnahmen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung, wie positive Nachhaltigkeitswirkungen durch Produktsysteme entstehen können.

### **4.) Wie lässt sich die Entstehung positiver Nachhaltigkeitswirkungen in den Produktentstehungsprozess integrieren?**

Die Defizite im Bereich der Synthesemethoden (Kapitel 4.1.2) und der positiven Nachhaltigkeitswirkungen (Kapitel 4.1.3) verdeutlichen, dass die Entstehung positiver Wirkungen bisher nicht oder nur unzureichend in den PEP integriert wurde. Daher wird die Entwicklung eines neuartigen und übergreifenden Produktentstehungsmodells notwendig, das in Kapitel 5 vorgestellt wird. Ein solches Modell könnte ähnlich zu den in Kapitel 3.3.6 vorgestellten ganzheitlichen Synthesemethoden, wie dem D4S [CrDR09], dem WSD [SSHD09] oder dem ISDEP [GaLS12], aufgebaut werden und diese Ansätze entsprechend erweitern. Innerhalb dieses Modells wird eine systematische Vorgehensweise benötigt, die von Beginn des PEP an die Zielsetzung der Netto-Positivität des zu entwickelnden Produktsystems konsequent verfolgt und über den gesamten PEP hinweg schrittweise umsetzt. Dazu sollten in einem iterativen Ansatz die vorgestellten Methoden miteinander kombiniert werden. Die Analysemethoden (Kapitel 3.2) unterstützen die Messung und Bewertung der Auswirkungen des Produktsystems, die Synthesemethoden (Kapitel 3.3) fördern die Generierung nachhaltiger Lösungen und die Ansätze im Bereich der positiven Nachhaltigkeitswirkungen (Kapitel 3.4) ermöglichen die netto-positiven Wirkungsbilanzen in den verschiedenen Dimensionen und im Rahmen der Kreislauffähigkeit. Die genaueren Anforderungen, die zur Gestaltung positiver Nachhaltigkeitswirkungen im PEP notwendig sind, werden im Folgekapitel 4.3 formuliert.

### 4.3 Anforderungen an das Produktentstehungsmodell

Aus den Defiziten des aktuellen Forschungsstand und der partiellen Beantwortung der Forschungsfragen dieser Arbeit kann ein entsprechender Handlungsbedarf abgeleitet werden. Wie insbesondere Forschungsfrage 1.) und 4.) verdeutlichen, besteht dieser vorrangig in der Entwicklung und Beschreibung eines neuartigen Produktentstehungsmodells. Dieses soll in der Lage sein Produktentwickler und Unternehmen systematisch bei der Gestaltung und Erzeugung nachhaltiger Produktsysteme mit netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen zu unterstützen. Wie in Abbildung 4-1 dargestellt, besteht das benötigte **Produktentstehungsmodell** folglich aus einem **PEP** und einem **Produktsystem**, vergleichbar zum in Kapitel 3.3.6 vorgestellten ISEDP. Um den Handlungsbedarf genauer zu beschreiben, werden im Folgenden detaillierte **Anforderungen** beschrieben. Analog zum Aufbau des Modells lassen sich diese in zwei Bereiche aufteilen (Abbildung 4-1). Zunächst werden die Anforderungen an das zu entwickelnde Produktsystem erarbeitet (Tabelle 4-4). Hierdurch wird das gewünschte Ergebnis des zu entwickelnden PEP beschrieben und somit die Zielsetzungen des Modells klarer formuliert. Darauf aufbauend folgen die separaten Anforderungen an den PEP (Tabelle 4-5), der ein solches Produktsystem erzeugen soll. In beiden Tabellen werden die einzelnen Anforderungen mit entsprechenden Quellen referenziert, die die jeweilige Anforderung bereits selbst erfüllen oder fordern. Dabei wird auf Literaturquellen sowie Teile dieser Arbeit verwiesen.

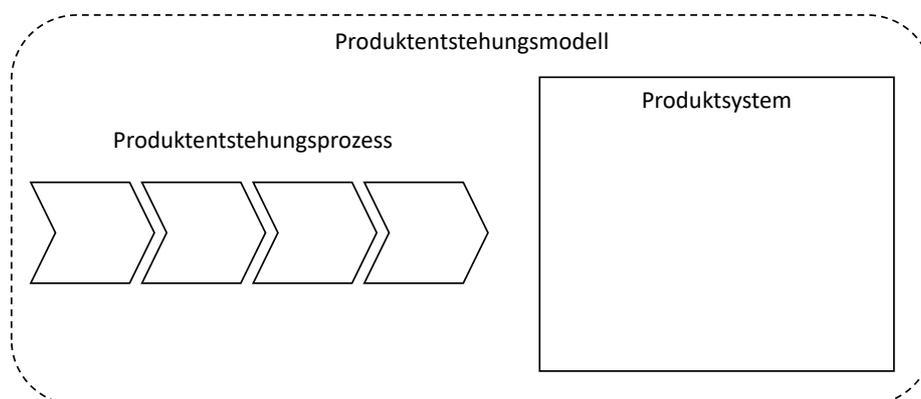


Abbildung 4-1: Produktentstehungsmodell bestehend aus Produktentstehungsprozess und Produktsystem

#### **Anforderungen an das zu entwickelnde Produktsystem**

Das Produktsystem, das im Rahmen des geforderten Produktentstehungsmodells durch den PEP generiert werden soll, muss mehrere Anforderungen erfüllen. Diese sind in Tabelle 4-4 zu drei Hauptanforderungen zusammengefasst, welche durch Subanforderungen ergänzt werden. Zunächst soll das **Produktsystem ganzheitlich durch den PEP definiert** werden, um einen Überblick über alle relevanten Bestandteile und Nachhaltigkeitswirkungen bestimmen zu können. Dies bedeutet, dass der gesamte Produktlebenszyklus, einschließlich der erforderlichen Lieferketten und Wertströme, abgedeckt werden muss. Weiterhin sollen alle involvierten Stakeholder berücksichtigt werden, das zugrunde liegende Geschäftsmodell einbezogen und alle relevanten Subsysteme

integriert werden. Außerdem muss das Produktsystem eine **netto-positive Nachhaltigkeitswirkung** in den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit aufweisen. Hierfür ist zunächst eine umfassende Analyse des ganzheitlich definierten Produktsystems erforderlich, die sicherstellt, dass alle Nachhaltigkeitswirkungen, sowohl positiver als auch negativer Art, vollständig bekannt sind. Es dürfen keine negativen Auswirkungen auftreten, die zu irreversiblen Schäden führen und somit nicht kompensiert werden können, da dies eine netto-positive Wirkungsbilanz verhindert werden würde. In Fällen, in denen reversible negative Auswirkungen identifiziert werden, sind diese so zu bilanzieren, dass gegebenenfalls durch positive Auswirkungen von Kompensationsmaßnahmen eine netto-positive Nachhaltigkeitsbilanz in jeder betroffenen Wirkungskategorie erreicht wird. Letztlich soll das Produktsystem so gestaltet sein, dass seine Nachhaltigkeit auch für einen fachfremden **Endkunden leicht nachvollziehbar** ist.

**Tabelle 4-4: Anforderungen an das zu entwickelnde Produktsystem**

Nr.	Anforderung	Referenzquellen
	Das Produktsystem soll...	
1.	ganzheitlich durch den PEP definiert werden.	[HaHK17, Herr10, Klöp08, OKHC17]
1.1	den gesamten Produktlebenszyklus inklusive der benötigten Lieferketten und Wertströme beinhalten.	[DIN21a, ISO02]
1.2	alle involvierten Stakeholder berücksichtigen.	[ISO24c, UBSL20]
1.3	das Geschäftsmodell miteinbeziehen.	[FGAH21, RRBZ10]
1.4	alle relevanten Subsysteme inkludieren.	[CeGa16]
2.	eine netto-positive Nachhaltigkeitswirkung in den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit aufzeigen.	[Norr17, ShCY15]
2.1	so analysiert sein, dass alle ökologischen, sozialen und ökonomischen Nachhaltigkeitswirkungen sowie Aspekte der Kreislauffähigkeit, positiver wie negativer Art, vollständig bekannt sind.	[Klöp08, KüSH22]
2.2	keine negativen Auswirkungen aufweisen, die zu irreversiblen Schäden führen.	Kapitel 3.4.2 und [Norr17]
2.3	die Nachhaltigkeitswirkungen derart bilanzieren, dass (falls notwendig durch Kompensationsmaßnahmen) eine netto-positive Nachhaltigkeitsbilanz in jeder Wirkungskategorie, in der reversible negative Auswirkungen auftreten, entsteht.	[AiLB15, Geb122] Abbildung 3-32
3.	so gestaltet sein, dass die Nachhaltigkeit des Systems für den Endkunden einfach nachvollziehbar ist.	[ISO01]

### **Anforderungen an den Produktentstehungsprozess**

An den zweiten Teil des Produktentstehungsmodells, dem PEP, werden ebenso Anforderungen gestellt, die in Tabelle 4-5 zusammengefasst und durch Referenzquellen fundiert sind. Diese Anforderungen haben einen starken Bezug zur Forschungsfrage 4.) und deren Beantwortung. Zuerst wird gefordert, dass der PEP eine kontinuierliche Integration von **Analyse- und Syntheseaktivitäten** im Vorgehensmodell vorsieht, um eine iterative Verbesserung der Nachhaltigkeit des Produktsystems sicherzustellen. Um die ganzheitliche Definition des Produktsystems zu erreichen, ist auch im PEP eine **ganzheitliche Herangehensweise** erforderlich, die sowohl ökologische,

soziale und ökonomische Aspekte als auch die Aspekte der Kreislaufwirtschaft umfassend einbezieht. Damit muss ebenso der gesamte Produktlebenszyklus berücksichtigt werden, während gleichzeitig alle relevanten, mit dem Produkt verbundenen Systeme, Stakeholder und das Geschäftsmodell in die Entwicklung integriert werden. Eine breite Akzeptanz und gute Anwendbarkeit in der Praxis erfordern eine **strukturierte Darstellung des PEP in generischer Form**. Dies beinhaltet eine klare Vorgehensweise mit vordefinierten Zwischenzielen sowie die Integration der vier Hauptphasen „Planen und Klären der Aufgabe“, „Konzipieren“, „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“. Der Prozess sollte sowohl für Neuentwicklungen als auch für Produktgenerationsentwicklungen geeignet sein. Er soll außerdem die Entscheidungsfindung unterstützen, um nachhaltige Lösungen mit netto-positiven Auswirkungen zu generieren. Als Unterstützung hierbei dienen geeignete Methoden, welche in den verschiedenen Phasen des PEP bereitgestellt werden. Da zur Umsetzung des PEP und zur Erzeugung eines netto-positiven Produktsystems viele Disziplinen und Fachbereiche zusammenarbeiten müssen, sollte die Interdisziplinarität durch das Konzept des PEP gefördert werden. Wie eingangs erwähnt, ist das **angestrebte Ergebnis des PEP ein netto-positives Produktsystem**, wie es zuvor und in Tabelle 4-4 beschrieben wird. Der Prozess legt dabei von Beginn an den Fokus auf die Nachhaltigkeit und die Erzielung positiver Wirkungen. Hierzu zählt ebenfalls die Entwicklungsaufgabe in Bezug auf diese Ziele bei Bedarf kritisch zu hinterfragen, um den Lösungsraum nicht schon zu Beginn des PEP zu stark einzuschränken. Mit der Formulierung der Anforderungen an das in dieser Arbeit zu entwickelnde Produktentstehungsmodell ist in Kombination mit den Grundlagen (Kapitel 2) und der Beschreibung des Stands der Forschung (Kapitel 3) nach dem Vorgehen der DRM (Kapitel 1.3) nun die „Deskriptive Studie I“ komplettiert und damit alle Voraussetzungen geschaffen, um das Modell im folgenden Kapitel 5 ausführlich zu beschreiben

Tabelle 4-5: Anforderungen an den Produktentstehungsprozess

Nr.	Anforderung	Referenzquellen
	Das Produktentstehungsprozess soll...	
1.	sowohl Analyse-, als auch Syntheseaktivitäten im Vorgehensmodell kontinuierlich integrieren.	[ChCh12, MBLC07, RRBZ10, Ruck17]
1.1	als iterativer Prozess zur kontinuierlichen Verbesserung der Nachhaltigkeit des Produktsystems beitragen.	[VDI19a, VDI19b]
2.	eine ganzheitliche Herangehensweise aufzeigen.	[HaHK17, Herr10, Klöp08, OKHC17]
2.1	die ökologischen Aspekte betrachten.	[AWTW18, DIN21a, DIN21c]
2.2	die sozialen Aspekte betrachten.	[AWTW18, ISO24c, UBSL20]
2.3	die ökonomischen Aspekte betrachten.	[AWTW18, CHKS11, EKLM14]
2.4	die Aspekte der Kreislaufwirtschaft betrachten.	[DiRB22, DSRB21, LuTC23]
2.5	durch die Lebenszyklusbetrachtung den gesamten Produktlebenszyklus miteinbeziehen.	[ChCh12, DIN21a, ISO02, Mazz20]
2.6	durch die Systembetrachtung alle relevanten, mit dem Produkt verbundenen Systeme, Stakeholder und das Geschäftsmodell berücksichtigen.	[CeGa16, DIN21a, RRBZ10]
3.	einen strukturierten PEP in generischer Form darstellen.	[PaBe77, PBF07, BeGe21, VDI19a]
3.1	eine nachvollziehbare Vorgehensweise mit klaren Zwischenzielen aufzeigen.	[ARBR16, UnCD07, VDI19a, VDI19b]
3.2	mindestens die vier Phasen „Planen und Klären der Aufgabe“, „Konzipieren“, „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“ umfassen.	[PaBe77, PBF07, BeGe21]
3.3	sowohl auf Neuentwicklungen als auf Produktgenerationsentwicklungen anwendbar sein.	[ARBR16, UnCD07]
3.4	bei der Entscheidungsfindung unterstützen.	[AKSB20, BNSL15, OKT216]
3.5	eine Hilfestellung zur Auswahl passender Methoden leisten.	[ANNJ14, BHBL17, BKHL14]
3.6	Interdisziplinarität in der Entwicklung fördern.	[EiAS12, LPLH23, SKBV18, Vajn14]
4.	soll als Ergebnis ein netto-positives Produktsystem generieren, wie es in Tabelle 4-4 beschrieben ist.	Tabelle 4-4
4.1	dabei unterstützen die Nachhaltigkeit und positive Wirkungen von Beginn an zu fokussieren und die Entwicklungsaufgabe diesbezüglich kritisch hinterfragen.	[AWTW18, CLWS21, Cucu16, ISO02, KeMe93]



## 5 PIPE-Modell

In diesem Kapitel wird die „Präskriptive Studie“ gemäß der in Kapitel 1.3 beschriebenen DRM-Vorgehensweise vorgestellt. Diese umfasst die Entwicklung des Produktentstehungsmodells „**Positive Impact Product Engineering (PIPE)**“, welches auf Grundlage der in Kapitel 4.3 definierten Anforderungen im Rahmen dieser Arbeit erarbeitet wurde. Wie in Abbildung 4-1 dargestellt, besteht das Modell aus einem Produktentstehungsprozess, dem PIPE-PEP, und einem Produktsystem, dem **Positive Impact Product System (PIPS)**. Um das umfangreiche Modell nachvollziehbar zu beschreiben, ist das Kapitel in mehrere Unterkapitel gegliedert. Zunächst werden die übergreifenden Ziele und die Einordnung des Modells behandelt sowie die Vorgehensweise bei dessen Herleitung erläutert (Kapitel 5.1). Anschließend folgt ein Überblick über den Aufbau und die wesentlichen Bestandteile des PIPE-Modells (Kapitel 5.2). Daraufhin wird das angestrebte Ergebnis in Form des Produktsystems detailliert beschrieben (Kapitel 5.3). Im Anschluss wird das Kernelement der Optimierungsschleife erläutert (Kapitel 5.4), gefolgt von einer detaillierten Darstellung der vier Phasen des PIPE-PEP (Kapitel 5.5). Die Vorstellung des generischen Modells erfolgt dabei in diesem Kapitel auf allgemeingültige und theoretische Weise. Das darauffolgende Kapitel 6 bietet ergänzend einen Überblick über die praktische Anwendung von PIPE anhand eines Produktbeispiels zur besseren Veranschaulichung. Um die Benennungen im Rahmen des Modells konsistent mit den Publikationen in englischer Sprache [MNMV22, MöVi23] zu halten, werden die Bezeichnungen teilweise in Englisch belassen.

### 5.1 Ziele, Einordnung und Herleitung des Modells

Das übergreifende Ziel des PIPE-Modells besteht darin, für Produktentwickler und Unternehmen ein generisches Produktentstehungsmodell zur Entwicklung von Produktsystemen mit netto-positiver Nachhaltigkeitswirkung bereitzustellen. Die in Kapitel 4 dargestellten Defizite des aktuellen Forschungsstandes und der daraus resultierende Handlungsbedarf verdeutlichen die Dringlichkeit für neuartige, visionäre Ansätze zur Entwicklung ganzheitlich nachhaltiger und öko-effektiver Produkte. Um hierbei möglichst nachhaltige Produktsysteme zu erreichen, wurde PIPE nach dem sogenannten **Backcasting-Ansatz** [Robi03, Robi90] erarbeitet. Dieser Ansatz eignet sich dazu, besonders revolutionär und visionär zu denken, und unterscheidet sich vom sonst üblichen Denkansatz des Forecasting [Holm98, MSGH17]. Die Unterscheidung zwischen beiden Ansätzen ist in Abbildung 5-1 veranschaulicht.

**Backcasting** ist ein Ansatz zur Zukunftsforschung, bei dem normative Szenarien entwickelt werden, um die Machbarkeit und die Auswirkungen des Erreichens bestimmter gewünschter Ziele zu untersuchen. Im Gegensatz zum **Forecasting**, das sich auf die wahrscheinlichste Projektion zukünftiger Bedingungen konzentriert, arbeitet Backcasting rückwärts von einem wünschenswerten Zukunfts-Endpunkt zurück in die Gegenwart. Dieser Ansatz ist insbesondere geeignet, um innovativ und visionär zu denken, da er nicht versucht, die Zukunft vorherzusagen, sondern die Umsetzbarkeit und die notwendigen Maßnahmen für verschiedene Zukunftsszenarien analysiert.

Während Forecasting die strukturellen Merkmale untersucht, die die wahrscheinliche Zukunft formen, liegt der Schwerpunkt bei Backcasting auf der Bestimmung der Handlungsspielräume zur Erreichung alternativer Zukunftsszenarien. [Robi03]

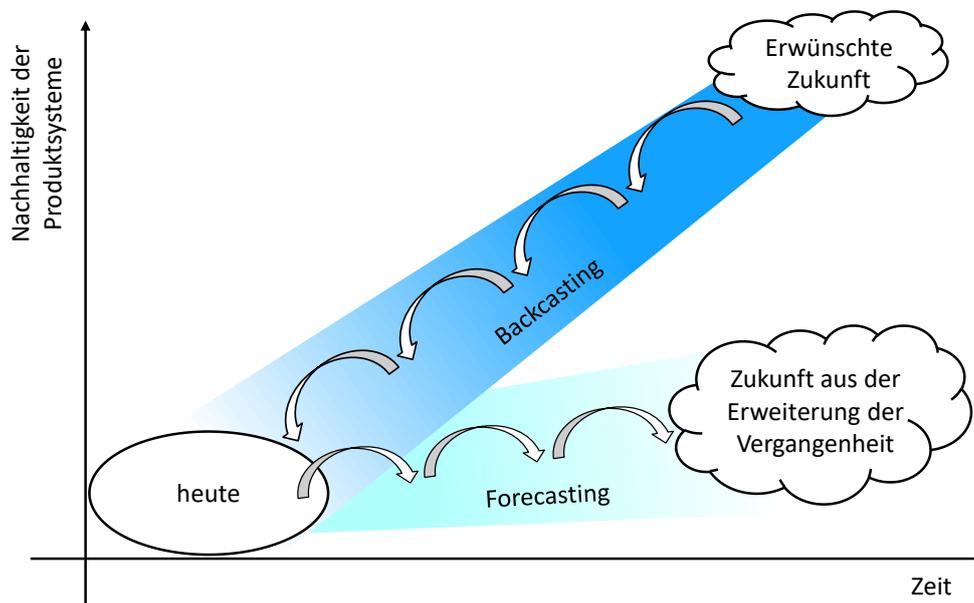


Abbildung 5-1: Differenzierung zwischen Forecasting und Backcasting

Die Forschungsfragen dieser Arbeit (Kapitel 4.2) und die daraus abgeleiteten Anforderungen (Kapitel 4.3) wurden bei der Entwicklung des PIPE-Modells mittels Backcasting betrachtet. Dies bedeutet, dass das Modell nicht mit der Prämisse entwickelt wurde, sofort vollständig umsetzbar zu sein, sondern vielmehr darauf abzielt, eine **wünschenswerte und in der Zukunft potenziell realisierbare Vorgehensweise zur Gestaltung nachhaltiger Produktsysteme** zu schaffen. Diese Arbeitsweise ermöglicht es, derzeitige technische und gesellschaftliche Beschränkungen zunächst auszublenden und davon unabhängig einen erstrebenswerten Zielzustand zu konzipieren. Dadurch werden Produktsysteme mit höherem Nachhaltigkeitspotenzial als durch reine Forecasting-Ansätze vorstellbar. Im Sinne der Öko-Effektivität (Abbildung 2-9) wären Produktsysteme mit ganzheitlich netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen ein möglicher Teil einer wünschenswerten Zukunft. Wären Produkte so gestaltet, dass sie der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft im positiven Sinne nutzen, anstatt ihnen zu schaden, würde man beginnen, tatsächlich etwas Gutes zu tun, anstatt lediglich „weniger schlecht“ (frei übersetzt aus [BrMB07]) zu sein. Wie ein solches Produktsystem aussehen könnte, wird in Kapitel 5.3 „Positive Impact Product System“ beschrieben. Die Nachhaltigkeit solcher Produkte oder Produktsysteme mit gesicherten netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen wäre zudem für Endkunden leicht nachvollziehbar. Eine ganzheitlich netto-positive Nachhaltigkeitsbilanz ist klarer und übersichtlicher als die zahlreichen aktuell vorhandenen Labels und Umweltkennzeichnungen [ISO01, Unep17], die oft nur einzelne Aspekte bewerten. Darüber hinaus würden solche Produktsysteme die tatsächlich entstehenden Kosten, einschließlich sozialer und ökologischer Kosten, berücksichtigen, anstatt diese zu vernachlässigen. Die Zielsetzung von PIPE geht damit über das Erreichen einer absoluten

Nachhaltigkeit von Produktsystemen (vgl. Kapitel 2.3.2) hinaus. Während bei dem Konzept der absoluten Nachhaltigkeit negative Wirkungen innerhalb der planetaren Grenzen erlaubt sind, sollen im PIPE-Modell ganzheitlich netto-positive Wirkungen entstehen. Durch diese Zielsetzung entfällt außerdem die aufwendige Berechnung und Allokation des sicheren Handlungsspielraums zu dem jeweiligen Produktsystem im Konzept der absoluten Nachhaltigkeit (Abbildung 2-10).

PIPE wird somit als ein Produktentstehungsmodell verstanden, das nicht zwingend sofort für alle Produktsysteme vollständig umsetzbar sein soll, sondern vielmehr eine Vision für die *Nachhaltige Produktentstehung* in der Zukunft darstellt. Diese Einordnung ist vorab essenziell, um dem Leser die Möglichkeit zu geben, die derzeit teils noch nicht realisierbaren Anforderungen innerhalb des Modells angemessen zu verstehen.

Um die Vorgehensweise bei der **Herleitung des Produktentstehungsmodells** näher erläutern zu können, sind die zwei wesentlichen Schritte in Abbildung 5-2 visualisiert. Im **ersten Schritt** wurde ausgehend von den Anforderungen an das Produktsystem aus Tabelle 4-4 und den Ansätzen aus dem Forschungsstand zu positiven Nachhaltigkeitswirkungen aus Kapitel 3.4 mit Hilfe des erläuterten Backcasting-Ansatz eine **Vision für ein Produktsystem** mit netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen generiert. Diese Vision des PIPS stellt das Zielsystem dar, welches durch den PEP entstehen soll und bereits alle notwendigen Elemente beinhaltet, um als ganzheitlich netto-positiv zu gelten.

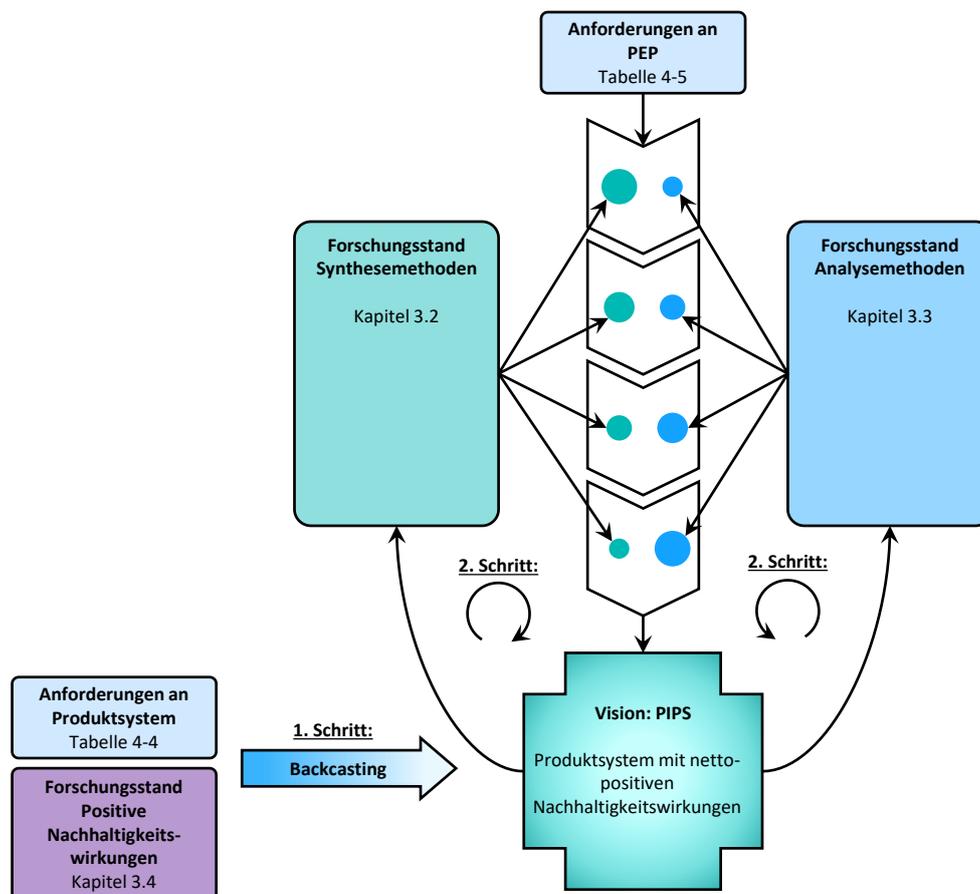


Abbildung 5-2: Vorgehensweise bei der Herleitung des PIPE-Modells

Im nachfolgenden **zweiten Schritt** erfolgte eine **iterative Entwicklung des PIPE-PEP** ausgehend von der Vision des PIPS und nach den Anforderungen an den PEP aus Tabelle 4-5. Dabei wurden die einzelnen Elemente des PIPS analysiert und geprüft, welche Methoden aus dem **Stand der Forschung zu Analyse- und Synthesemethoden** (Kapitel 3.2 und 3.3) im PEP erforderlich sind, um die jeweiligen Elemente des PIPS zu generieren. Geeignete Methoden wurden schrittweise in den PEP integriert, wobei Synthesemethoden insbesondere in den frühen Phasen und Analysemethoden verstärkt in den späteren Phasen zum Einsatz kommen. Im Anschluss erfolgt ein **Abgleich zwischen den gewählten Methoden und den geforderten Elementen** in der Vision des PIPS. Das iterative Vorgehen im zweiten Schritt wurde so lange wiederholt, bis sichergestellt war, dass das PIPS vollständig durch den PIPE-PEP generiert werden kann. Es folgten erste einfache Validierungen anhand von Produktbeispielen (siehe Kapitel 6.1), gefolgt von einer erneuten Überarbeitung des Modells, deren Ergebnisse in den nachfolgenden Kapiteln präsentiert werden.

## 5.2 Aufbau und Überblick des Produktentstehungsmodells

Nach der Erläuterung der Zielsetzung des Modells und dessen Herleitung erfolgt nun ein Überblick über den Aufbau und die wichtigsten Bestandteile, die in den Folgekapiteln detaillierter beschrieben werden. Abbildung 5-3 zeigt den **Aufbau des PIPE-Produktentstehungsmodells** und verweist auf die entsprechenden weiterführenden Kapitel. Das Modell wird von oben nach unten durchlaufen und besteht, wie bereits in Kapitel 4.3 und Abbildung 5-2 angedeutet, aus einem PEP und einem zu entwickelndem Produktsystem, welches das Ergebnis des PEP darstellt. Der Ausgangspunkt ist dabei ein **Problem oder eine Entwicklungsaufgabe**, analog zu einem klassischen PEP. Um eine hohe Anwendbarkeit und Anpassungsfähigkeit an bestehende Prozesse zu gewährleisten, ist der PIPE-PEP als **überlagernder Prozess** konzipiert, der einen **Basis-PEP** in der Mitte einbezieht. Der Basis-PEP kann dabei ein unternehmenseigener Prozess oder einer der klassischen Entstehungsprozesse (Kapitel 2.2) sein. In dieser Arbeit werden beispielhaft die Schritte der VDI 2221 [VDI19a, VDI19b] als zentraler Basis-PEP aufgezeigt. Wie in den Anforderungen vorgesehen (Tabelle 4-5: 3.2), wird dieser Basis-PEP von vier Phasen überlagert. Die **vier Hauptphasen** des PIPE-PEP orientieren sich an [PaBe77, PBFG07, BeGe21] und sind „Planen und Klären der Aufgabe“, „Konzipieren“, „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“. Diese Phasen sind seit langem in der Produktentstehung anerkannt und bilden ein einfaches sowie allgemeingültiges Modell eines PEP. Dadurch sollen Anwendbarkeit und Akzeptanz des PIPE-PEP weiter gesteigert werden. Am Ende der jeweiligen Phasen werden die Teilergebnisse der einzelnen Aktivitäten zu **Zwischenzielen integriert** (Tabelle 4-5: 3.1), um die Erreichung eines netto-positiven Produktsystems Schritt für Schritt von den ersten Ideen und Konzepten hin zum fertigen Produktsystem sicherzustellen. Die einzelnen Phasen werden in Kapitel 5.5 näher beschrieben. Der sogenannte **Positive Impact Optimization Loop** (PIOL) ist innerhalb der vier Phasen ein Kernelement von PIPE. In dieser Optimierungsschleife werden **iterativ Synthese- und Analyseaktivitäten** in unterschiedlichen Ausprägungen parallel zu den Aktivitäten des Basis-PEP durchlaufen. Dadurch kann das Produktsystem sukzessive gestaltet und kontinuierlich zur Erreichung der Netto-Positivität angepasst

werden. Hierbei kommen die präsentierten Methoden aus dem Stand der Forschung (Kapitel 3) zum Einsatz. Das genaue Vorgehen im PIOL, die verfügbaren Methoden und Hilfestellungen zur Auswahl der passenden Methoden, werden in Kapitel 5.4 vorgestellt. Im unteren Teil des Modells befindet sich das **PIPS**, das als **Resultat des PIPE-PEP** entsteht. Es beinhaltet eine ganzheitliche Definition des Produktsystems sowie alle notwendigen Maßnahmen zur Erzeugung von netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen. Es ist in Abbildung 5-3 nur angedeutet und wird im folgenden Kapitel 5.3 detailliert erläutert.

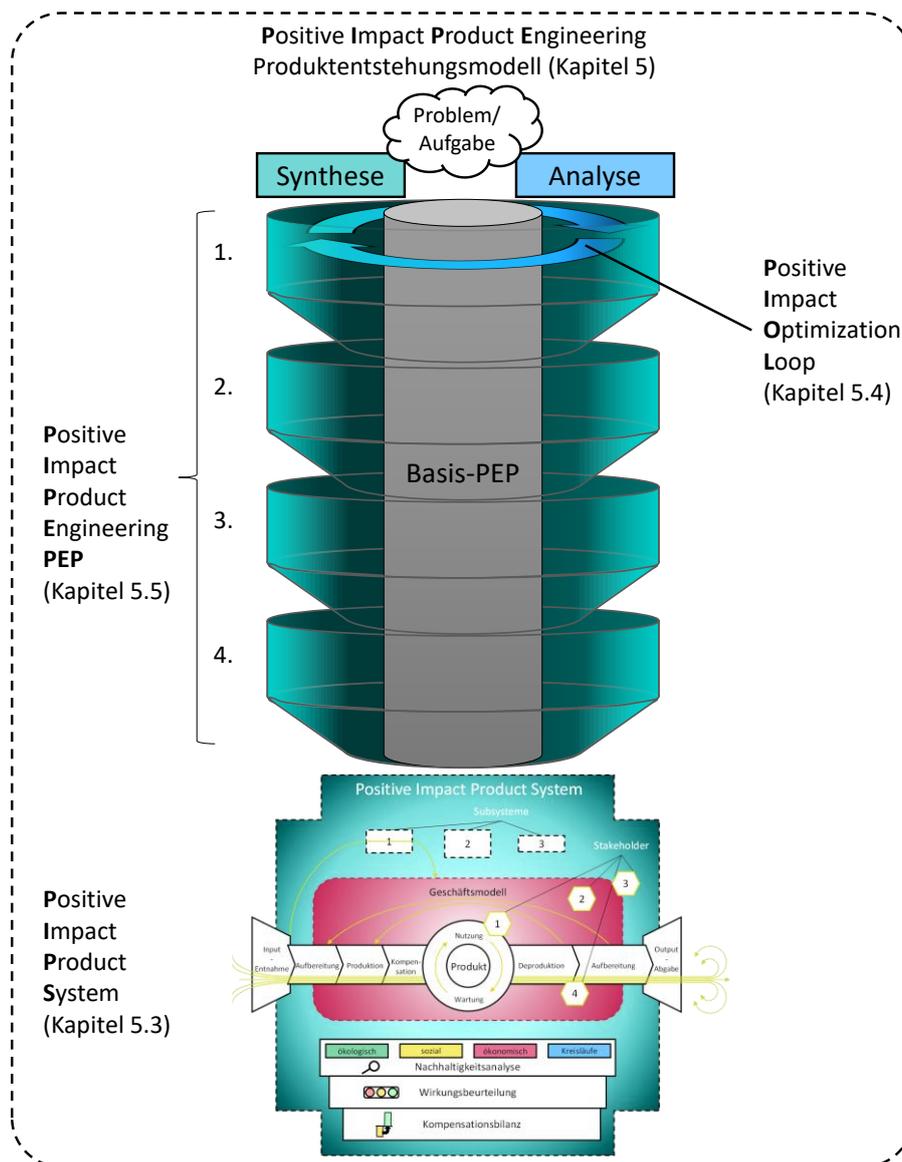


Abbildung 5-3: Überblick über das PIPE-Produktentstehungsmodell

### 5.3 Positive Impact Product System

Auch wenn das PIPS am Ende des PIPE-Produktentstehungsmodells steht, wird es als erster Bestandteil näher betrachtet, um zunächst das gewünschte Ergebnis des PEP genauer verstehen zu können. Es wird also zuerst geklärt, was entwickelt werden soll, bevor darauf eingegangen wird, wie dies geschehen soll. Dies erleichtert das Verständnis der später vorgestellten Phasen und

Zwischenziele des PIPE-PEP. In den nächsten Abschnitten werden der Aufbau und die einzelnen Bestandteile des PIPS näher umschrieben (Kapitel 5.3.1) und auf die Möglichkeit eingegangen inhärente positive Nachhaltigkeitswirkungen durch die Funktionen und Eigenschaften des Produkts selbst zu erzeugen (Kapitel 5.3.2).

### 5.3.1 Aufbau und Bestandteile des PIPS

Auf Basis des Stands der Forschung und dessen Bewertung, soll das PIPS sämtliche Anforderungen aus Tabelle 4-4 erfüllen. Die einzelnen Anforderungen werden mit den entsprechenden Bestandteilen des PIPS in der folgenden Beschreibung jeweils verknüpft. Ein Überblick über das **generische Modell eines PIPS** ist in Abbildung 5-4 gegeben. Dabei ist zu beachten, dass die spezifischen Produktsysteme, die bei der Anwendung von PIPE entstehen durchaus individuell gestaltet sein können und beispielsweise gleich mehrere Geschäftsmodelle, statt einem übergreifenden Geschäftsmodell, wie dargestellt, beinhalten. Ähnlich zum Vorgehen der Ökobilanz [DIN21a] wird das Produktsystem, an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst, definiert. Das **Produkt** selbst ist dabei zentral in der Mitte platziert, wodurch verdeutlicht werden soll, dass das gesamte PIPS weit über das reine Produkt hinausgeht. Die Systemgrenze des PIPS ist in Form eines Pluszeichens dargestellt, um die netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen des gesamten Systems zu veranschaulichen.

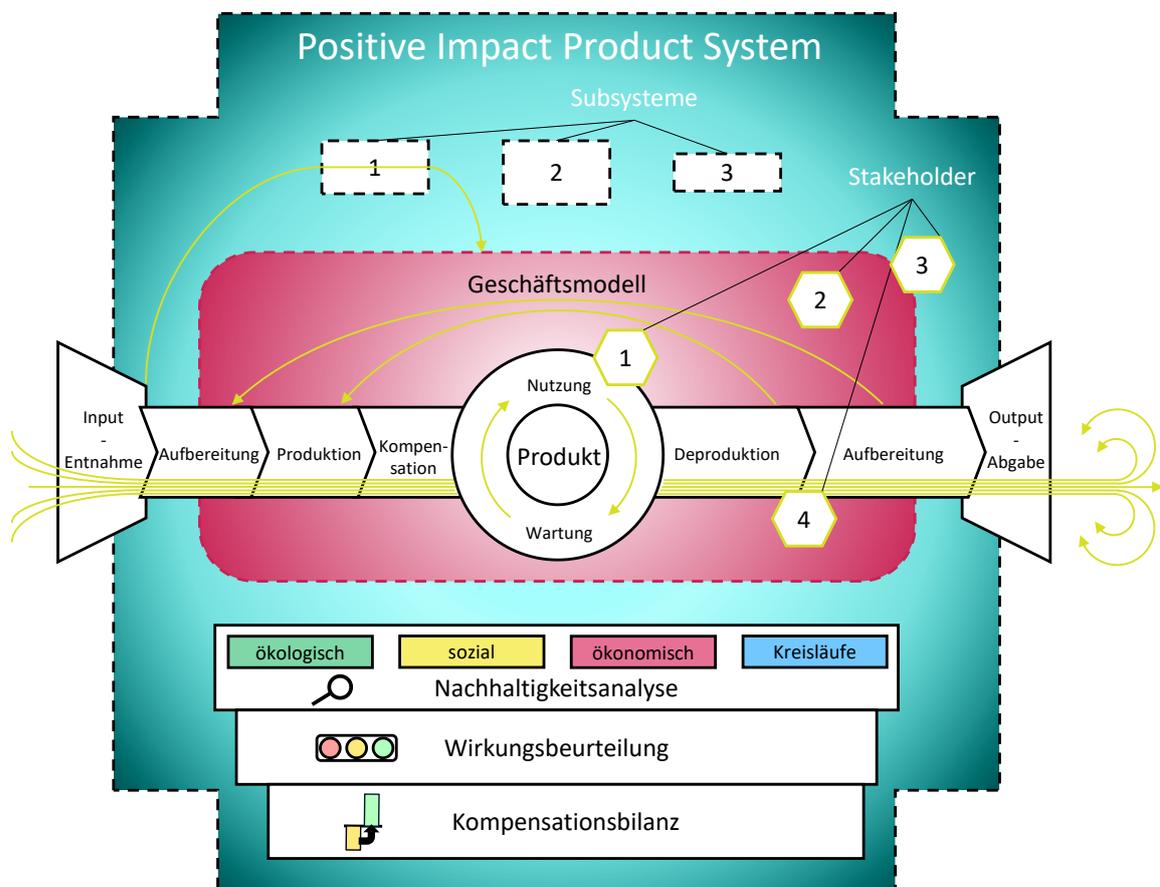


Abbildung 5-4: Positive Impact Product System (PIPS)

Die systemische Sicht auf das Produktsystem ist grundlegend für eine ganzheitliche Definition des PIPS (Tabelle 4-4: 1). Die **Systemgrenzen** umfassen im oberen Teil den Produktlebenszyklus, die Stakeholder, das Geschäftsmodell und weitere Subsysteme. Im unteren Teil sind die drei Elemente zur Erzeugung netto-positiver Nachhaltigkeitswirkungen (Tabelle 4-4: 2) gezeigt. Die einzelnen Bestandteile werden im Folgenden näher beschrieben.

Die Literatur bietet zahlreiche verschiedene Darstellungen des **Produktlebenszyklus**, wie beispielsweise [ALSK19, Herr10, LZXG11, UnCD07], die bisher nicht vereinheitlicht oder standardisiert sind. Für den Produktlebenszyklus im PIPS wird daher eine eigene Form gewählt, die alle relevanten Lebenszyklusphasen enthält (Tabelle 4-4: 1.1), die meist chronologische Abfolge der Phasen abbildet und gleichzeitig übersichtlich ist. Der Produktlebenszyklus ist zentral dargestellt und durchläuft das PIPS ausgehend von einem **Input** links, bei dem Ressourcen der Systemumgebung entnommen werden, durch die einzelnen Lebenszyklusphasen bis zu einem **Output** rechts, bei dem entsprechend Ressourcen abgegeben werden. An diesen beiden Schnittstellen werden die Elementarflüsse betrachtet, die in das Produktsystem hinein und aus ihm herausfließen. Die übrigen Lebenszyklusphasen sind innerhalb des PIPS dargestellt, da sie im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtungsweise relevant für die Nachhaltigkeitsanalyse sind und somit vollständig zum Produktsystem zählen. Auf die Entnahme der Ressourcen aus der Umwelt folgt die Phase der **Aufbereitung**, in der beispielsweise primäre oder sekundäre Rohstoffe zu Betriebs- oder Werkstoffen für das spätere Produkt aufbereitet werden. Die **Produktion** stellt die nächste Lebenszyklusphase dar. Sie wird häufig auch als Herstellungs- oder Fertigungsphase bezeichnet und beinhaltet alle Prozesse zur Produktion der Teile und Komponenten des Produkts sowie dessen Endmontage. Hierzu zählt auch die Bereitstellung spezieller Werkzeuge und Fertigungsanlagen sowie der Verpackung. Darauf folgt die neuartige Lebenszyklusphase der **Kompensation**, die in den Darstellungen im Stand der Forschung in der Regel nicht abgebildet ist. In dieser Phase werden die Kompensationsmaßnahmen zur Sicherstellung einer netto-positiven Wirkungsbilanz des PIPS umgesetzt bzw. initiiert (siehe Kapitel 3.4). Wie bereits bei der ökonomischen Betrachtung der Kompensationsmaßnahmen in Abbildung 3-36 angedeutet, sollten diese Maßnahmen vom produzierenden Unternehmen vor dem Verkauf an den Endkunden umgesetzt werden. Somit werden Umweltkosten und soziale Kosten korrekt eingepreist, die Verantwortung für negative Nachhaltigkeitswirkungen vom verursachenden Unternehmen übernommen und gewährleistet, dass das Produkt „netto-positiv“ in den Markt gelangt. Dabei ist zu beachten, dass manche Kompensationsmaßnahmen über einen längeren Zeitraum umgesetzt werden und durchaus parallel zur Nutzung des Produkts laufen können. Im nächsten Element des Produktlebenszyklus wird das **Produkt** sowie dessen **Nutzung** und **Wartung** verortet. Abhängig von der Art des Produkts und dem dazugehörigen Geschäftsmodell bestehen vielerlei Varianten dieser Phase, wie unter anderem die Ausprägungen der PSS zeigen (Abbildung 3-23). Neben verschiedenen Nutzungskonzepten kann die Lebensdauer von Produkten deutlich variieren und es können unterschiedliche Ressourcen für die Nutzung oder Wartung benötigt werden. Da auch hier vielseitige Nachhaltigkeitswirkungen entstehen können, müssen die verschiedenen Szenarien im PIPS

dargestellt werden. Zum Produkt gehören auch produktbezogene Informationen, wie eine Liste der verwendeten Materialien, Wartungs- und Demontageanleitungen oder Hinweise für das Recycling. Wird das Produkt obsolet, endet die Nutzungsphase und das EoL des Produkts beginnt mit dessen **Deproduktion**. Entgegengesetzt zur Produktion soll hier das Produkt in seine Bestandteile und Komponenten zerlegt werden und die verschiedenen Werk- bzw. Rohstoffe oder Standardbauteile sortenrein getrennt werden. Dies ist für die darauffolgende zweite Aufbereitungsphase essenziell. Findet am EoL nochmals eine **Aufbereitung** statt, können die einzelnen Bestandteile und Rohstoffe wieder als wertvolle Ressourcen an die Systemumgebung abgegeben werden und durch das Schließen der Stoff- und Materialkreisläufe einen positiven Beitrag zur Kreislaufwirtschaft leisten. Dies soll auch durch die gelben Pfeile symbolisiert werden, die die **Wertschöpfungsketten** des PIPS repräsentieren (Tabelle 4-4: 1.1). In der generischen Abbildung 5-4 sind nur einige der möglichen Wertschöpfungsketten angedeutet, die beim Input in das PIPS hineinfließen und am Output das PIPS verlassen. Hierdurch können auch die verschiedenen **Werterhaltungsoptionen** (Tabelle 3-7) durch rückwärts gerichtete Pfeile in vorherige Lebenszyklusphasen visualisiert werden. Dabei können auch Wertschöpfungsketten vom Input zunächst durch andere Subsysteme laufen, bevor sie in andere Bestandteile des PIPS fließen.

Neben der vollständigen Abbildung des Produktlebenszyklus stellt die Sicht auf das oder die **Geschäftsmodelle** ein weiteres wichtiges Element des PIPS dar (Tabelle 4-4: 1.3). Im einfachsten Fall wird der Produktlebenszyklus von einem Geschäftsmodell abgedeckt, wie in Abbildung 5-4 zu sehen. Bei komplexeren Produktsystemen kooperieren meist mehrere Geschäftsmodelle und es können Spezialisierungen dieser auf einzelne Produktlebensphasen, wie zum Beispiel der Wartung, Aufbereitung oder Deproduktion, stattfinden. Durch die Einbeziehung des Geschäftsmodells wird zum einen die Analyse der ökonomischen Aspekte ermöglicht. Zum anderen ist ein passendes Geschäftsmodell wesentlich für die effektive Steuerung der Wertschöpfungsketten und Umsetzung der Werterhaltungsoptionen innerhalb einer Kreislaufwirtschaft. Außerdem erfolgen durch das Geschäftsmodell möglicherweise Interaktionen mit anderen Subsystemen.

Diese **Subsysteme** sollen ebenfalls im PIPS integriert werden (Tabelle 4-4: 1.4). Die Definition dieser Subsysteme wird bewusst vage gehalten, um keine Ausprägungen auszuschließen. Unter Subsystemen werden Systeme verstanden, die nicht direkter Teil des Produktlebenszyklus sind, jedoch für die Umsetzung des PIPS relevant sind und durch die Nachhaltigkeitswirkungen entstehen. Beispiele für solche Subsysteme wären Teile der notwendigen Infrastruktur für die Nutzung oder die Verarbeitung gewisser Vor-, Koppel- oder Nebenprodukte des eigentlichen Produkts. Diesen kann jeweils auch ein eigenes Geschäftsmodell unterliegen. Die Modellierung solcher Subsysteme soll die Betrachtung aller relevanten Nachhaltigkeitsaspekte rund um das Produkt ermöglichen und die Verschiebung kritischer Nachhaltigkeitsaspekte in andere Systeme außerhalb der Systemgrenzen des PIPS vermeiden.

Eine weitere Perspektive des PIPS zeigt die betroffenen **Stakeholder** auf (Tabelle 4-4: 1.2). Um auch die sozialen Aspekte berücksichtigen zu können, werden verschiedene Stakeholdergruppen definiert, die zu unterschiedlichen Lebenszyklusphasen, Subsystemen oder Geschäftsmodellen

zugeordnet werden können. Beispiele sind die involvierten Arbeitskräfte in der Produktionsphase, Akteure entlang der Wertschöpfungskette oder die Endkunden. Eine Orientierungshilfe bieten die Stakeholdergruppen in Tabelle 3-4. Mit diesen Bestandteilen im oberen Teil von Abbildung 5-4 gelten die Anforderungen zur ganzheitlichen Definition des Produktsystems (Tabelle 4-4: 1) durch das PIPS als erfüllt.

Um ein Produktsystem mit netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen (Tabelle 4-4: 2) zu erhalten, sind **drei weitere Elemente** notwendig, die ebenfalls Teil des PIPS sind. Das genaue Vorgehen zum Erzeugen dieser wird in Kapitel 5.4 mit dem PIOL beschrieben. An dieser Stelle werden nur die resultierenden Elemente im finalen PIPS erläutert. Zunächst ist eine ganzheitliche **Nachhaltigkeitsanalyse** notwendig. Dabei werden die oben definierten Bestandteile umfassend analysiert und alle ökologischen, sozialen und ökonomischen Nachhaltigkeitswirkungen sowie Aspekte der Kreislauffähigkeit bestimmt (Tabelle 4-4: 2.1). Mit Hilfe der vorgestellten Analyseverfahren aus Kapitel 3.2 sollen vollständig alle Wirkungen, positiver wie negativer Art, aufgedeckt und dokumentiert werden. Bei einem final durch den PEP definierten Produktsystem eignen sich hierzu vor allem die ganzheitlichen Ansätze aus Kapitel 3.2.6, wie zum Beispiel LCSA oder C-LCSA. Diese Nachhaltigkeitswirkungen unterliegen im zweiten Element einer qualitativen **Wirkungsbeurteilung**. Wie das Ampelsymbol andeutet, werden die analysierten Wirkungen in drei Kategorien eingeteilt (siehe Kapitel 5.4.1). Das PIPS wird so definiert, dass sowohl positive als auch negative Nachhaltigkeitswirkungen auftreten können. Allerdings werden nur die negativen Wirkungen zugelassen, die durch entsprechende Maßnahmen kompensiert werden können (siehe Kapitel 3.4). Negative Nachhaltigkeitswirkungen, die beispielsweise irreversible Schäden verursachen, gelten als nicht kompensierbar und sind daher in einem PIPS nicht erlaubt (Tabelle 4-4: 2.2). Diese Beurteilung ist notwendig, um im letzten Element eine netto-positive **Kompensationsbilanz** generieren zu können. Hier werden für alle im PIPS auftretenden negativen und gleichzeitig kompensierbaren Nachhaltigkeitswirkungen entsprechende Kompensationsmaßnahmen ausgewählt und deren Umfang bestimmt. Dies erfolgt für alle Wirkungskategorien, in denen negative und kompensierbare Wirkungen entstehen. Die Kompensationsmaßnahmen sollen dabei die entstandenen Auswirkungen überkompensieren und somit eine netto-positive Wirkungsbilanz über das gesamte PIPS hinweg erzeugen (Tabelle 4-4: 2.3).

Durch dieses generische Modell des PIPS werden alle notwendigen Bestandteile für ein Produktsystem mit ganzheitlich netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen beschrieben. **Umfang und Komplexität des PIPS** können selbst bei relativ einfachen Produkten hoch sein und steigen mit zunehmender Produktkomplexität weiter an. An dieser Stelle sei daher nochmals der Hinweis gegeben, dass das PIPS die wünschenswerte Beschreibung eines Produktsystems in der Zukunft nach dem Backcasting-Ansatz (Kapitel 5.1) widerspiegelt. Auch wenn die vollständige Abbildung eines PIPS derzeit als schwierig umsetzbar erscheint, können zukünftige Entwicklungen, wie beispielsweise künstliche Intelligenz oder der Ausbau von Datenbanken, diese in naher Zukunft ermöglichen.

Wie bereits in Kapitel 5.1 erwähnt, ist die Nachhaltigkeit eines Produktsystems mit garantierten netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen für den **Endkunden leicht nachvollziehbar**, wodurch eine weitere Anforderung an das PIPS umgesetzt wird (Tabelle 4-4: 3). Wird die Netto-Positivität über alle Dimensionen und Wirkungskategorien der Nachhaltigkeit durch eine unabhängige dritte Partei bestätigt, können Endkunden sicher sein, mit dem Konsum des Produkts einen positiven Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung zu leisten, ohne zahlreiche Labels, Gütesiegel oder Emissionswerte selbst bewerten zu müssen.

### 5.3.2 Inhärente positive Nachhaltigkeitswirkungen des PIPS

Neben den netto-positiven Wirkungsbilanzen durch Kompensationen können auch durch das Produkt selbst und dessen Funktionen positive Nachhaltigkeitswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft entstehen. Diese sind in Kapitel 3.4.1 als inhärente positive Auswirkungen des Produktsystems klassifiziert (siehe Abbildung 3-30). Sie entstehen durch **Eigenschaften bzw. Haupt- oder Nebenfunktionen** des Produkts. Solche inhärenten positiven Auswirkungen sind nicht in jedem Produktsystem umsetzbar und daher **keine zwingende Voraussetzung** für ein PIPS. Sie können jedoch die netto-positive Wirkung des Produktsystems zusätzlich verstärken. Die Möglichkeiten für solche inhärenten positiven Nachhaltigkeitswirkungen sind denkbar vielseitig und können in einzelnen Dimensionen oder dimensionsübergreifend positive Effekte hervorrufen. Daher lassen sie sich nur schwer in die klassischen drei Dimensionen der Nachhaltigkeit einordnen. Tabelle 5-1 soll folglich einen **Überblick über einige potenzielle inhärente positive Nachhaltigkeitswirkungen durch Produkte** liefern und als Inspiration bei der Gestaltung von PIPS durch PIPE dienen.

**Tabelle 5-1: Möglichkeiten für inhärente positive Nachhaltigkeitswirkungen durch Produktsysteme**

Kategorien	Beispielhafte Funktionen oder Eigenschaften des Produkts
	Das Produktsystem...
Energie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stellt saubere Energie zur Verfügung.</li> <li>• erhöht die Energieeffizienz eines bestehenden Systems.</li> </ul>
Emissionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• reduziert Schadstoffe in der Luft, im Wasser oder im Boden.</li> <li>• reduziert ionisierende Strahlung.</li> <li>• reduziert Lärm, Gerüche oder Erschütterungen.</li> </ul>
Material	<ul style="list-style-type: none"> <li>• reduziert vorhandene Abfälle.</li> <li>• wertet vorhandene Abfälle und nicht mehr genutzte Ressourcen auf.</li> <li>• stellt nachhaltige Ressourcen zur Verfügung.</li> </ul>
Landnutzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• trägt zum Erhalt der Artenvielfalt bei.</li> <li>• bietet Lebensräume.</li> <li>• trägt zur Renaturierung bei.</li> </ul>
Soziales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• erhöht die Bildung.</li> <li>• erhöht die Sicherheit.</li> <li>• trägt zur Gesundheit bei oder fördert diese.</li> <li>• fördert eine aktive Lebensweise.</li> <li>• fördert die Inklusion von Menschen mit Einschränkung.</li> <li>• erfüllt Grundbedürfnisse für Menschen der BoP.</li> <li>• verbessert die hygienischen Bedingungen.</li> <li>• schafft nachhaltige Arbeitsplätze.</li> </ul>
Informativ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• fördert das Bewusstsein für nachhaltige Entwicklung.</li> </ul>

## 5.4 Positive Impact Optimization Loop

Wie Abbildung 5-3 zeigt, stellt der PIOL das zentrale Element innerhalb des PIPE-PEP dar. Diese Optimierungsschleife beschreibt die grundlegende Vorgehensweise zur iterativen Gestaltung des oben beschriebenen PIPS. Sie wird in diesem Kapitel zunächst allgemein beschrieben (Kapitel 5.4.1) und anschließend wird das Vorgehen auf ökologische, soziale, ökonomische Aspekte sowie Aspekte der Kreislauffähigkeit separat übertragen (Kapitel 5.4.2 - 5.4.5). Abschließend folgt eine Sammlung von Methoden, die im PIOL eingesetzt werden können, sowie eine Hilfestellung zur Auswahl geeigneter Methoden im PEP (Kapitel 5.4.6).

### 5.4.1 Allgemeine Vorgehensweise im PIOL

Um die anspruchsvollen Ziele eines PIPS zu erreichen, wird eine **neuartige Vorgehensweise** erforderlich, die als „**Positive Impact Optimization Loop – PIOL**“ bezeichnet wird. Diese Vorgehensweise ist in Abbildung 5-5 dargestellt und wird **im PEP kontinuierlich durchlaufen**, um eine netto-positive Nachhaltigkeitswirkung des finalen Produktsystems sicherzustellen. Die Schleife orientiert sich dabei an dem in Abbildung 2-6 gezeigten Regelungszyklus nach [VDI19a], welcher durch das **Wechselspiel von Synthese und Analyse** geprägt ist (Tabelle 4-5: 1). Auf diese Weise wird eine schrittweise Verbesserung in mehreren Iterationen im PIPE-Modell ermöglicht (Tabelle 4-5: 1.1). Der Prozess beginnt auf der linken Seite mit der **Anwendung von Synthesemethoden**, durch die erste **Produkteigenschaften** generiert werden. Diese Eigenschaften werden im nächsten Schritt mithilfe geeigneter **Analysemethoden** untersucht.

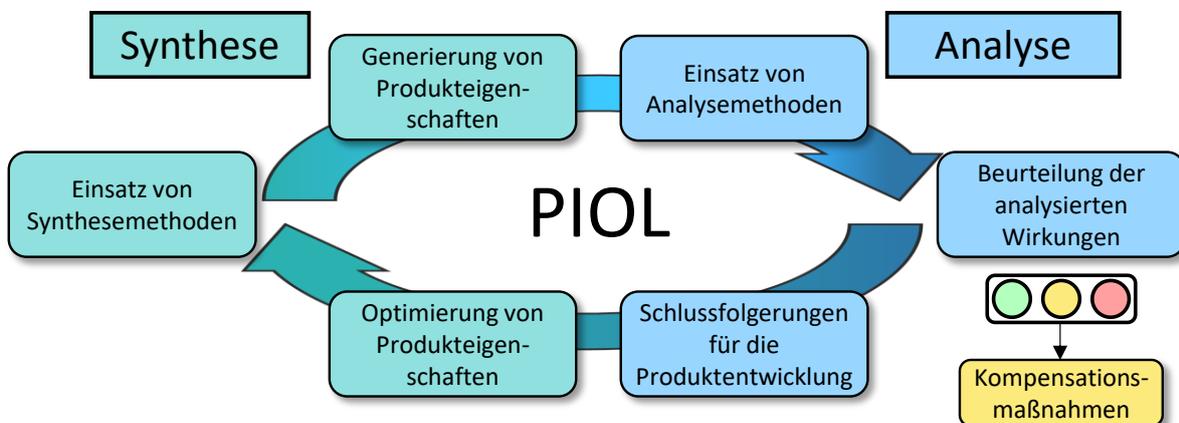


Abbildung 5-5: Positive Impact Optimization Loop

Das zentrale Element des Vorgehens bildet die **Wirkungsbeurteilung**, welche durch das Ampelsystem (Abbildung 5-6) visualisiert und im weiteren Verlauf näher erläutert wird. Durch die Wirkungsbeurteilung lassen sich **Rückschlüsse für die weitere Produktentwicklung** ziehen, was die Entscheidungsfindung während des PEP unterstützt (Tabelle 4-5: 3.4). Um die bisherigen Produkteigenschaften in Richtung Netto-Positivität zu optimieren, werden erneut die Synthesemethoden der *Nachhaltigen Produktentstehung* eingesetzt, womit die Schleife von Neuem beginnt. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis die Wirkungsbeurteilung ein zufriedenstellendes Ergebnis liefert und das Produktsystem im aktuellen Entwicklungsstadium als netto-positiv

eingestuft werden kann. Die entsprechenden Synthese- und Analysemethoden werden in der Methodensammlung (Kapitel 5.4.6) präsentiert und innerhalb des PIPE-PEP den vier Hauptphasen zugeordnet (Kapitel 5.5).

Das neuartige Element innerhalb des PIOL stellt die **Wirkungsbeurteilung** dar, die in Abbildung 5-6 visualisiert ist. Ziel dieser Beurteilung ist es, die analysierten Wirkungen des Produktsystems **qualitativ zu beurteilen**, sie dabei in **drei Kategorien** zu unterteilen und darauf basierend **Schlussfolgerungen** für die weitere Produktentwicklung zu ziehen. Innerhalb der Wirkungsbeurteilung werden drei Fragen zu den potenziellen Wirkungen des Produktsystems gestellt, woraufhin die Wirkungen entsprechend den **Farben einer Ampel** (siehe Abbildung 5-6) kategorisiert werden.

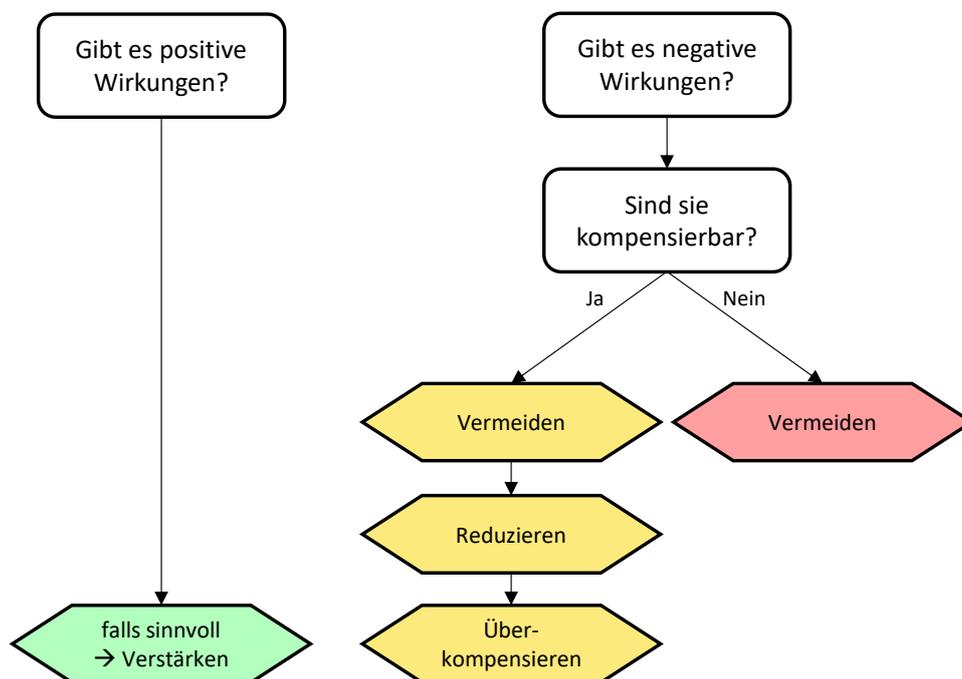


Abbildung 5-6: Wirkungsbeurteilung und Vermeidungshierarchie im PIOL

Sollten durch das Produktsystem positive Nachhaltigkeitswirkungen entstehen, fallen diese in die **grüne Kategorie** und sollten in der weiteren Entwicklung nach Möglichkeit verstärkt werden. Dabei muss abgewogen werden, ob die Verstärkung sinnvoll ist und nicht unerwünschte negative Auswirkungen in anderen Bereichen des Produktsystems verursacht (vgl. Abbildung 3-30).

Entstehen hingegen negative Wirkungen, werden diese in **kompensierbare und nicht kompensierbare Wirkungen** unterteilt. Nicht kompensierbare Wirkungen, wie solche, die irreversible Schäden hervorrufen (vgl. Kapitel 3.4.1 und 5.3), zählen zur **roten Kategorie** und müssen durch eine Optimierung der verursachenden Produkteigenschaften vollständig vermieden werden, da sie der Zielsetzung der Netto-Positivität in allen Wirkungskategorien entgegenstehen.

Kompensierbare negative Wirkungen werden der **gelben Kategorie** zugeordnet und durchlaufen eine **Vermeidungshierarchie** (vgl. Abbildung 3-32). Auch wenn wirksame Kompensationsmaßnahmen existieren, sollten negative Auswirkungen zunächst gänzlich vermieden werden. Ist dies durch Anpassung der Produkteigenschaften im PIOL nicht möglich, sollten die negativen

Wirkungen so weit wie möglich reduziert werden. Erst im letzten Schritt der Vermeidungshierarchie kommen entsprechende Kompensationsmaßnahmen zum Einsatz. Um eine netto-positive Bilanz zu erzielen, müssen die verbleibenden negativen Wirkungen durch Analyseverfahren genau quantifiziert werden (vgl. CEC-Approach in Kapitel 3.4.2) und entsprechende Kompensationsmaßnahmen bestimmt werden, die die negativen Auswirkungen überkompensieren. Die Wirkungsbeurteilung kann erst als zufriedenstellend bezeichnet werden, wenn **keine Wirkungen mehr in der roten Kategorie** verbleiben, alle **grünen Wirkungen verstärkt** und **geeignete Kompensationsmaßnahmen für die gelben Wirkungen** identifiziert sind. Es liegt dann eine **netto-positive Wirkungsbeurteilung** vor. Somit liefert die Wirkungsbeurteilung beim wiederholten Durchlaufen des PIOL kontinuierlich Optimierungspotenziale für das Produktsystem, bis ein PIPS erreicht ist. Bei einer netto-positiven Beurteilung kann der PIOL beendet werden, und die Wirkungsbeurteilung stellt eine Übersicht der notwendigen Kompensationsmaßnahmen bereit.

Die kritische Analyse von Kompensationsmaßnahmen in der Literatur sowie die Ergebnisse der SWOT-Analyse in Kapitel 3.4.7 verdeutlichen, dass deren Wirksamkeit nicht vorausgesetzt werden kann. Daher erfordert die Erzielung einer netto-positiven Wirkungsbilanz durch den Einsatz von Kompensationsmaßnahmen die **Einhaltung spezifischer Rahmenbedingungen**. Angesichts der zentralen Bedeutung der Überkompensation negativer Auswirkungen im PIPE-Modell für die Realisierung netto-positiver Produktsysteme wurden in Tabelle 5-2 insgesamt **15 Anforderungen an Kompensationsmaßnahmen** definiert. Diese Anforderungen basieren teilweise auf existierenden Vorgaben aus der Literatur [BGFH24, DLKW24, ISO18, ISO23, WoSG18] und wurden teilweise spezifisch aus den Anforderungen des PIPE-Modells (Tabelle 4-4 und Tabelle 4-5) abgeleitet. Die Anforderungen sind in Tabelle 5-2 näher beschrieben, weshalb auf eine ausführliche Erläuterung im Text verzichtet wird.

Durch diese Anforderungen soll sichergestellt werden, dass Kompensationsmaßnahmen sowohl in ihrer Effektivität als auch in ihrer Nachhaltigkeit den Ansprüchen des PIPE-Modells entsprechen und einen wesentlichen Beitrag zur Realisierung netto-positiver Produktsysteme leisten können.

Tabelle 5-2: Anforderungen an Kompensationsmaßnahmen im PIPE-Modell

Nr.	Anforderung	Beschreibung
1	Effektivität & Wirkungsäquivalenz	Die Kompensationsmaßnahme muss spezifisch auf die Wirkungskategorie der identifizierten negativen Auswirkung ausgerichtet sein und eine effektive Minderung dieser gewährleisten.
2	Permanenz	Die positiven Wirkungen der Maßnahme müssen langfristig beständig sein und nicht durch äußere Einflüsse beeinträchtigt werden. Maßnahmen zur Sicherstellung dieser Dauerhaftigkeit sind vorzusehen.
3	Wissenschaftliche Fundierung	Die Maßnahme muss auf wissenschaftlich validierten Methoden basieren und regelmäßig an neue Erkenntnisse angepasst werden.
4	Messbarkeit & Berechenbarkeit	Die positiven Auswirkungen der Maßnahme müssen eindeutig messbar und auf Basis klarer Metriken quantifizierbar sein.
5	Transparenz & Nachvollziehbarkeit	Die Kompensationsmaßnahmen müssen vollständig dokumentiert und in einer für externe Parteien nachvollziehbaren Weise transparent aufbereitet werden.
6	Reduktionspriorität der Vermeidungshierarchie	Die Vermeidung und Reduktion negativer Auswirkungen müssen stets priorisiert werden, bevor deren Kompensation in Betracht gezogen wird (Abbildung 3-32).
7	Skalierbarkeit	Die Maßnahme muss in großem Maßstab umsetzbar sein und flexibel an unterschiedliche Kontexte angepasst werden können.
8	Wirtschaftlichkeit	Die Maßnahme muss unter Berücksichtigung von Ressourcenverfügbarkeit und Kosteneffizienz wirtschaftlich realisierbar sein.
9	Ganzheitlichkeit & Kompensierbarkeit	Die Berücksichtigung positiver und negativer Wirkungen in allen drei Nachhaltigkeitsdimensionen muss sichergestellt werden. Potenzielle negative Auswirkungen der Kompensationsmaßnahme müssen kompensierbar sein (siehe Abbildung 5-6).
10	Regionalität	Lokale Projekte sollen bevorzugt werden. Die Maßnahme muss regionale Gegebenheiten berücksichtigen und lokale Stakeholder einbinden.
11	Zusätzlichkeit	Es muss nachgewiesen werden, dass die positiven Wirkungen ausschließlich durch die Kompensationsmaßnahme erzielt werden und ohne deren Umsetzung nicht eingetreten wären.
12	Vermeidung von Doppelzählung	Es muss sichergestellt werden, dass die Maßnahme nicht mehrfach in verschiedenen Produktsystemen oder anderen Wirkungsbilanzen angerechnet wird.
13	Vermeidung von Betrug	Es muss sichergestellt werden, dass Kompensationsprojekte frei von Betrug, unlauteren Praktiken, Fälschungen und ineffektiven Maßnahmen sind.
14	Legalität & Konformität mit Normen	Die Maßnahme muss allen relevanten gesetzlichen Vorgaben und internationalen Standards entsprechen.
15	Validierung & Zertifizierung	Die Maßnahme muss durch unabhängige Dritte validiert und zertifiziert werden, um die Einhaltung der festgelegten Anforderungen zu gewährleisten.

Da für den PIPE-PEP eine **ganzheitliche Herangehensweise** erforderlich ist (Tabelle 4-5: 2), erfolgt in den nächsten Unterkapiteln eine detaillierte Einteilung der Wirkungen in der ökologischen, sozialen und ökonomischen Dimension sowie hinsichtlich der Kreislauffähigkeit. Dabei wird stets eine vollständige **Lebenszyklusbetrachtung** (Tabelle 4-5: 2.5) und **Systembetrachtung** (Tabelle 4-5: 2.6) vorausgesetzt, um entlang des gesamten Produktlebenszyklus alle relevanten Systeme, Stakeholder und Geschäftsmodelle einzubeziehen.

Es ist wichtig zu betonen, dass die Kategorisierung der Wirkungen im Rahmen der Wirkungsbeurteilung nicht vollständig objektiv erfolgen kann. Die Forschung im Bereich der positiven Wirkungen sowie der Kompensation negativer Wirkungen befindet sich noch in der Entwicklung und muss weiter ausgebaut werden. Darüber hinaus ist eine **fachgebietsübergreifende Diskussion erforderlich**, um einen breiten wissenschaftlichen Konsens über die Kategorisierung der Nachhaltigkeitswirkungen zu erreichen. In diesem Zusammenhang sollten die folgenden Tabellen als ein erster **Vorschlag für eine systematische Einteilung der Wirkungen** betrachtet werden. Die Kategorisierung wurde teilweise im Rahmen studentischer Arbeiten entwickelt, um eine ausschließlich subjektive Einordnung durch den Autor zu vermeiden [Weig22]. Sie dient als Ausgangspunkt, der in der wissenschaftlichen Debatte weiter verfeinert und angepasst werden kann, um die Komplexität und Vielfalt der potenziellen Wirkungen in ökologischer, sozialer und ökonomischer Hinsicht angemessen abzubilden. Gleiches gilt auch für die Kategorisierung der Wirkungen im Bereich der Kreislauffähigkeit.

#### 5.4.2 Wirkungsbeurteilung ökologischer Aspekte

Unter die ganzheitliche Betrachtung der Nachhaltigkeitswirkungen fällt zunächst die Berücksichtigung der ökologischen Aspekte (Tabelle 4-5: 2.1). Um die allgemeine Vorgehensweise im PIOL für die ökologische Dimension genauer zu spezifizieren, werden die verschiedenen Wirkungen in die drei Kategorien eingeteilt und auf entsprechende Kompensationsmaßnahmen für negative Auswirkungen verwiesen.

In Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 sind die **Wirkungskategorien nach ReCiPe2016** [HSES17] übernommen, die auch im Rahmen der Vorstellung der Ökobilanz (Kapitel 3.2.2) und der Kompensationsmaßnahmen in der ökologischen Dimension (Kapitel 3.4.2) angewendet wurden. Im Bereich der **grünen Kategorie** findet eine Erweiterung der inhärenten positiven Produkteigenschaften aus Tabelle 5-1 statt. Für jede Wirkungskategorie werden in Tabelle 5-3 mögliche Eigenschaften des Produktsystems beschrieben, die in dieser Kategorie positive Nachhaltigkeitswirkungen hervorrufen. Da die Vermeidung oder Reduktion von gegenwärtigen negativen Wirkungen als positiv betrachtet wird, entsteht eine gewisse Redundanz zwischen positiven Wirkungen in Tabelle 5-3 und den Kompensationsmaßnahmen in Tabelle 5-4.

In der Wirkungskategorie **Klimaänderung** zeichnet sich ein positiver Beitrag des Produktsystems dadurch aus, dass er entweder Treibhausgase aus der Atmosphäre bindet oder deren Freisetzung effektiv verhindert. Hinsichtlich des **Ozonabbaus** besteht die potenzielle positive Wirkung darin, ozonschichtschädigende Substanzen aus der Atmosphäre zu entfernen oder deren Emission zu vermeiden, wodurch der Schutz der Ozonschicht unterstützt wird. In der Kategorie **Humantoxizität** trägt das Produktsystem zur Minimierung gesundheitlicher Risiken bei, indem es die Entgiftung des menschlichen Körpers fördert oder die Aufnahme humantoxischer Substanzen verhindert. Die Reduktion von **Feinstaub** und respiratorischen anorganischen Stoffen erfolgt durch die Bindung dieser Schadstoffe in der Atmosphäre oder die Verhinderung ihrer Emission.

Tabelle 5-3: Kategorisierung der positiven Wirkungen für die ökologische Wirkungsbeurteilung im PIOL

Wirkungskategorien nach ReCiPe2016	Beispielhafte Produkteigenschaften mit positiven Wirkungen
	Das Produktsystem...
Klimaänderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bindet Treibhausgase aus der Atmosphäre.</li> <li>• verhindert die Freisetzung von Treibhausgasen.</li> </ul>
Ozonabbau in der Stratosphäre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bindet ozonschichtschädigende Substanzen aus der Atmosphäre.</li> <li>• verhindert die Freisetzung ozonschichtschädigende Substanzen.</li> </ul>
Ionisierende Strahlung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• verhindert die Freisetzung ionisierender Strahlung.</li> <li>• neutralisiert ionisierende Strahlung.</li> </ul>
Bildung von Feinstaub	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bindet Feinstaub (oder respiratorische anorganische Stoffe) aus der Atmosphäre.</li> <li>• verhindert die Freisetzung von Feinstaub.</li> </ul>
Photochemische Ozonbildung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bindet Vorläufersubstanzen der photochemischen Ozonbildung aus der Atmosphäre.</li> <li>• bindet Ozon.</li> <li>• verhindert die Freisetzung von Vorläufersubstanzen der photochemischen Ozonbildung.</li> </ul>
Terrestrische Versauerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• neutralisiert versauerte Böden.</li> <li>• verhindert die Freisetzung von Emissionen, die zur Versauerung beitragen.</li> </ul>
Frischwasser Eutrophierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• verhindert Nährstoffeinträge in die Ökosysteme.</li> <li>• reinigt Gewässer und gewinnt Nährstoffe zurück.</li> </ul>
Humantoxizität	<ul style="list-style-type: none"> <li>• entgiftet den menschlichen Körper.</li> <li>• verhindert die Aufnahme von humantoxischen Substanzen.</li> </ul>
Ökotoxizität	<ul style="list-style-type: none"> <li>• entgiftet Ökosysteme oder die Organismen darin.</li> <li>• verhindert die den Eintrag von toxischen Substanzen in Ökosysteme.</li> </ul>
Landnutzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• renaturiert vom Menschen veränderte Flächen.</li> <li>• schützt bedrohte Tierarten auf genutzten Flächen.</li> </ul>
Wassernutzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Siehe Kapitel 5.4.5 zur Kreislauffähigkeit</li> </ul>
Ressourcenverknappung: mineralisch & fossil	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Siehe Kapitel 5.4.5 zur Kreislauffähigkeit</li> </ul>

Bei der Wirkungskategorie der **ionisierenden Strahlung** zeigt sich der mögliche positive Einfluss durch die Neutralisierung von Strahlung oder die Verhinderung ihrer Freisetzung. In der Kategorie **photochemische Ozonbildung** mindert das Produktsystem die Vorläufersubstanzen dieser Reaktionen, indem es sie entweder aus der Atmosphäre bindet oder deren Emission verhindert, wodurch die schädliche bodennahe Ozonbildung reduziert wird. Die **Versauerung** wird durch die Neutralisierung saurer Böden oder die Vermeidung von Emissionen, die zur Versauerung beitragen, positiv beeinflusst. Im Bereich der **Frischwasser Eutrophierung** unterstützt das Produktsystem durch die Verhinderung von Nährstoffeinträgen in empfindliche Ökosysteme oder die Rückgewinnung und Reinigung von Nährstoffen aus Gewässern. Im Zusammenhang mit der

**Ökotoxizität** könnte sich das Produktsystem durch die Entgiftung von Ökosystemen oder die Vermeidung der Aufnahme ökotoxischer Substanzen durch Organismen positiv auszeichnen. Die **Landnutzung** wird positiv beeinflusst, indem das Produktsystem bedrohte Tierarten schützt oder vom Menschen beeinträchtigte Flächen renaturiert. Die Wirkungskategorie **Ressourcenverknappung** wird im Kapitel 5.4.5 zur Kreislauffähigkeit näher besprochen.

Die Einteilung in die **gelbe und rote Kategorie** (Tabelle 5-4) erfolgt auf Grundlage der vorhandenen ökologischen Kompensationsmaßnahmen sowie der Einschätzung, ob die Wirkungen in den jeweiligen Wirkungskategorien als reversibel betrachtet werden können (siehe Kapitel 3.4.2). Es wird berücksichtigt, ob die negativen Effekte durch geeignete Maßnahmen rückgängig gemacht oder abgemildert werden können. In den drei Wirkungskategorien **Humantoxizität, ionisierende Strahlung und Ökotoxizität können irreversible Schäden** für Mensch und Umwelt auftreten, weshalb sie der **roten Kategorie** zugeordnet werden. Da diese negativen Wirkungen nicht kompensiert werden können, müssen sie durch den PIOL **vollständig vermieden** werden.

In den übrigen Wirkungskategorien konnten entsprechend **wirkungsgerechte Kompensationsmaßnahmen** identifiziert werden, wodurch die **gelbe Kategorie** entsteht. Auch wenn die negativen Wirkungen hier zunächst weitestgehend vermieden und reduziert werden sollten, ist eine Kompensation der verbleibenden negativen Wirkungen im Rahmen des PIPE-Modells möglich. Die Kompensationsansätze zielen darauf ab, in der jeweiligen Wirkungskategorie die ökologischen Schäden zu verhindern und durch Überkompensation sogar einen positiven Beitrag zur Reduktion vorhandener Schäden zu leisten. Die Wirkungskategorie **Klimaänderung** verfügt über ein besonders breites Spektrum an Kompensationsmaßnahmen, die bereits umfassend in der Praxis implementiert werden. Diese wurden bereits in Tabelle 3-10 ausführlich behandelt. Kompensationsmaßnahmen für die übrigen Wirkungskategorien wurden aus Tabelle 3-11 übernommen. In der Wirkungskategorie **Ozonabbau** liegt der Schwerpunkt auf dem Ersetzen ineffizienter Kühlgeräte und der Zerstörung ozonschichtschädigender Substanzen aus Klimaanlage und Kühlschränken. Eine beschleunigte Umsetzung des Montreal-Protokolls spielt hierbei ebenfalls eine zentrale Rolle. In der Kategorie **Feinstaub und respiratorische anorganische Stoffe** sind technische Filteranlagen entscheidend für die Reduktion von Emissionen, ergänzt durch die Vermeidung von Müll- und Holzverbrennung. Die **photochemische Ozonbildung** kann durch die Vermeidung von Vorläufersubstanzen kompensiert werden, während zur Bekämpfung der **Versauerung** vor allem die Kalkung von Böden wirksam ist. Maßnahmen gegen **Eutrophierung** beinhalten die Vermeidung von Nährstoffeinträgen sowie die Renaturierung von Feuchtgebieten. Im Bereich **Landnutzung** sind Renaturierung und der Schutz gefährdeter Ökosysteme sowie die Mehrfachnutzung von Flächen zentrale Maßnahmen zur Kompensation. Die Maßnahmen zur Kompensation im Bereich der **Ressourcenverknappung**, werden ebenfalls in Kapitel 5.4.5 diskutiert.

Tabelle 5-4: Kategorisierung der negativen Wirkungen für die ökologische Wirkungsbeurteilung im PIOL

Wirkungskategorien nach ReCiPe2016	Mögliche Kompensationsmaßnahmen mit weiterführenden Verweisen
Klimaänderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Methan-Vermeidung durch Gas auffangsysteme an Kläranlagen, Mülldeponien oder landwirtschaftlichen Systemen</li> <li>• Investition in erneuerbare Energien, um die Nutzung fossiler Brennstoffe zur Stromerzeugung zu vermeiden</li> <li>• Installation energieeffizienter Beleuchtung zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen durch Stromnutzung</li> <li>• Verwendung von Abwärme aus der Industrie zur Beheizung von Gebäuden oder zur Stromerzeugung</li> <li>• Bereitstellung effizienter Kochöfen in Entwicklungsländern zur Reduktion des Brennstoffbedarfs in Privathaushalten</li> <li>• Aufforstung und Wiederaufforstung: Pflanzung neuer Bäume oder Wiederherstellung von Wäldern, die CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre binden</li> <li>• Schutz von Waldgebieten: Verringerung von Emissionen aus Entwaldung und Waldschädigung (englisch: REDD+)</li> <li>• Moor- und Torferhaltungsprojekte: Schutz und Wiederherstellung von Mooren, die CO<sub>2</sub> speichern</li> <li>• CCS: Technologien, die CO<sub>2</sub> aus Industrieabgasen oder direkt aus der Luft abscheiden und sicher speichern, beispielsweise in erschöpften Öl- und Gasfeldern</li> </ul>
Ozonabbau in der Stratosphäre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ersetzen ineffizienter Kühlgeräte [DMAF24]</li> <li>• Sammlung und Zerstörung ozonschichtschädigender Substanzen aus Klimaanlage, Kühlschränken und industrieller Produktion [DMAF24]</li> <li>• Beschleunigung der Reduktion ozonschichtschädigender Substanzen als im Montreal-Protokoll vorgeschrieben [DMAF24]</li> </ul>
Bildung von Feinstaub	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einbau technischer Filteranlagen bei anderen Emittenten [JHTL23]</li> <li>• Verhinderung von Müllverbrennung [Esko21]</li> <li>• Reduktion von Kohle und Holzverbrennung in Haushalten durch effizientere Öfen, Substitution von Brennstoffen, Wärmedämmung und energieeffiziente Beleuchtung [Esko21]</li> <li>• Pflanzen zur Luftreinigung [FrSa07, Gree20, Thön06]</li> </ul>
Photochemische Ozonbildung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potenziell: Vermeidung der Vorläufersubstanzen der photochemischen Ozonbildung an anderen Quellen</li> </ul>
Terrestrische Versauerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kalkung von Böden [Bund17, Fvaf13, RSER14]</li> <li>• Waldbauliche Maßnahmen [Bund17]</li> <li>• Potenziell: Vermeidung und Reduktion der ursächlichen Emissionen an anderen Quellen</li> </ul>
Frischwasser Eutrophierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vermeidung der Nährstoffeinträge in die Ökosysteme durch veränderte Landwirtschaft und Landnutzung [Euro16]</li> <li>• Anlegen von Muschelfarmen zur Nährstoffbindung [GrLL09]</li> <li>• Abwasserreinigung [Euro16]</li> <li>• Renaturierung von Feuchtgebieten als Nährstoffsinken [Euro16, GrEJ97, GrSW97]</li> <li>• Potenziell: Vermeidung der Nährstoffeinträge aus anderen Quellen</li> </ul>
Landnutzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Renaturierung, Begrünung, Entsiegelung von Flächen [Nabu07]</li> <li>• Gewässerverbessernde Maßnahmen [Nabu07]</li> <li>• Habitatprojekte für bedrohte Tierarten [BiKn16]</li> <li>• Schutzgebiete [BiKn16]</li> <li>• Mehrfachnutzung von Flächen [Bioö24]</li> </ul>

Wirkungskategorien nach ReCiPe2016	Mögliche Kompensationsmaßnahmen mit weiterführenden Verweisen
Wassernutzung	• Siehe Kapitel 5.4.5 zur Kreislauffähigkeit
Ressourcenverknappung: mineralisch & fossil	• Siehe Kapitel 5.4.5 zur Kreislauffähigkeit
Ionisierende Strahlung	• Nicht kompensierbar, da irreversible Schäden entstehen können
Humantoxizität	
Ökotoxizität	

Diese Einteilungen sollen einen Überblick über die Beurteilung und der damit verbundenen Kategorisierung der Wirkungen in der ökologischen Dimension bieten. Da insbesondere in frühen Phasen des PEP keine oder kaum Informationen über spätere Wirkungen des Produktsystems bereitstehen, werden noch andere Sichtweisen zur **frühen Wirkungsbeurteilung** notwendig. Dazu sei an dieser Stelle auf die **Systemsicht** in Kapitel 5.4.5 verwiesen.

### 5.4.3 Wirkungsbeurteilung sozialer Aspekte

In den Anforderungen an das PIPE-Modell, wird neben den ökologischen auch die Berücksichtigung der sozialen Aspekte gefordert (Tabelle 4-5: 2.2). Die Wirkungsbeurteilung unterscheidet sich jedoch in der sozialen Dimension, da hier **keine Kompensationen erlaubt** sind und somit **keine gelbe Kategorie** besteht. Wie in Kapitel 3.4.3 beschrieben, betonen auch die S-LCA Guidelines [UBSL20], dass positive soziale Auswirkungen nicht mit negativen Auswirkungen aggregiert werden dürfen, selbst wenn sie zur gleichen Wirkungskategorie gehören. Positive Effekte auf bestimmte Personen können negative Auswirkungen auf andere Personen nicht ausgleichen. Aus diesem Grund sind Kompensationsmaßnahmen weder im S-LCA, noch in PIPE vorgesehen und werden nicht akzeptiert. Daher werden die sozialen Wirkungen im Rahmen von PIPE nur in **positive Wirkungen, die gefördert werden sollen, und negative Wirkungen, die vollständig vermieden werden müssen**, unterteilt. Diese Einteilung in die grüne und rote Kategorie ist in Tabelle 5-5 entsprechend den **Stakeholdern und Wirkungskategorien der S-LCA Guidelines** (Tabelle 3-4) vorgenommen worden. Grundsätzlich müssen durch die ganzheitliche Analyse des PIPS im PIOL alle Stakeholder identifiziert und die sozialen Auswirkungen auf diese aufgezeigt werden. Im nächsten Schritt sollten negative, nicht akzeptable Auswirkungen, wie beispielsweise das Auftreten von Kinderarbeit, Diskriminierung oder Gesundheitsrisiken, durch die Anpassung des Produktsystems vermieden werden. Dies kann auch durch Veränderungen in den Lieferketten oder die Etablierung entsprechender Schutzmaßnahmen erreicht werden. Durch die **aktive Vermeidung** solcher negativer Wirkungen wird gleichzeitig die Einhaltung der ILO-Kernarbeitsnormen sichergestellt (vgl. Kapitel 3.2.3). Neben der in PIPE verpflichtenden Vermeidung negativer sozialer Auswirkungen besteht die Möglichkeit, durch **zusätzliche Maßnahmen** oder das Produktsystem selbst **positive Auswirkungen auf die Gesellschaft** zu erzielen. Solche positiven

Auswirkungen wurden bereits im Rahmen der inhärenten positiven Produkteigenschaften (Tabelle 5-1) und den Social Handprints (Tabelle 3-12) auszugsweise dargestellt und werden nun systematisch in der grünen Spalte in Tabelle 5-5 aufgelistet. Darin sind auch vielfache Möglichkeiten aufgezeigt, wie durch zusätzliche Maßnahmen und Projekte positive Effekte für die Gesellschaft geschaffen werden können.

Da die Tabelleneinträge selbsterklärend sind, wird auf eine ausführliche Beschreibung im Text verzichtet. In Abgrenzung zur Tabelle 3-4 ist anzumerken, dass die Wirkungskategorie zu Kleinbauern aufgrund des Fokus auf technische Produkte ausgeschlossen wurde. Außerdem wird die Verantwortung am EoL in Kapitel 5.4.5 und der Beitrag zur wirtschaftlichen Entwicklung in Kapitel 5.4.4 diskutiert. In Fällen, in denen keine relevanten sozialen Wirkungen oder geeignete Kompensationsmaßnahmen identifiziert werden konnten, bleiben die entsprechenden Felder in der Tabelle ohne Eintrag. Es ist wichtig zu betonen, dass viele der Wirkungskategorien sich gegenseitig bedingen oder sich inhaltlich überschneiden. Darüber hinaus sind die Erfassung und Bewertung sozialer Auswirkungen oft von **hoher Subjektivität** geprägt und somit nur schwer eindeutig messbar. Soziale Wirkungen können in **Abhängigkeit vom kulturellen Kontext** unterschiedlich wahrgenommen werden. Kulturelle, ethische und soziale Normen variieren weltweit, was eine objektive Beurteilung erschwert. Während in einigen Gesellschaften bestimmte Praktiken als sozial akzeptabel gelten, werden sie in anderen als problematisch wahrgenommen. Dies erschwert es, eine universelle Beurteilungsgrundlage für soziale Wirkungen zu entwickeln, weswegen Tabelle 5-5 wiederum als ein Vorschlag angesehen werden kann.

Tabelle 5-5: Kategorisierung der Wirkungen für die soziale Wirkungsbeurteilung im PIOL

Stakeholder	Wirkungskategorien	Positive Wirkungen	Negative Wirkungen
Arbeitnehmer	Vereinigungsfreiheit und Tarifverhandlungen	Stärkung der Arbeitnehmerrechte, verbesserte Arbeitsbedingungen	Unterdrückung von Gewerkschaften, mangelnde Rechte
	Kinderarbeit	Schutz und Bildung von Kindern, Förderung der Kinderrechte	Kinderarbeit, Ausbeutung von Kindern
	Faires Gehalt	Gerechte Entlohnung, Verbesserung des Lebensstandards	Niedriglöhne, Gehälter unter Mindestlohn
	Arbeitszeiten	Verbesserung der Work-Life-Balance	Nichteinhaltung der Arbeitszeitgesetze und Pausenzeiten
	Zwangsarbeit		Ausbeutung und Missbrauch von Arbeitskräften
	Gleichberechtigung/ Diskriminierung	Projekte zur Förderung von Gleichheit, Diversität und Inklusion	Diskriminierung, ungleiche Behandlung oder Bezahlung
	Gesundheit und Sicherheit	Betriebliche Gesundheitsförderung, sichere Arbeitsumgebung	Unzureichender Arbeitsschutz, gesundheitliche Risiken
	Sozialleistungen/ soziale Sicherheit	Zugang zu Sozialleistungen und Versicherungen	Fehlende soziale Absicherung
	Beschäftigungsverhältnis	Schaffung langfristiger Perspektiven	Prekarität, unsichere Arbeitsverhältnisse
	Sexuelle Belästigung	Gewährleistung eines respektvollen Arbeitsumfelds	Sexuelle Belästigungen
Lokale Bevölkerung	Zugang zu materiellen Ressourcen	Zugang zu Nahrungsmitteln, Energie, Mobilität und Wasser	Förderung von Armut, Gefährdung der Trinkwasserversorgung, Schädigung der Infrastruktur, ...
	Zugang zu immateriellen Ressourcen	Zugang zu Bildung, Wissen und Internet	Isolation von immateriellen Ressourcen
	Delokalisierung und Migration		Erzwungene Delokalisierung und Migration
	Kulturelles Erbe	Erhalt und Förderung kultureller Traditionen	Verlust kultureller Identität
	Sichere und gesunde Lebensbedingungen	Verbesserung der Lebensqualität und Hygiene, Zugang zu Gesundheitsdiensten	Verschmutzung, unsichere Lebensbedingungen, fehlende Hygiene
	Wahrung der Rechte indigener Völker	Stärkung indigener Gemeinschaften	Vertreibung, Verlust traditioneller Lebensweisen
	Gemeinschaftliches Engagement	Förderung des sozialen Zusammenhalts, gemeinschaftliche Projekte	Isolation, Mangel an sozialer Verantwortung
	Lokale Beschäftigungsquote	Erhöhung der lokalen Arbeitsmöglichkeiten	Förderung der Arbeitslosigkeit
	Stabile Lebensbedingungen	Langfristige Sicherheit durch Arbeitsplätze und Einkommen	Verlust von Lebensgrundlagen durch wirtschaftliche Instabilität

Stakeholder	Wirkungskategorien	Positive Wirkungen	Negative Wirkungen
Akteure der Wertschöpfungskette (exkl. Konsumenten)	Fairer Wettbewerb		Marktmonopole, unlauterer Wettbewerb
	Förderung der sozialen Verantwortung	CSR-Initiativen, Sorgfaltspflicht	Vernachlässigung der sozialen Verantwortung
	Lieferantenverhältnisse	Langfristige Partnerschaften, faire Geschäftsbedingungen	Ausbeutung von Lieferanten
	Wahrung der Rechte an geistigem Eigentum	Förderung von Innovationen und Patenten	Plagiate, Verletzung von Urheberrechten
	Wohlstandsverteilung	Gerechte Vermögensverteilung	Ungleiche Gewinnverteilung
Konsumenten	Gesundheit und Sicherheit	Zugang zu sicheren und gesunden Produkten	Gesundheitsrisiken, unsichere Produkte
	Feedbackmöglichkeiten	Umfangreicher Kundenservice	Ignorieren von Kundenfeedback
	Privatsphäre der Konsumenten	Umfangreicher Datenschutz	Missbrauch persönlicher Daten
	Transparenz		Mangelnde Transparenz, irreführende Informationen
Gesellschaft	Öffentliche Verpflichtungen zu Nachhaltigkeitsthemen	Stärkung des öffentlichen Bewusstseins für Nachhaltigkeit	Vernachlässigung nachhaltiger Praktiken
	Vorbeugung und Vermeidung von bewaffneten Konflikten	Friedensförderung, Stabilität in der Gemeinschaft	Konflikte, Gewalt
	Technologieentwicklung	Innovation und Verbesserung der Lebensqualität	Erzwungener technologischer Rückstand, Abhängigkeit
	Korruption	Stärkung von Transparenz und Integrität, Meldeverfahren	Missbrauch von Macht, Ungerechtigkeit
	Ethische Behandlung von Tieren	Förderung von Tierschutz und artgerechter Haltung	Tierquälerei, Missbrauch von Tieren
	Armutsbekämpfung	Verbesserung des Lebensstandards, Zugang zu Ressourcen	Förderung von Armut und sozialer Ungleichheit
Kinder	Bildung in der lokalen Gemeinschaft	Zugang zu Bildung und Entwicklungsprogrammen	
	Gesundheitsrisiken für Kinder als Konsumenten	Zugang zu gesunden Produkten	Gesundheitsschäden durch ungesunde Produkte
	Bedenken hinsichtlich der Marketingpraktiken	Schutz der Kinder vor manipulativen Marketingstrategien	Ausbeutung von Kindern durch unethisches Marketing

#### 5.4.4 Wirkungsbeurteilung ökonomischer Aspekte

Im PIPE-PEP sollen außerdem auch die ökonomischen Nachhaltigkeitsaspekte betrachtet werden (Tabelle 4-5: 2.3). Im Grundlagenkapitel 2.1.4 wurde bereits thematisiert, dass es bislang an einer klaren Definition von ökonomischer Nachhaltigkeit mangelt. Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen der globalen Wirtschaftssysteme und der zahlreichen Perspektiven auf die ökonomischen Aspekte von Produktsystemen, kann im Rahmen dieser Arbeit **keine umfassende Beurteilung der ökonomischen Nachhaltigkeit** erfolgen. Dies lässt sich auch durch das Fehlen geeigneter Analyse- und Synthesemethoden begründen. In Kapitel 3.2.4 und 3.3.4 wurde gezeigt, dass die vorhandenen Methoden auf Produktebene sich in erster Linie auf die Kostenplanung und -berechnung konzentrieren. Zudem wurden noch entsprechende Methoden auf Geschäftsmodellebene vorgestellt, die ebenfalls im PIOL eingesetzt werden können. Der PIPE-PEP zielt daher aus ökonomischer Sicht darauf ab, Produktsysteme zu entwickeln, die **Unternehmen** entsprechend dem Brundtland-Bericht [Unit87], **über einen längeren Zeitraum hinweg erhalten, um somit Lebensqualität und Wohlstand zu gewährleisten**. Grundlegende Voraussetzungen im aktuellen Wirtschaftssystem sind hierfür **wirtschaftlich tragfähige Geschäftsmodelle und das Erzielen von Gewinnen**. Dabei müssen die Erlöse, die das Unternehmen durch ein Geschäftsmodell erzielt, die Gesamtkosten des Unternehmens übersteigen. Entsprechende Methoden zur Gestaltung und Bewertung solcher Geschäftsmodelle wurden in Kapitel 3.3.4, beispielsweise mit dem Phasenmodell nach Ahrend [Ahre16] oder dem TLBMC [JoPa16], vorgestellt.

In der ökonomischen Wirkungsbeurteilung fokussiert sich diese Arbeit ausschließlich auf die Perspektive des Unternehmens, da sie im Vergleich zur Sichtweise der Endkunden eine klar messbare und methodisch besser handhabbare Grundlage für die Analyse im PEP bietet. Auf Produktebene lässt sich dies mit den vorgestellten **Lebenszykluskosten** aus dem LCC und dem **Target Costing** beurteilen. Dazu dürfen die Lebenszykluskosten auf Unternehmensseite, bestehend aus Planungs-, Entwicklungs-, Herstell- und Kompensationskosten (siehe Abbildung 3-36) den durch Target Costing festgelegten Zielpreis (Abbildung 3-20) nicht überschreiten. Ein **Überschreiten dieses Zielpreises würde eine ökonomische Unvereinbarkeit** signalisieren. In diesem vereinfachten Kostenabgleich besteht für Produktentwickler eine **praktikable Möglichkeit zur ökonomischen Beurteilung des Produktsystems** innerhalb des PIOL.

Andere ökonomische Aspekte zum Beispiel aus **Sicht des Endkunden oder der Weltwirtschaft wurden in dieser Arbeit nicht betrachtet**, da deren Erfassung und Bewertung außerhalb des direkten Einflussbereichs des Unternehmens liegt und somit methodisch schwieriger umzusetzen ist. Die ökonomische Nachhaltigkeit aus der Perspektive des Endkunden erfordert eine differenzierte Analyse der Verbraucherkosten über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg, was oft stark von individuellen Konsumgewohnheiten, regionalen Marktbedingungen und Preisentwicklungen abhängt. Diese Variablen sind schwer vorhersehbar und in einem vereinfachten Modell nur unzureichend allgemeingültig darstellbar. Ebenso ist der Beitrag des Produktsystems zur allgemeinen wirtschaftlichen Entwicklung, wie etwa zur Förderung von Wirtschaftswachstum oder zur Verstärkung von Instabilität und Ungleichheit, ein makroökonomisches Thema, das nicht

ohne weiteres auf die Mikroebene eines einzelnen Unternehmens oder Produkts heruntergebrochen werden kann. Diese makroökonomischen Auswirkungen sind von zahlreichen externen Faktoren abhängig und erfordern eine umfangreichere Betrachtung, die den Rahmen der vorliegenden Arbeit überschreiten würde. Diese Aspekte werden teilweise auch durch die soziale Wirkungsbeurteilung in Kapitel 5.4.3 abgedeckt, da es hier bedeutende Wechselwirkungen mit der ökonomischen Dimension gibt. So hat beispielsweise die Schaffung von Arbeitsplätzen nicht nur soziale, sondern auch ökonomische Relevanz, da sie zur Stärkung der regionalen Wirtschaft beiträgt und gleichzeitig das Einkommen der Arbeitnehmer und deren Kaufkraft auf sozialer Ebene steigert.

#### 5.4.5 Wirkungsbeurteilung von Aspekten der Kreislauffähigkeit aus Systemsicht

Zuletzt werden für eine ganzheitliche Herangehensweise im PIOL die Aspekte der Kreislauffähigkeit betrachtet (Tabelle 4-5: 2.4). Auch hier bestehen wiederum zahlreiche Wechselwirkungen und Überschneidungen zu den zuvor besprochenen Dimensionen der Nachhaltigkeit. Um die vielfältigen Aspekte der Kreislaufwirtschaft im Kontext eines Produktsystems übersichtlich darzustellen, wird in Abbildung 5-7 eine **Systemsicht** gezeigt. Darin sind die möglichen **Inputs und Outputs des Produktsystems jeweils den drei Ampelfarben** zugeordnet. In der Mitte sind den Elementen des PIPS die vorgestellten **Werterhaltungsoptionen (R0 bis R9)** aus Tabelle 3-7 zugeordnet. Diese Systemsicht erlaubt unter anderem das zu entwickelnde **PIPS als Blackbox** darzustellen und in frühen Phasen des PEP nur die notwendigen In- und Outputs anhand folgender Beurteilung zu bewerten.

Auf In- und Outputseite werden im Sinne der Kreislauffähigkeit in erster Linie **Materialflüsse** untersucht. Im Rahmen der Wirkungsbeurteilung für PIPE werden jedoch auch **Energie, Emissionen und weitere Aspekte in der Systemperspektive** ausgegriffen, auch wenn es teilweise zu Überschneidungen mit der ökologischen Wirkungsbeurteilung kommt. Die jeweiligen Flüsse werden in die verschiedenen Kategorien eingeteilt: **Positive Flüsse (grün), bedingt akzeptable Flüsse (gelb) und strikt zu vermeidende Flüsse (rot)**. Die Zuordnung ergibt sich aus dem Stand der Forschung (Kapitel 3.2.5 und 3.3.5) und den Beispielen positiver Effekte in einer Kreislaufwirtschaft (Tabelle 3-13). Aufgrund der großen Vielfalt möglicher Stoff- und Energieflüsse wird die Kategorisierung bewusst auf einem **möglichst allgemeingültigen Niveau** gehalten. Die In- und Outputseite werden im Folgenden jeweils kurz beschrieben. Dabei kann es vorkommen, dass bestimmte Flüsse auf der Inputseite positiv bewertet, jedoch auf der Outputseite negativ beurteilt und folglich strikt vermieden werden sollten. So wird beispielsweise die Aufnahme von Schadstoffen aus der Umwelt in das Produktsystem positiv bewertet, während deren Abgabe an die Umwelt negativ beurteilt wird.

Wie in Abbildung 5-7 auf der linken Seite gezeigt, zählen zu den **positiv beurteilten Inputs (grüne Kategorie)** in das Produktsystem im Sinne der Kreislaufwirtschaft in erster Linie Sekundärmaterialien, also recycelte Materialien, die wiederverwendet werden können, um den Ressourcenverbrauch zu minimieren. So kann auch die Nutzung von Abfällen und Altlasten als Rohstoffe für das

PIPS als positiv bewertet werden. Analog zu der Aufnahme von Gift- und Schadstoffen oder ionisierender Strahlung aus der Umwelt können durch solche Inputs bestehende Umweltschäden reduziert werden. Emissionen, wie beispielsweise Treibhausgase, sollten in der Atmosphäre ebenfalls minimiert werden. Auch verschmutztes oder kontaminiertes Wasser zählt zu den positiv bewerteten Inputs. Bei all diesen zunächst schädlich klingenden Flüssen geht es darum, die **Konzentration in der Umwelt zu verringern** und diese im **Produktsystem zu binden, zu nutzen oder unschädlich zu machen**, sodass diese das PIPS nicht mehr in schädlicher Form verlassen. Im Bereich der Energieflüsse ist der Einsatz von erneuerbarer Energie positiv zu bewerten. Hierzu zählen beispielsweise Wasserkraft, Windkraft, Solarenergie oder Geothermie. **Bedingt akzeptable Inputs (gelbe Kategorie)** beinhalten Material- und Energieflüsse, die nur unter bestimmten Voraussetzungen in das System eingebracht werden dürfen. Dazu gehören Primärmaterialien aus erneuerbaren, aber nachhaltig bewirtschafteten Quellen, die nur dann eingesetzt werden sollten, wenn ihre Gewinnung verantwortungsvoll und langfristig tragfähig erfolgt. Auch die Nutzung nicht erneuerbarer Energien kann unter Umständen akzeptiert werden, wenn entsprechende Kompensationsmaßnahmen getroffen werden, um die damit verbundenen negativen Auswirkungen mindestens zu neutralisieren. Der Einsatz dieser Flüsse sollte stets kritisch hinterfragt und nur in Ausnahmefällen vorgenommen werden. **Strikt zu vermeidende negative Inputs (rote Kategorie)** umfassen Primärmaterialien aus fossilen und mineralischen, nicht erneuerbaren Quellen. Der Einsatz solcher Materialien führt zu einem hohen Ressourcenverbrauch und trägt zur Erschöpfung natürlicher Reserven bei. Auch Primärmaterialien aus erneuerbaren Quellen, die jedoch nicht nachhaltig bewirtschaftet werden, gehören zu dieser Kategorie, da ihre Gewinnung langfristig negative Auswirkungen auf Ökosysteme und die Umwelt hat. Ebenso ist der Einsatz von nicht erneuerbarer Energie ohne entsprechende Kompensation kritisch zu betrachten, da dies zu weiteren umweltbelastenden Effekten führt. Diese Inputs müssen daher strikt vermieden werden, um die Nachhaltigkeit des PIPS sicherzustellen.

Die rechte Seite von Abbildung 5-7 stellt die **Beurteilung der möglichen Outputs** des Produktsystems an die Umgebung dar. **Positive Outputs (grüne Kategorie)** sind solche, die die Umwelt und die Gesellschaft positiv beeinflussen und keinen schädlichen Einfluss haben. Im Kontext der Kreislaufwirtschaft zählen dazu insbesondere Sekundärmaterialien, die ohne Qualitätsverlust vollständig wiederverwertet werden können und dabei ihre Funktionalität sowie ihre ursprünglichen Eigenschaften bewahren. Diese können in anderen Systemen als positive Inputs dienen und minimieren dadurch den Bedarf an neuen Ressourcen. Weiterhin ist die Abgabe von sauberem Wasser, sauberer Luft/Sauerstoff und sauberer Energie ein positiver Output, da diese wertvolle Ressourcen für das Leben auf der Erde darstellen. Ein weiteres Beispiel ist die kontrollierte Abgabe von Nährstoffen und biologischen Abfällen, die unter geeigneten Bedingungen in landwirtschaftliche Prozesse zurückgeführt werden können, um natürliche Zyklen im Sinne von C2C zu unterstützen. Die unkontrollierte Abgabe von Nährstoffen und biologischen Abfällen kann zu Umweltbelastungen, wie Eutrophierung führen, weswegen diese zu den **bedingt akzeptablen Outputs (gelbe Kategorie)** zählt. Ebenfalls zu dieser Kategorie gehören Sekundärmaterialien mit

Qualitätsverlusten, die zwar wiederverwendet werden können, aber nicht die gleiche Funktionalität wie das ursprüngliche Material besitzen und daher möglicherweise weniger effizient oder nur eingeschränkt einsetzbar sind. Die Abgabe von Emissionen an die Umwelt ist nur erlaubt, wenn diese durch zusätzliche Maßnahmen wirkungsgerecht überkompensiert werden. **Strikt zu vermeidende Outputs (rote Kategorie)** umfassen Outputs, die erhebliche negative Auswirkungen auf die Umwelt oder die Gesellschaft haben und daher unter allen Umständen vermieden werden müssen. Dazu gehören nicht weiter nutzbare technische Materialien oder Abfälle, die nicht weiterverwertet werden können und somit die Ressourcenbelastung sowie die Abfallmenge erhöhen. Auch die Freisetzung von Gift- und Schadstoffen zählt zu den Outputs, die nicht akzeptabel sind, da sie langfristige gesundheitliche und ökologische Schäden verursachen können. Die Stoffe der REACH-Verordnung [Euro06, Regu22] bieten hier beispielsweise einen Anhaltspunkt. Emissionen ohne entsprechende Kompensation sind ebenfalls nicht erlaubt. Die Freisetzung von Strahlung und die Abgabe von verschmutztem oder kontaminiertem Wasser stellen ebenso gravierende Risiken für die Umwelt und die Gesundheit dar und müssen folglich auf Outputseite des PIPS vermieden werden.

Mittig in Abbildung 5-7 ist das Produktsystem in vereinfachter Form dargestellt, um die potenziellen **Werterhaltungsoptionen R0 bis R9** aus Tabelle 3-7 zu visualisieren. Dabei ist das Vermeiden und Reduzieren (R0, R1) von Material- und Energieeinsätzen grundsätzlich im gesamten PIPS anzuwenden. R2 bis R4 sind zentral bei der Nutzungs- und Wartungsphase des Produkts platziert. Beim Remanufacturing (R5) wird das Produkt in der Regel zerlegt und fließt zumindest teilweise wieder zurück in die Produktion. Das materielle Recycling (R7) erfordert einen weiter gefassten Kreislauf, der entweder als Input in das PIPS, zurück in den Lebenszyklus des Produkts selbst oder als Output in andere Systeme fließen kann. Zum Output zählen auch die Werterhaltungsoptionen R6 und R8, bei denen Produkte in einem anderen System eine neue Funktion erfüllen oder der stoffliche Energieinhalt thermisch verwertet wird. Auf der Inputseite ermöglicht das Remining (R9) die Gewinnung von Ressourcen aus bereits deponiertem Abfall. Mit dieser Beschreibung auf Systemebene können die wichtigsten Aspekte der Kreislauffähigkeit des PIPS beurteilt und die möglichen Werterhaltungsoptionen darin abgebildet werden.

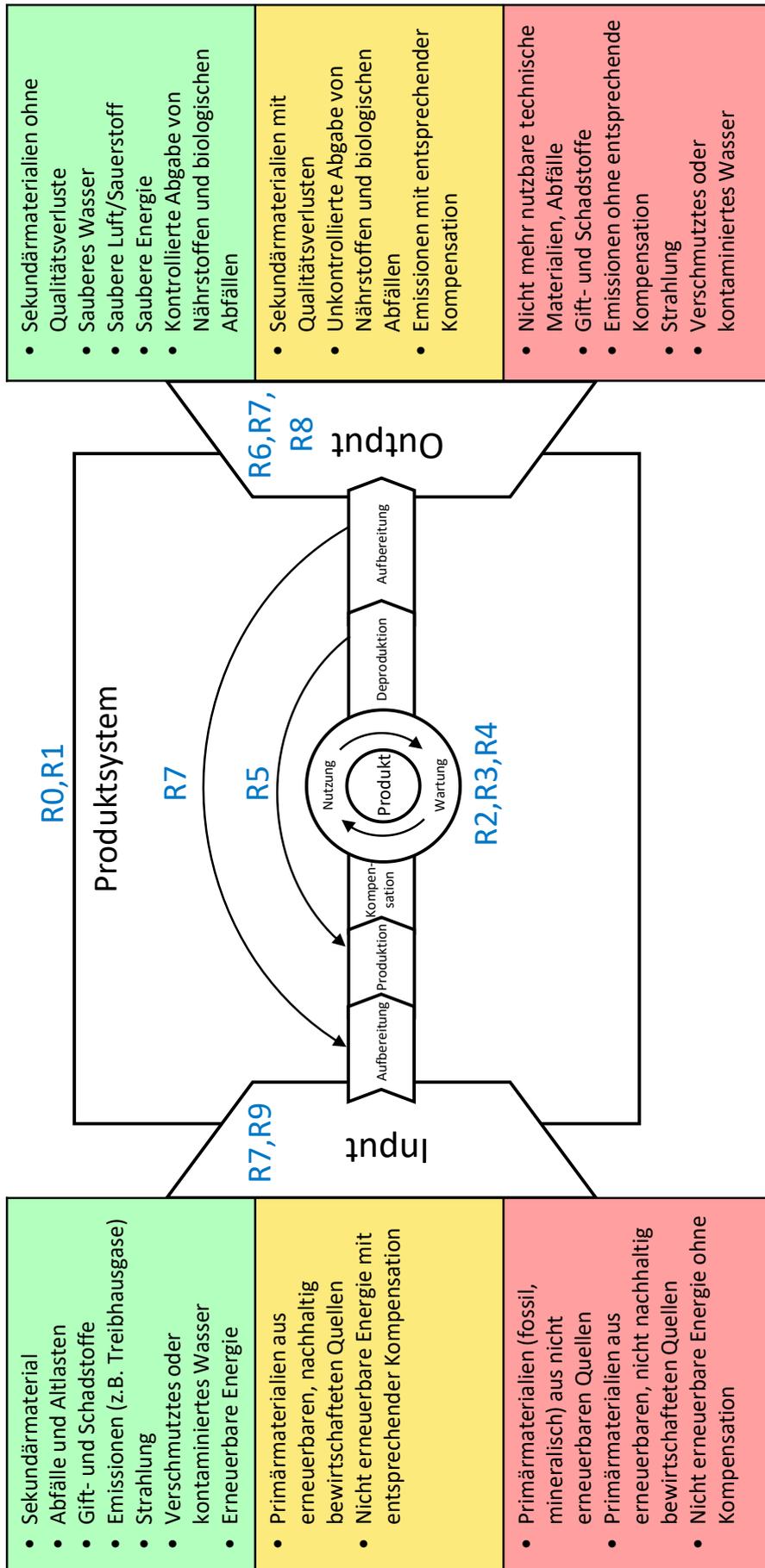


Abbildung 5-7: Systemsicht und Wirkungsbeurteilung der Kreislaufaspekte im PIOL

#### 5.4.6 Methodensammlung und Methodenauswahl

Bevor der PIPE-PEP detailliert vorgestellt wird, erfolgt noch ein **Überblick über die darin eingesetzten Methoden**, der zeitgleich eine **Hilfestellung zur effektiven Auswahl geeigneter Methoden** im Verlaufe des PEP bietet. In Abgrenzung zu Kapitel 4.1, in dem nur die wichtigsten Methoden des Stands der Forschung bewertet wurden, werden hier alle erwähnten Methoden und Ansätze aus Kapitel 3.2 und 3.3 aufgelistet. Auch wenn nicht alle Methoden bei der Anwendung des PIPE-Modells genutzt werden müssen, entsteht hierdurch eine breite Auswahl an potenziell nützlichen Methoden.

Entsprechend dem Aufbau des PIPE-Modells werden diese in **Synthesemethoden** (Tabelle 5-6) und **Analysemethoden** (Tabelle 5-7) aufgeteilt. Zusätzlich werden die einzelnen Methoden bestimmten **Methodengruppen** zugeordnet und erhalten eine Kurzbezeichnung, die in der Beschreibung der vier Hauptphasen des PIPE-PEP (Kapitel 5.5) verwendet wird, um die Methoden den einzelnen PEP-Phasen zuzuordnen. Um die Methodenauswahl zu erleichtern, ist in Tabelle 5-6 und Tabelle 5-7 entsprechend markiert, ob die Methode **geschäftsmodellbezogen oder produktbezogen** ausgerichtet ist sowie welcher **Nachhaltigkeitsfokus** vorliegt. Weiterhin ist auch die **Einsetzbarkeit in den vier Phasen** des PIPE-PEP von „nicht möglich“ bis „vollständig möglich“ gekennzeichnet. Dabei kann die Zuordnung zu den Phasen geringfügig von der Einordnung in Kapitel 4.1 abweichen, da im PIPE-Modell manche Methoden beispielsweise in frühere Phasen des PEP verschoben werden. Da die meisten Methoden bereits in Kapitel 3.2 und 3.3 ausführlich beschrieben wurden, wird in den Tabellen lediglich auf weiterführende Quellen verwiesen.

Die Synthesemethoden in Tabelle 5-6 unterteilen sich in **fünf Gruppen** mit kleinen Abweichungen zur Einteilung im Stand der Forschung. Aufgrund der starken Überschneidungen werden in Gruppe **S1** die ökologisch orientierten Synthesemethoden und die Methoden zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit mit direktem Bezug zum Produkt zusammengefasst. **S2** fasst die sozial ausgerichteten Methoden zusammen und **S3** beschreibt die Synthesemethoden zur ökonomischen Produktentstehung. In Gruppe **S4** sind die Methoden zur Gestaltung nachhaltiger Geschäftsmodelle zusammengefasst, in der auch solche mit Bezug zur Kreislaufwirtschaft untergebracht sind. Die letzte Gruppe **S5** wird durch die ganzheitlichen Ansätze wie Design for Sustainability, Sustainable Product Design oder Nachhaltige Produktentwicklung gebildet.

Tabelle 5-6: Sammlung von Synthesemethoden für das PIPE-Modell

Kapitel	Methodengruppe	#	Ansatz	Kriterien	Beschreibung	Geschäftsmodell	Nachhaltigkeitsfokus				Einsetzbarkeit im PIPE-PEP				Quellen	
							Produkt	ökologisch	sozial	ökonomisch	Kreislauffähigkeit	Phase 1	Phase 2	Phase 3		Phase 4
3.3.2 & 3.3.5	S1	S1.1	Ten Golden Rules	Regeln zur ökologisch nachhaltigen Produktgestaltung		●	●				●	●	●	○	[LuLa06]	
		S1.2	EcoDesign	Integration von Umweltaspekten in die Produktentwicklung		●	●			●	●	●	●	●	[ISO02, Dewb96, BrVa97]	
		S1.3	DfE	Design for Environment		●	●				●	●	●	●	[Fiks12]	
		S1.4	Materialeffizienz & Kreislauffähigkeit	Ressourceneffizienz		●	●				●	●	●	●	●	[VDI16]
		S1.5		Design with Waste / Recycled Materials		●	●				●	●	●	●	●	[BrMa14, DCGS95, Ljun07]
		S1.6		Design with Regenerative Materials		●	●				●	●	●	●	●	[BrMB07]
		S1.7		Minimal Design		●	●				●	●	●	●	●	[Gumb23]
		S1.8		Vermeiden oder Reduzieren		●	●				●	●	●	●	●	[ReVW18]
		S1.9		Design for Recycling		●	●				●	●	●	●	●	[ISO20, VDI01, VDI02]
		S1.10		Design with mono materials/ for varietal purity		●	●				●	●	●	●	●	[GoHR24, QKBC23]
		S1.11		Gestaltung von zirkulären Produkten nach DIN 45560		●	●				●	●	●	●	●	[DIN23b]
		S1.12		Cradle-to-Cradle Design		●	●				●	●	●	●	●	[BrMB07, McBr02]
		S1.13		Materialdatenbanken		●	●				●	●	●	●	●	[Ansy20]
		S1.14	REACH – Restricted Substances List		●	●				●	●	●	●	●	[Regu22]	
		S1.15	Leichtbau		●	●				●	●	●	●	●	[HeMo11]	
		S1.16	Lebensdauer	Design for Maintainability		●	●				●	●	●	●	●	[GuDi21, TJTh04]
		S1.17		Design for Durability		●	●				●	●	●	●	●	[MGAJ22]
		S1.18		Design for Aesthetics / Emotional Durability		●	●				●	●	●	●	●	[Chap09, Chap12, HCLM18]
		S1.19		Design for Reliability		●	●				●	●	●	●	●	[CrFe01, VDI17b]
		S1.20		Design for Repairability		●	●				●	●	●	●	●	[Acke18, DBFB21, HeMG20]
		S1.21		Design for Longer Lasting Products		●	●				●	●	●	●	●	[Coop16]
		S1.22	Vermeidung von Obsoleszenz		●	●				●	●	●	●	●	[PoLo19, VDI18]	
		S1.23	Energieeffizienz	Design for Energy Efficiency		●	●				●	●	●	●	●	[Pehn10, SBFV15]
		S1.24		Design for Sustainable Behaviour		●	●				●	●	●	●	●	[BhLT11]
		S1.25		Leichtbau in der Mobilität		●	●				●	●	●	●	●	[Frie13]
		S1.26	Herstellung	PIUS - Produktionsintegrierter Umweltschutz		●	●				●	●	●	●	●	[VDI00]
		S1.27	Funktionalität	Design for Modularity		●	●				●	●	●	●	●	[SoEG18]
		S1.28		Design to Quality / Function		●	●				●	●	●	●	●	[Akao04]
		S1.29		Bionik		●	●				●	●	●	●	●	[HeVG09, VDI12a]
		S1.30		Erweiterungen des QFD		●	●				●	●	●	●	●	[PuOM11]
3.3.3	S2	S2.1	DfBoP, FI	Design for the Base of the Pyramid, Frugale Innovationen		●	●				●	●	●	○	[CaJH12, JaLK13, TIFK16]	
S2.2		Design für Alle	Design für alle-Ansatz nach DIN 17161		●	●				●	●	●	●	○	[DIN19d]	
3.3.4	S3	S3.1	Ökon. Konstruieren	Wirtschaftliches Konstruieren nach VDI 2234, 2235, 2225		●	●				●	●	●	●	[VDI90, VDI87, VDI97c]	
S3.2		Target Costing	Zielkostenrechnung		●	●				●	●	●	●	○	[EhLK13, EKL14, Krem07]	
3.3.4 & 3.3.5	S4	S4.1	Phasenmodell	Entwicklung nachhaltiger Geschäftsmodelle		●	●	●	●	●	●	●	●	○	[Ahre16]	
S4.2		TLBMC	Triple Layered Business Model Canvas		●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	[JoPa16]	
S4.3		PSS-Typen	Eight types of product-service system		●	●				●	●	●	●	○	[Tukk04]	
S4.4		Kreislaufstrategien	slowing, closing and narrowing loops, 10R		●	●				●	●	●	●	○	[ReVW18, BDBV16]	
S4.5		CBMT	Circular Business Model Tool		●	●				●	●	●	●	○	[GPPS20]	
S4.6		CEBM	Morphological box of Circular Economy Business Model		●	●				●	●	●	●	○	[LüGB19]	
S4.7		DIN/TS 35205	Geschäftsmodelle zur Wiederverwendung		●	●				●	●	●	●	○	[DIN23a]	
S4.8		ISO 59010	Circular Economy: Geschäftsmodelle, Wertschöpfungsnetzwerke		●	●				●	●	●	●	○	[ISO24d]	
S4.9		DTTCSI	Design Thinking Tools to Catalyse Sustainable Circular Innovation		●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	[BBKD23]	
3.3.6	S5	S5.1	D4S	Design for Sustainability: A Step-by-Step Approach		●	●	●	●	●	●	●	●	○	[CrDR09]	
S5.2		D4S	Current Trends in Sustainable Product Design and Development		●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	[CKHC09]	
S5.3		D4S	A practical Approach for developing economics		●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	[UnDr07]	
S5.4		D4S	A Practical Approach		●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	[BhLo08]	
S5.5		SPD	A Framework for Sustainable Product Development		●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	[KSHW17]	
S5.6		SPD	Systematic Lifecycle Design for Sustainable Product Development		●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	[LZXG11]	
S5.7		SPD	Sustainable Product Development: Tools, Methods and Examples		●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	[Su20]	
S5.8		NP	Nachhaltige Produktentwicklung		●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	[ScAp14]	
S5.9		NP	Praxishandbuch Nachhaltige Produktentwicklung		●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	[SPBH18]	
S5.10		Sust. Solutions	Developing Products and Services for the Future		●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	[ChTi01]	
S5.11		LCE	An Integrated Framework for Life Cycle Engineering		●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	[HaHK17]	

Einsetzbarkeit: ● vollumfänglich möglich    ◐ größtenteils möglich    ◑ teilweise möglich    ◒ wenig möglich    ○ nicht möglich

Die **Analysemethoden** in Tabelle 5-7 werden analog zu den Kapiteln 3.2.2 bis 3.2.6 ebenfalls in **fünf Gruppen** gegliedert. Dabei werden rein ökologisch (**A1**), sozial (**A2**) oder ökonomisch (**A3**) orientierte Methoden unterschieden. Außerdem stehen Methoden zu Bewertung der Kreislauffähigkeit (**A4**) sowie ganzheitliche Ansätze (**A5**) in der Methodensammlung bereit. Weiterhin ist zu erwähnen, dass das TLBMC sowohl als Synthese-, als auch als Analysemethode im Rahmen des PIPE-Modell eingesetzt werden kann.

Tabelle 5-7: Sammlung von Analysemethoden für das PIPE-Modell

Kapitel	Methodengruppe	#	Kriterien		Beschreibung	Geschäftsmodell	Nachhaltigkeitsfokus					Einsetzbarkeit im PIPE-PEP				Quellen
			Ansatz				Produkt	ökologisch	sozial	ökonomisch	kreislauffähigkeit	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	
3.2.2	A1	A1.1	MIPS		Materialinput pro Serviceeinheit		●	●				○	○	○	○	[Schm94]
		A1.2	MET-Matrix		MET-material cycles, energy use and toxic emissions		●	●				○	○	○	○	[BRVa97]
		A1.3	VERUM		Vereinfachte Umweltbewertung des Umweltbundesamtes		●	●				○	○	○	○	[BFMK17]
		A1.4	EcoDesign-Checklist		EcoDesign-Checkliste von ecoconcept	●	●	●				○	○	○	○	[TiMo23, TSRP00]
		A1.5	Datenbanken		Material- und Werkstoffdatenbanken		●	●				○	○	○	○	[Ansy20]
		A1.6	LCA		Ökobilanz nach ISO 14040 und ISO 14044	●	●	●				○	○	○	○	[DIN21a, DIN21c]
		A1.7	EFP		Environmental Footprint		●	●				○	○	○	○	[Euro21, MAPS10]
		A1.8	WFP		Wasser-Fußabdruck nach ISO 14046		●	●				○	○	○	○	[DIN16]
		A1.9	CFP		Carbon Footprint nach ISO 14067		●	●				○	○	○	○	[ISO19]
		A1.10	KEA		Kumulierter Energieaufwand nach VDI 4600		●	●				○	○	○	○	[VDI97a]
3.2.3	A2	A2.1	Risikoanalyse		Social Impact Audit Tool		●	●	●			○	○	○	○	[Mike21, TaMi20]
		A2.2	Datenbanken		Datenbanken für soziale Aspekte wie SHDB oder PSILCA		●	●	●			○	○	○	○	[Shdb00, Gree00]
		A2.3	SA 8000		Einhaltung der ILO-Kernarbeitsnormen zertifiziert nach SA8000	●	●		●			○	○	○	○	[Inte22, Soci14]
		A2.4	S-LCA		Social Life Cycle Assessment nach UNEP oder ISO 14075	●	●	●				○	○	○	○	[UBSL20, ISO24c]
3.2.4	A3	A3.1	Kostenermittlung		Vereinfachte Kostenermittlung nach VDI 2225		●			●		○	○	○	○	[VDI97c]
		A3.2	LCC		Life Cycle Costing	●	●			●		○	○	○	○	[VDIO5, ReHu03, EKLM14]
		A3.3	TLBMC		Triple Layered Business Model Canvas	●	●	●	●			○	○	○	○	[JoPa16]
3.2.5	A4	A4.1	MCI		Material Circularity Indicator		●			●		○	○	○	○	[ElGr15, GMPT19]
		A4.2	DIN 45550ff		Bewertungsverfahren für energieverbrauchsrelevante Produkte		●				○	○	○	○	○	[DIN19b, DIN19c, ... DIN21b]
		A4.3	ISO 59020		Measuring and assessing circularity performance	●	●			●		○	○	○	○	[ISO24b]
3.2.6	A5	A5.1	TA (LCSA)		Tiered approach for LCSA		●	●	●	●		○	○	○	○	[Neug16, NMSF15]
		A5.2	VDI 4605		Nachhaltigkeitsbewertung		●	●	●	●		○	○	○	○	[VDI17a]
		A5.3	LCSA		Life Cycle Sustainability Assessment	●	●	●	●			○	○	○	○	[Klop03, UnVL11, Muth21, VaSo24]
		A5.4	PROSA		Product Sustainability Assessment		●	●	●	●		○	○	○	○	[GBGH07, GrQu11]
		A5.5	C-LCSA		Circular Life Cycle Sustainability Assessment	●	●	●	●	●		○	○	○	○	[LuTC23]

Einsetzbarkeit: 

Die Auswahl passender Methoden stellt im PEP, insbesondere bei ganzheitlich nachhaltig orientierten Prozessen, eine Herausforderung dar. Daher wird mit Tabelle 5-6 und Tabelle 5-7 eine entsprechende **Hilfestellung zur Methodenauswahl** gegeben, indem die Einsetzbarkeit in den vier PEP-Phasen eingeordnet wird (Tabelle 4-5: 3.5). Wie bei der Erläuterung der Herleitung des Modells in Kapitel 5.1 angedeutet, lässt sich zusammenfassen, dass in den **frühen Phasen des PIPE-PEP vermehrt Synthesemethoden** eingesetzt werden, um das Produktsystem schrittweise zu definieren. Analysemethoden werden in diesen Phasen vorwiegend zur **qualitativen Bewertung** eingesetzt, da eine quantitative Bewertung bei einem nicht vollständig definierten Produktsystem noch nicht möglich ist. Gegen Ende des PEP nimmt der Lösungsraum zur Gestaltung durch Synthesemethoden zunehmend ab, wodurch die Analyse mehr und mehr in den Vordergrund rückt. Je detaillierter das Produktsystem durch die Synthese definiert wird, desto genauer lassen sich auch **quantitative Analysemethoden** einsetzen.

## 5.5 Positive Impact Product Engineering Produktentstehungsprozess

In diesem Kapitel wird der vierteilige PEP als ein weiterer Teil des PIPE-Produktentstehungsmodells detailliert vorgestellt. Da die vier einzelnen Produktentstehungsphasen identisch aufgebaut sind, erfolgt zunächst ein Überblick über den allgemeinen Aufbau des Prozesses und dessen Phasen in Kapitel 5.5.1. Im Anschluss werden die vier Phasen separat in den Kapiteln 5.5.2 bis 5.5.5 erläutert.

### 5.5.1 Allgemeiner Aufbau

In Kapitel 5.2 wurde im Überblick über das PIPE-Modell bereits angedeutet, dass der PIPE-PEP als **überlagernder Prozess über einen bestehenden Basis-PEP** konzipiert wurde. Abbildung 5-8 zeigt einen Überblick über den PIPE-PEP mit allen relevanten Bestandteilen und Phasen als strukturierten PEP in generischer Form (Tabelle 4-5: 3).

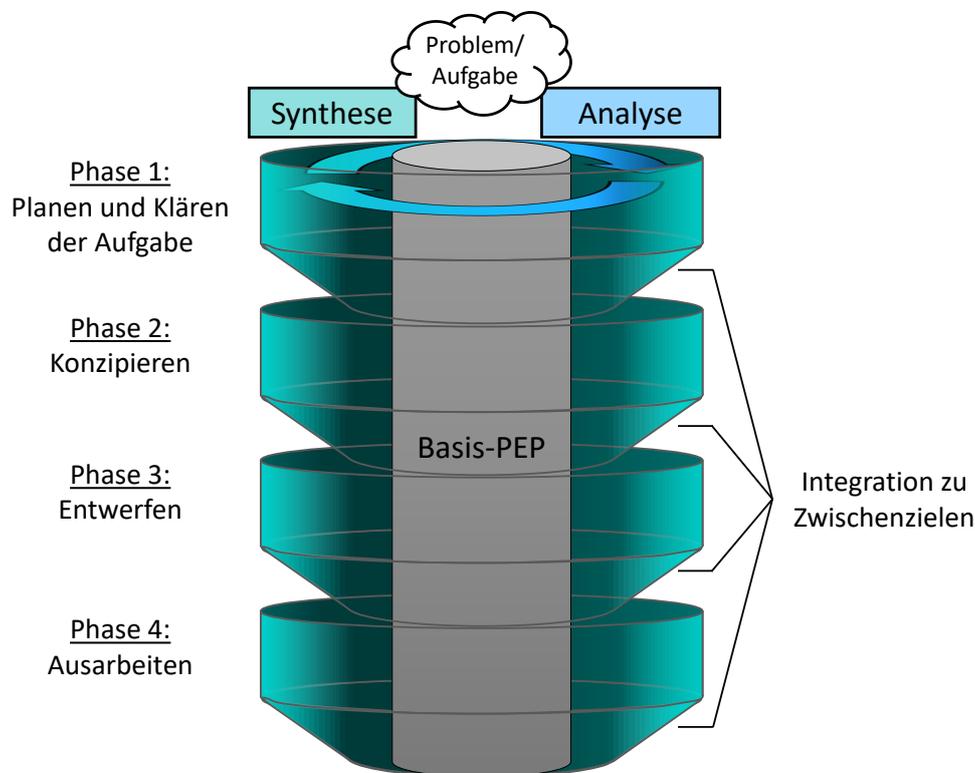


Abbildung 5-8: Überblick über den PIPE-Produktentstehungsprozess

Ausgehend von einem Problem oder einer Entwicklungsaufgabe wird das PIPS in vier Phasen durch die Anwendung des PIOL und die Kombination aus Analyse und Synthese kontinuierlich entwickelt. Die **Hauptphasen** entsprechen den vier Phasen nach Pahl und Beitz [PaBe77, PBF07, BeGe21] und sind, wie in Tabelle 4-5: 3.2 gefordert:

- **Phase 1: Planen und Klären der Aufgabe**
- **Phase 2: Konzipieren**
- **Phase 3: Entwerfen**
- **Phase 4: Ausarbeiten**

Am Ende der Phasen werden die Teilergebnisse **zu Zwischenzielen integriert** (Tabelle 4-5: 3.1), um die Entstehung eines PIPS am Ende jeder Phase abzusichern. Hierbei werden auch die Ergebnisse aus den verschiedenen Fachdisziplinen zusammengeführt, um die interdisziplinäre Zusammenarbeit zu fördern (Tabelle 4-5: 3.6). Das Ergebnis dieser Integration stellt jeweils den Ausgangspunkt für den Beginn der nächsten Phasen bzw. am Ende des PEP nach der Ausarbeitungsphase das fertige PIPS dar. Der **Aufbau der vier Hauptphasen** ist in Abbildung 5-9 in **allgemeiner Form** visualisiert und gliedert sich in die **drei zentralen Bestandteile** Synthese, Basis-PEP und Analyse. Der **Basis-PEP** ist in der Mitte dargestellt und umschreibt **konventionelle Aufgaben eines PEP**, die nicht direkt mit der *Nachhaltigen Produktentstehung* verbunden sind. In den Folgekapiteln wird der Basis-PEP exemplarisch durch die **Schritte der VDI 2221** [VDI19a, VDI19b] veranschaulicht. Um eine hohe Anpassungsfähigkeit des PIPE-Modells zu gewährleisten, kann hier theoretisch jeder beliebige Basis-PEP eingesetzt werden, egal ob es spezifische Entwicklungsprozesse von Unternehmen sind oder generische Prozesse aus der Forschung, wie beispielsweise [ARBR16, EhLK13, NaLu16]. Die einzelnen Ziele, Aktivitäten und Ergebnisse des Basis-PEP werden als bekannt vorausgesetzt und in der Beschreibung der vier Phasen nicht näher erläutert, auch weil es zu viele mögliche Basis-Prozesse gibt.

Die detailliertere Beschreibung erfolgt jedoch jeweils für die Synthese und die Analyse. Zunächst werden dabei für jeden Bereich bestimmte **Ziele** der jeweiligen Phase im PIPE-PEP festgelegt. Diese Ziele können durch die Umsetzung von vorgegebenen **Aktivitäten** erreicht werden. Die Aktivitäten werden dabei **im PIOL iterativ durchlaufen** (siehe Abbildung 5-5), bis eine ganzheitlich netto-positive Wirkungsbeurteilung vorliegt. Zur methodischen Unterstützung bei der Durchführung der Aktivitäten, stehen jeweils entsprechende **Methoden aus den Methodensammlungen** (Tabelle 5-6 und Tabelle 5-7) bereit. In jeder Phase werden **spezifische Synthese- und Analysemethoden** vorgeschlagen, die jeweils in ökologisch, sozial, ökonomisch bzw. geschäftsmodellorientierte Methoden untergliedert sind. Methoden mit Bezug zur Kreislauffähigkeit sowie ganzheitliche Methoden bilden zwei weitere Untergliederungen. Die einzelnen Resultate der Aktivitäten werden in Form von **Teilergebnissen** der Synthese und der Analyse festgehalten. Gemeinsam mit den Ergebnissen des Basis-PEP werden anschließend alle Teilergebnisse in der **Integrationsphase** zusammengeführt, wobei auch die Erfüllung der gestellten Ziele kontrolliert wird. Hierbei wird die **Vereinbarkeit von Teillösungen** überprüft und sichergestellt, dass in der weiteren Entwicklung ein PIPS erreicht werden kann. Kommt es bei der Integration zu Widersprüchen oder Problemen, müssen die Aktivitäten im PIOL erneut durchlaufen und die Eigenschaften des Produktsystems so lange angepasst werden, bis eine vollständige Integration ermöglicht wird. Ist die Integration erfolgreich, kann die nächste Phase, ausgehend von den **integrierten Ergebnissen**, wiederum mit neuen Zielen beginnen.

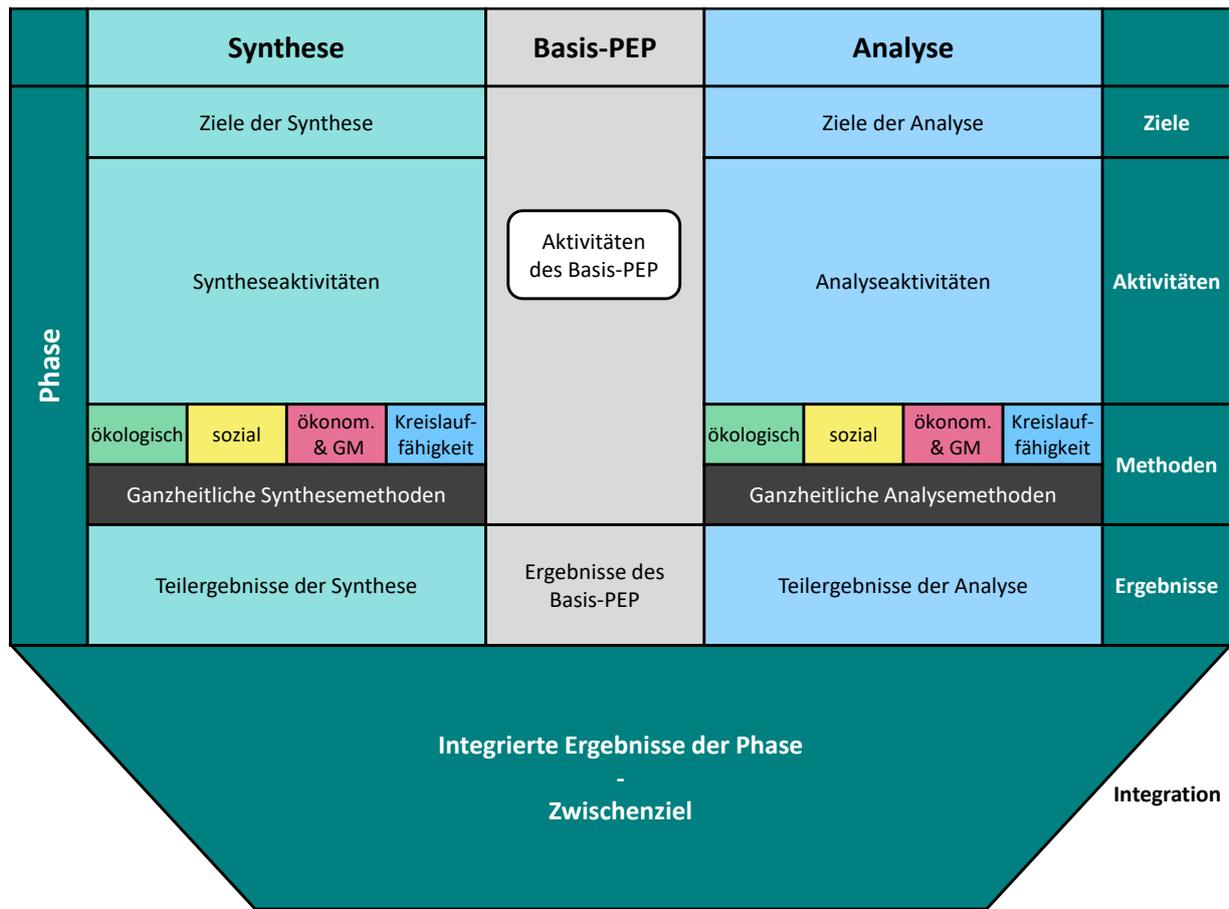


Abbildung 5-9: Allgemeiner Aufbau der Hauptphasen des PIPE-PEP

**5.5.2 Phase 1: Planen und Klären der Aufgabe**

Ausgangspunkt eines PEP ist in der Regel eine mehr oder weniger konkrete Aufgabe oder ein Problem, das durch die Entwicklung und Realisierung eines Produkts gelöst werden soll. Dies gilt sowohl für Neuentwicklungen als auch Produktgenerationsentwicklungen (Tabelle 4-5: 3.3). Übergreifendes **Ziel der Phase 1** des PIPE-PEP ist es, diese Aufgabe detailliert zu klären und den nachfolgenden PEP zu planen. Gemäß VDI 2221 [VDI19b] steht jede Aufgabe bzw. jedes Problem in Zusammenhang mit verschiedenen internen und externen Faktoren. Zu den externen Faktoren zählen makroökonomische Einflüsse sowie mikroökonomische Aspekte [VDI19b]. Interne Faktoren umfassen organisatorische Bedingungen wie die Unternehmensstruktur und -strategie, die Branche, projektbezogene Einflüsse wie das Innovationswesen und Projektmanagement sowie individuelle Aspekte wie das Wissen und die Kompetenzen der beteiligten Personen [VDI19b]. Ein grundlegendes Verständnis des Problems bzw. der Entwicklungsaufgabe und diesen Randbedingungen ist zu Beginn eines PEP von entscheidender Bedeutung. Laut Bahnder et al. [BhHM03] liegt in dieser Phase das größte Optimierungspotenzial, da das spätere Produktsystem noch nicht festgelegt ist und somit ein großer Lösungsraum zur Verfügung steht. Infolgedessen ist es sinnvoll, der **ersten Phase von PIPE eine hohe Priorität** einzuräumen, um spätere Probleme durch sogenanntes "Frontloading" [LABK16, MGMG17] zu vermeiden. Um den Lösungsraum so offen

wie möglich zu halten und sich von bestehenden, oft nicht nachhaltigen Lösungen befreien zu können, sollte die **Entwicklungsaufgabe hinterfragt und so abstrakt wie möglich formuliert** werden (Tabelle 4-5: 4.1). Dies gilt insbesondere für die Entwicklung von Produktsystemen mit netto-positiver Nachhaltigkeitswirkung, für die innovative und nachhaltige Lösungskonzepte benötigt werden. Es ist daher von zentraler Bedeutung, die Entwicklungsaufgabe im Kontext detailliert zu analysieren und auf mögliche positive Auswirkungen hin zu prüfen, wie es unter anderem im WSD [SSHD09] vorgesehen ist. Darin wird auch der Ansatz des „Cleansheet Design“ vorgeschlagen, bei dem der Gestaltungsprozess auf einem „weißen Blatt Papier“ beginnt, wodurch die notwendige Flexibilität und der kreativen Raum für nachhaltige Innovationen entsteht [SSHD09]. Für eine **Abstraktion** der Entwicklungsaufgabe stehen verschiedene Methoden oder **Kreativitätstechniken** zur Verfügung, beispielsweise von Mohnke et al. [MoMV24]. Zudem kann es sinnvoll sein, die Aufgabe auf verschiedene Innovationslevel hin zu untersuchen [CeGa16], da für die Erreichung öko-effektiver Lösungen häufig grundlegende Funktions- und Systeminnovationen erforderlich sind [HaHK17]. Dabei können auch die 17 SDGs herangezogen werden, um im Rahmen der Aufgabenklärung den Beitrag des späteren Produktsystems zur nachhaltigen Entwicklung gezielt zu steuern (vgl. [BEEG19]). Für eine möglichst abstrakte und lösungsferne Beschreibung der Entwicklungsaufgabe eignet sich die Herleitung von sogenannten Produktprofilen.

Nach Albers et al. [AHWB18] ist ein **Produktprofil** ein Modell einer Anzahl von Vorteilen bzw. Nutzen (Benefits), das den angestrebten Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzen einer Validierung zugänglich macht und den Lösungsraum für die Gestaltung eines Produkts spezifiziert. Der Benefit wird als eine Kombination von Produkten und Dienstleistungen verstanden, die mit dem Ziel angeboten werden, dem Kunden direkt oder indirekt Vorteile zu verschaffen. Darüber hinaus bildet das Produktprofil den Ausgangspunkt für die Entwicklung und dient als Grundlage für die Validierung von Produktideen, -konzepten, -modellen und des finalen Produkts. Neben der Beschreibung von Nutzenaspekten für Anbieter, Kunden und Nutzer skizziert das Produktprofil grob das Produkt, wie etwa wesentliche Produktmerkmale, die der Kunde erleben kann, sowie Funktionen des zukünftigen Produkts, ohne seine endgültige Gestalt vorwegzunehmen. Im Entwicklungsprozess sollten Produktprofile in der Regel vor der eigentlichen Suche nach technischen Lösungen entwickelt werden, um den Lösungsraum möglichst zu maximieren. [AHWB18]

Wilmsen et al. [WDHA19] liefern eine methodische Unterstützung zur Entwicklung solcher Produktprofile.

Wie in Abbildung 5-10 dargestellt, wird das Konzept der Entwicklung von abstrakten und lösungsfernen Profilen auf das PIPE-Modell transferiert und stellt das **übergreifende Ziel von Phase 1 in Form eines Profils des PIPS** dar. Das Teilziel der Synthese ist somit die Definition des PIPS-Profiles, wohingegen die Analyse darauf abzielt, die potenzielle Netto-Positivität des definierten Profils zu überprüfen. Im Basis-PEP wird als Aktivität, analog zur Bezeichnung von Phase 1, das Klären und Präzisieren des Problems bzw. der Aufgabe durchgeführt, wodurch üblicherweise entsprechende Anforderungen als Ergebnis abgeleitet werden.

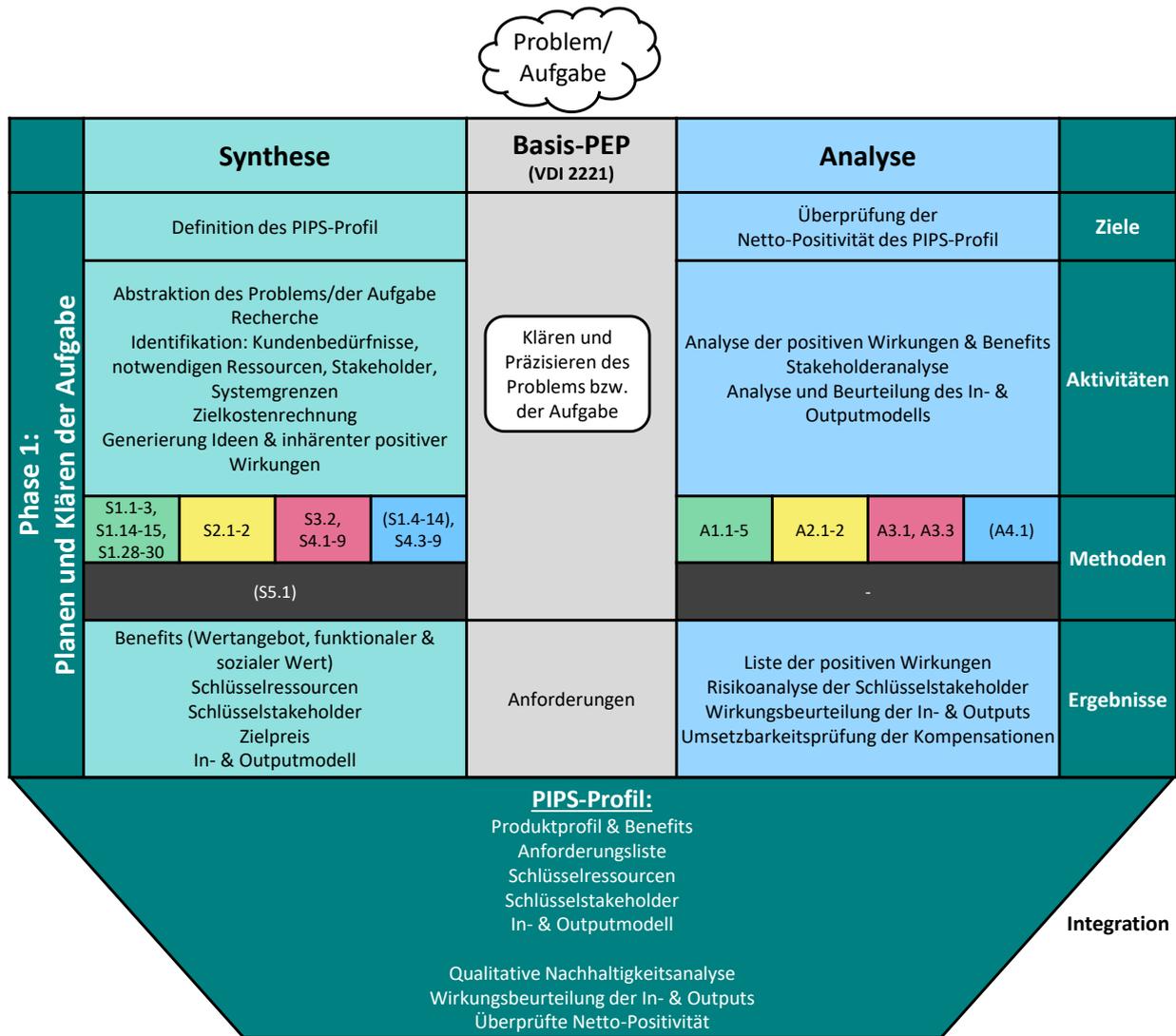


Abbildung 5-10: PIPE-PEP Phase 1 - Planen und Klären der Aufgabe

Zur Erreichung des übergeordneten Ziels ist es zunächst erforderlich, die Teilergebnisse in den einzelnen Entwicklungsbereichen zu erzielen. Die **Teilergebnisse der Phase 1 auf der Synthese-seite** zur Definition des PIPS-Profiles konzentrieren sich auf wesentliche Aspekte zur Schaffung eines nachhaltigen Produktsystems. Zunächst werden die Benefits des Produkts definiert, die das Wertangebot beschreiben, unterteilt in funktionalen und sozialen Wert. Der funktionale Wert bezieht sich auf die praktischen Vorteile für den Kunden, während der soziale Wert den Beitrag des Produkts auf gesellschaftlicher Ebene beschreibt. Die Schlüsselressourcen umfassen die materiellen und immateriellen Mittel, die für die Umsetzung des Wertangebots notwendig sind. Ergänzt wird dies durch die Identifikation der Schlüsselstakeholder, also der wichtigsten Akteure, wie Partner und Kunden, die in den Wertschöpfungsprozess eingebunden werden. Ein weiterer ökonomischer Punkt ist der Zielpreis, der die Preisstrategie des Produkts festlegt und sicherstellt, dass der Preis sowohl für das Unternehmen als auch für die Kunden wertschöpfend ist. Abschließend wird ein In- und Outputmodell (vgl. Abbildung 5-7) erstellt, welches das Produktsystem auf Systemebene erfasst. Hierbei werden in erster Linie die notwendigen Flüsse in und aus dem System betrachtet, ohne das System selbst genauer zu modellieren. Die Ergebnisse können durch

eine Reihe von **Aktivitäten** erarbeitet werden, die von den in Abbildung 5-10 gezeigten **Methoden** aus Tabelle 5-6 unterstützt werden. Zusätzlich zur oben beschriebenen Problemabstraktion ist für die Definition des PIPS-Profiles in der Regel eine Marktanalyse sowie eine Recherche vergleichbarer Produktsysteme empfehlenswert. Dies kann dabei helfen die Kundenbedürfnisse, die notwendigen Ressourcen und die beteiligten Stakeholder zu identifizieren, wodurch sich schrittweise auch entsprechende Systemgrenzen ergeben. Eine Zielkostenrechnung mittels Target Costing (Tabelle 5-6: S3.2) dient zur Festlegung eines ersten Zielpreises. Außerdem können in der ersten Phase des PIPE-PEP bereits erste Ideen für das spätere PIPS mit Hilfe von Kreativitätstechniken, wie [Cucu16, MoMV24, WiTr21], generiert werden. Dabei sollte auch explizit die Entstehung inhärenter positiver Wirkungen, wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben, von Beginn an in Betracht gezogen werden. Zusammenfassend tragen diese Aktivitäten dazu bei, das PIPS-Profil zu definieren und ein In- und Outputmodell zu erstellen.

Auf **Analysesseite** werden die Ergebnisse der Synthese parallel bzw. iterativ evaluiert, um sicherzustellen, dass ein netto-positives PIPS-Profil erzeugt und somit eine passende Grundlage für die weitere Entwicklung geschaffen wird. Aufgrund des niedrigen Konkretisierungsgrads des PIPS in diesem frühen Stadium des PEP, kann hier nur eine **vereinfachte Analyse und Wirkungsbeurteilung** in qualitativer Form stattfinden. Ein Fokus liegt dabei auf den positiven Wirkungen, die gemeinsam mit den Benefits des PIPS-Profiles analysiert werden und in einer Liste als ein Teilergebnis zusammengetragen werden. Für eine erste Betrachtung der sozialen Aspekte sollte eine Analyse der identifizierten Schlüsselstakeholder durchgeführt werden, um mit Hilfe von Datenbanken (Tabelle 5-7: A2.1-2) potenzielle soziale Risiken zu identifizieren. Des Weiteren wird das generierte In- und Outputmodell mittels vereinfachter Methoden (z.B. Tabelle 5-7: A1.1-5) analysiert. Daraufhin findet eine Wirkungsbeurteilung nach Abbildung 5-7 statt und es wird vorab geprüft, ob -falls notwendig- wirkungsgerechte Kompensationsmaßnahmen vorhanden sind. Sollten bei der Analyse Aspekte auftreten, die mit dem Konzept eines PIPS nicht vereinbar sind, wird der PIOL erneut durchlaufen.

Im abschließenden Schritt der **Integration** von Phase 1 werden die Teilergebnisse von Synthese, Analyse und Basis-PEP im PIPS-Profil zusammengeführt und deren Vereinbarkeit geprüft. Sollte es hier zu Widersprüchen kommen, muss der PIOL in Phase 1 wiederholt durchgeführt werden, bis eine konfliktfreie Integration möglich ist. Das im unteren Teil von Abbildung 5-10 gezeigte PIPS-Profil mit überprüfter Netto-Positivität stellt somit den Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung in Phase 2 dar.

### 5.5.3 Phase 2: Konzipieren

In Phase 2 des PIPE-PEP, die in Abbildung 5-11 visualisiert ist, geht es darum, ausgehend vom PIPS-Profil, ein **Konzept für das zukünftige PIPS zu entwerfen und auszuwählen**. Im **Basis-PEP** der VDI 2221 [VDI19a] werden an dieser Stelle die Aktivitäten „Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen“, „Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen“ und „Bewerten und Auswählen von Lösungskonzepten“ durchgeführt. Dadurch werden erste Funktionsmodelle

erstellt, prinzipielle Lösungskonzepte generiert und hieraus ein Lösungskonzept ausgewählt [VDI19a]. Diese Schritte werden durch den Nachhaltigkeitsfokus der Synthese und Analyse erweitert, um ein netto-positives PIPS-Konzept zu erarbeiten. Das **Ziel der Synthese** liegt darin, mehrere mögliche Konzepte zu entwickeln, die das in der ersten Phase erstellte PIPS-Profil erfüllen. Auf **Analysesseite** sollen diese Konzepte untersucht und beurteilt werden, um eine Basis für die Auswahl des besten Konzepts in der Integrationsphase zu schaffen.

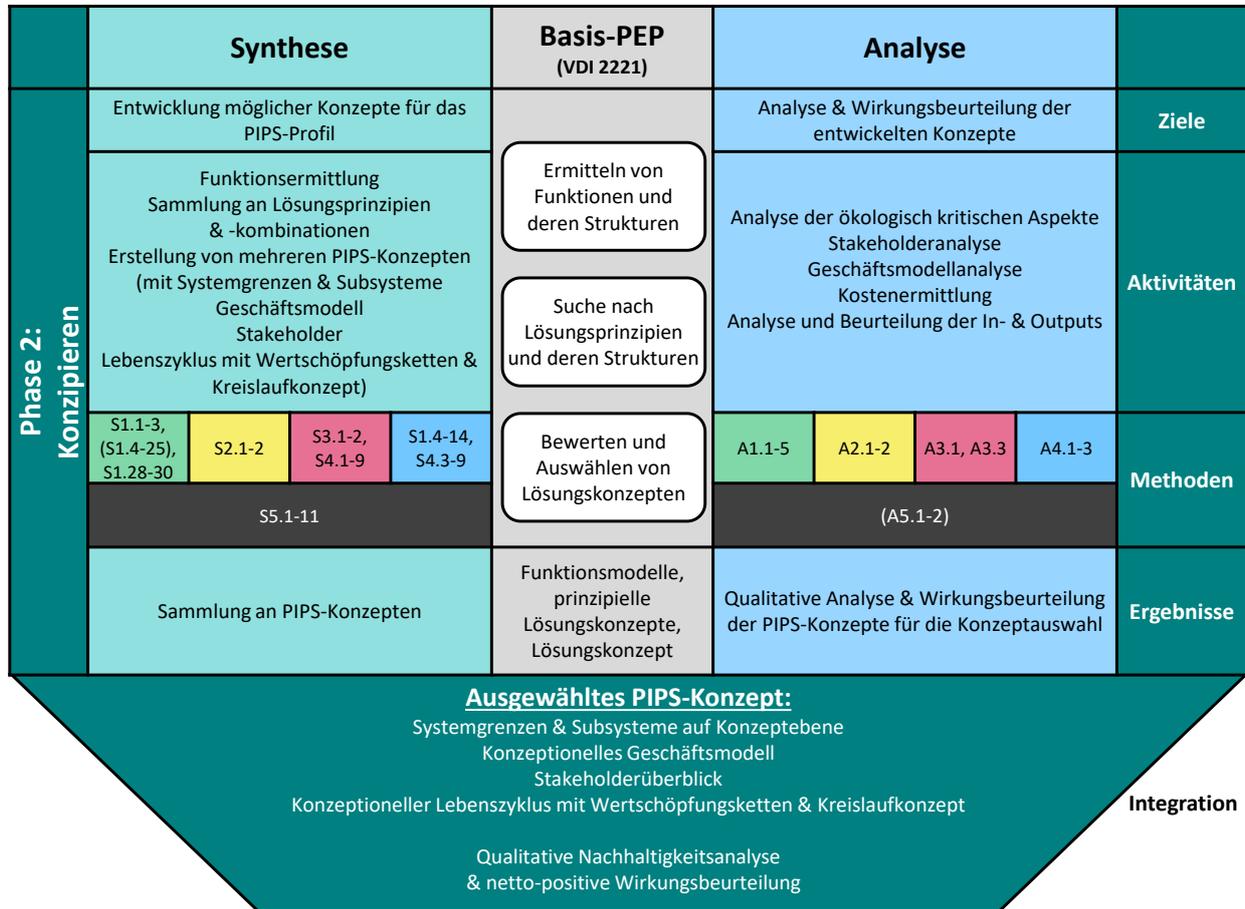


Abbildung 5-11: PIPE-PEP Phase 2 -Konzipieren

Das **integrierte Ergebnis der zweiten Phase des PIPE-PEP ist das ausgewählte PIPS-Konzept**, welches bereits mehrere Elemente des späteren PIPS auf konzeptioneller Ebene, wie die Systemgrenzen und einzelne Subsysteme, enthält. Dadurch wird der Umfang des Produktsystems definiert und strukturiert. Zudem entsteht ein konzeptionelles Geschäftsmodell, das die wirtschaftliche Tragfähigkeit des Produkts sicherstellt und gegebenenfalls einzelne Werterhaltungsoptionen zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit ermöglicht. Ein Stakeholderüberblick identifiziert die relevanten Akteure und ihre Rollen innerhalb des Produktsystems. Der konzeptionelle Lebenszyklus beschreibt die Lebensphasen des Produkts von der Entnahme der Ressourcen bis zur Abgabe an die Umgebung, einschließlich der Wertschöpfungsketten und eines Kreislaufkonzepts. Als letzte Elemente folgen die qualitative Nachhaltigkeitsanalyse und die netto-positive Wirkungsbeurteilung des ausgewählten Konzepts.

Um zunächst mehrere solcher Konzepte zu erstellen, können auf **Syntheseseite** wiederum verschiedene **Aktivitäten** ausgeführt werden, die mit den in Abbildung 5-11 vorgeschlagenen Methoden unterstützt werden. Die Syntheseaktivitäten stehen in enger Verbindung zu den Aktivitäten des Basis-PEP, sind jedoch durch Methoden wie Ecodesign (Tabelle 5-6: S1.2) auf die Generierung nachhaltiger Lösungsprinzipien für die ermittelten Funktionen ausgerichtet. Mit Hilfe weiterer spezifischer und ganzheitlicher Methoden werden für jedes Konzept bzw. für jede Lösungskombination die oben beschriebenen Bestandteile des PIPS-Konzept erarbeitet, sodass eine **Sammlung an PIPS-Konzepten** entsteht.

Um aus dieser Sammlung das beste Konzept auswählen zu können, folgen entsprechende **Analyseaktivitäten**. Auch wenn die einzelnen Produktsysteme erst auf konzeptioneller Ebene definiert sind, können diese durch vereinfachte Analysemethoden qualitativ bewertet werden. Dazu zählt der Einsatz von Checklisten und Datenbanken (Tabelle 5-7: A1.1-5), um kritische ökologische Aspekte aufzudecken. Zur Identifizierung sozialer Risiken (Tabelle 5-7: A2.1-2) und zur vereinfachten Kostenermittlung (Tabelle 5-7: A3.1) dienen ebenfalls Datenbanken mit generischen Werten. Weiterhin kann das konzeptionelle Geschäftsmodell durch das TLBMC (Tabelle 5-7: A3.3) und das Kreislaufkonzept (Tabelle 5-7: A4.1-3) mit den entsprechenden In- und Outputs des PIPS initial bewertet werden. Zukünftig könnte diese frühzeitige Bewertung auf konzeptioneller Ebene auch durch den Einsatz künstlicher neuronaler Netze, die mit den Nachhaltigkeitswirkungen bestehender Produkte trainiert werden, wesentlich vereinfacht werden [EWSD20]. In dieser Phase kann es, abhängig von der Wirkungsbeurteilung, ebenfalls zu Optimierungsschleifen im PIOL kommen, bis eine Sammlung netto-positiver Konzepte vorliegt. Auf Basis dieser qualitativen Analyse und Beurteilung der Konzeptsammlung wird in der abschließenden **Integrationsphase ein Konzeptvergleich** durchgeführt. Mit unterstützenden Methoden, wie beispielsweise der multikriteriellen Entscheidungsfindung [BNSL15], kann das am besten zu dem PIPS-Profil passende oder das mit den meisten netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen ausgewählt werden. Das ausgewählte PIPS stellt das Ergebnis der zweiten Phase des PIPE-PEP dar und bildet wiederum die Grundlage für die Weiterentwicklung in Phase 3.

#### 5.5.4 Phase 3: Entwerfen

Die dritte Phase des PIPE-PEP ist in Abbildung 5-12 dargestellt und zielt darauf ab einen möglichst **vollständigen vorläufigen Entwurf des PIPS** zu erstellen. Im **Basis-PEP** erfolgen hierzu Aktivitäten, wie das „Gliedern in Module“ und das „Gestalten der Module“, welche sich nachfolgend zu dem Gesamtprodukt integrieren lassen [VDI19a]. Als Ergebnisse der Basisaktivitäten entstehen beispielsweise die Systemarchitektur und der Gesamtentwurf als Zusammenführung der Teilentwürfe [VDI19a]. Um ein netto-positives Produktsystem entwerfen zu können, werden wiederum zusätzliche **Synthese- und Analyseaktivitäten** notwendig. Diese haben zum **Ziel, das PIPS** auf Basis des in Phase 2 ausgewählten Konzepts **systematisch zu entwerfen und parallel die Nachhaltigkeitswirkungen zu analysieren und zu bilanzieren**. Dabei liegt der Fokus in erster Linie darauf, ein vollständiges System zu entwerfen und zu beurteilen. Da in der nachfolgenden Phase 4 noch

Optimierungen möglich sind, müssen die einzelnen Elemente noch nicht abschließend festgelegt werden, sollten jedoch umfassend auf Entwurfsebene ausgearbeitet und in ihrer Gesamtheit aufeinander abgestimmt sein. Somit entsteht in der Integrationsphase das vorläufige PIPS mit allen notwendigen Bestandteilen, welches ganzheitlich analysiert und beurteilt wird. Hierdurch lässt sich auch eine vorläufige Kompensationsbilanz erstellen und überprüfen, ob eine netto-positive Wirkungsbilanz des vorläufigen Entwurfs erzielt werden kann.

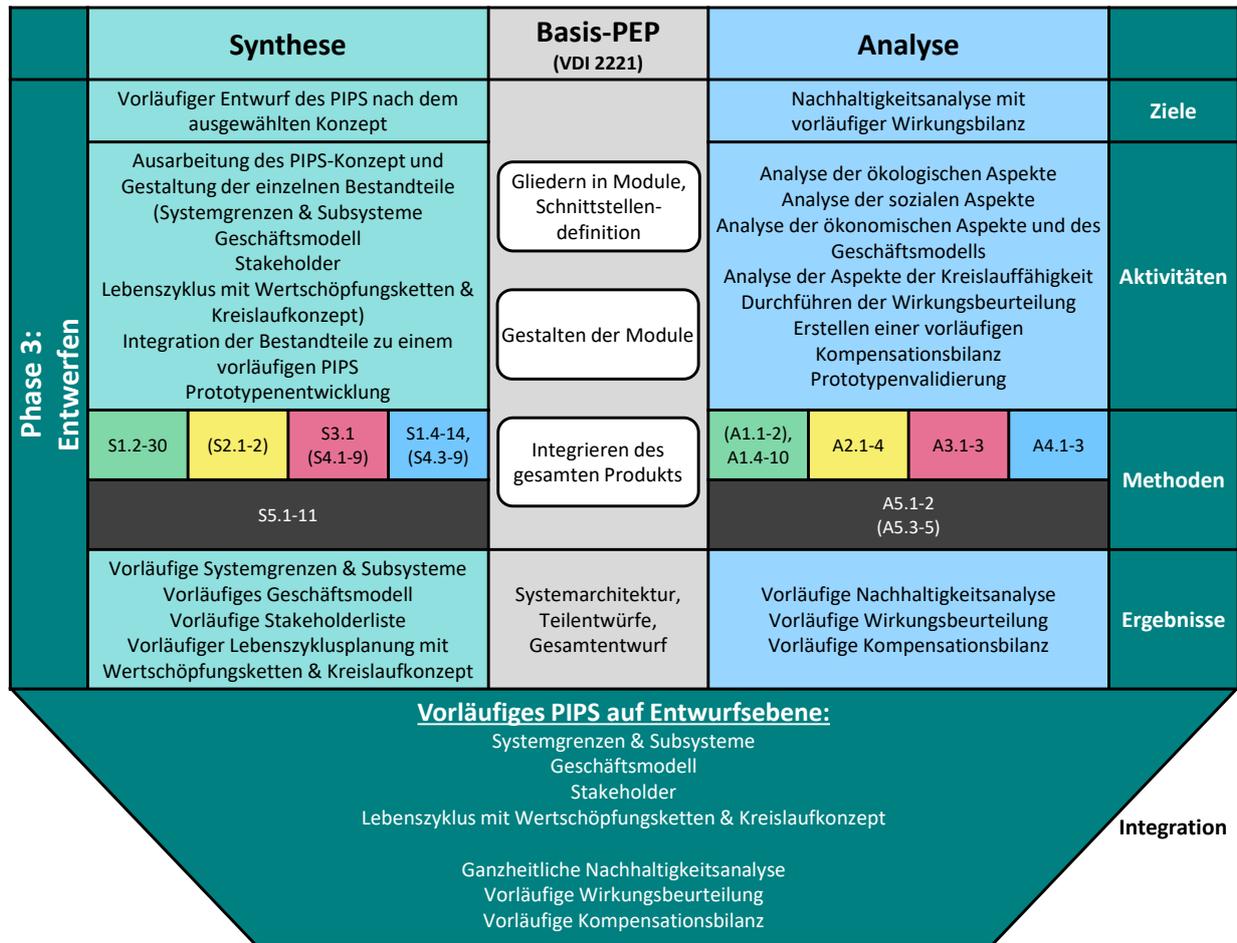


Abbildung 5-12: PIPE-PEP Phase 3 - Entwerfen

Konkret werden diese Ergebnisse auf Synthese- und Analyseseite durch spezifische **Aktivitäten** erarbeitet, die abermals mit entsprechenden Methoden unterstützt werden. Um das PIPS-Konzept auszuarbeiten, werden die einzelnen Bestandteile, wie das Geschäftsmodell oder der Lebenszyklus, mit den Wertschöpfungsketten und dem Kreislaufkonzept durch spezifische **Methoden**, wie zum Beispiel aus dem Bereich des Ecodesigns (Tabelle 5-6: S1.2-30), gestaltet. In dieser Phase des PEP empfehlen sich außerdem ganzheitliche Syntheseansätze wie Design for Sustainability (Tabelle 5-6: S5.1-11), um die Wechselwirkungen zwischen den Dimensionen der Nachhaltigkeit bereits bei der Ausgestaltung angemessen berücksichtigen zu können. Ist die Entwicklung der notwendigen Bestandteile des PIPS im Einzelnen abgeschlossen, erfolgt deren **Integration zum vorläufigen Produktsystem**. Dabei wird auf Vollständigkeit und die Erfüllung der im PIPS-Profil festgelegten Anforderungen geachtet. Darüber hinaus kann eine Entwicklung von

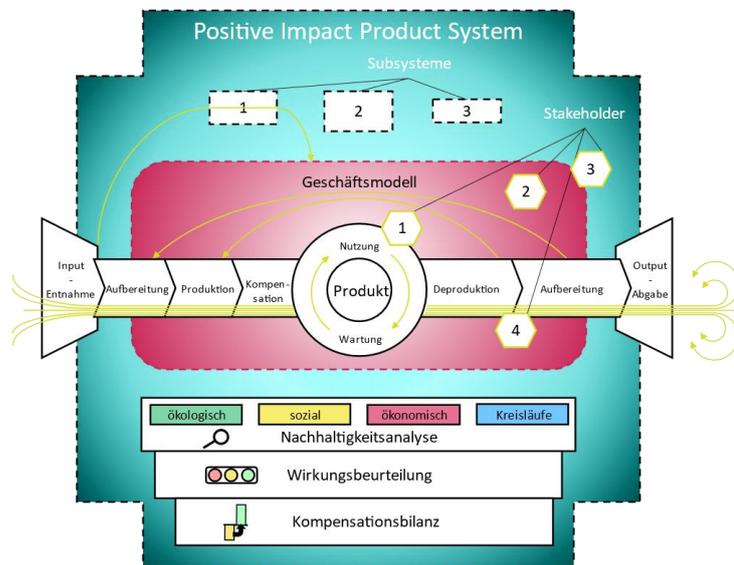
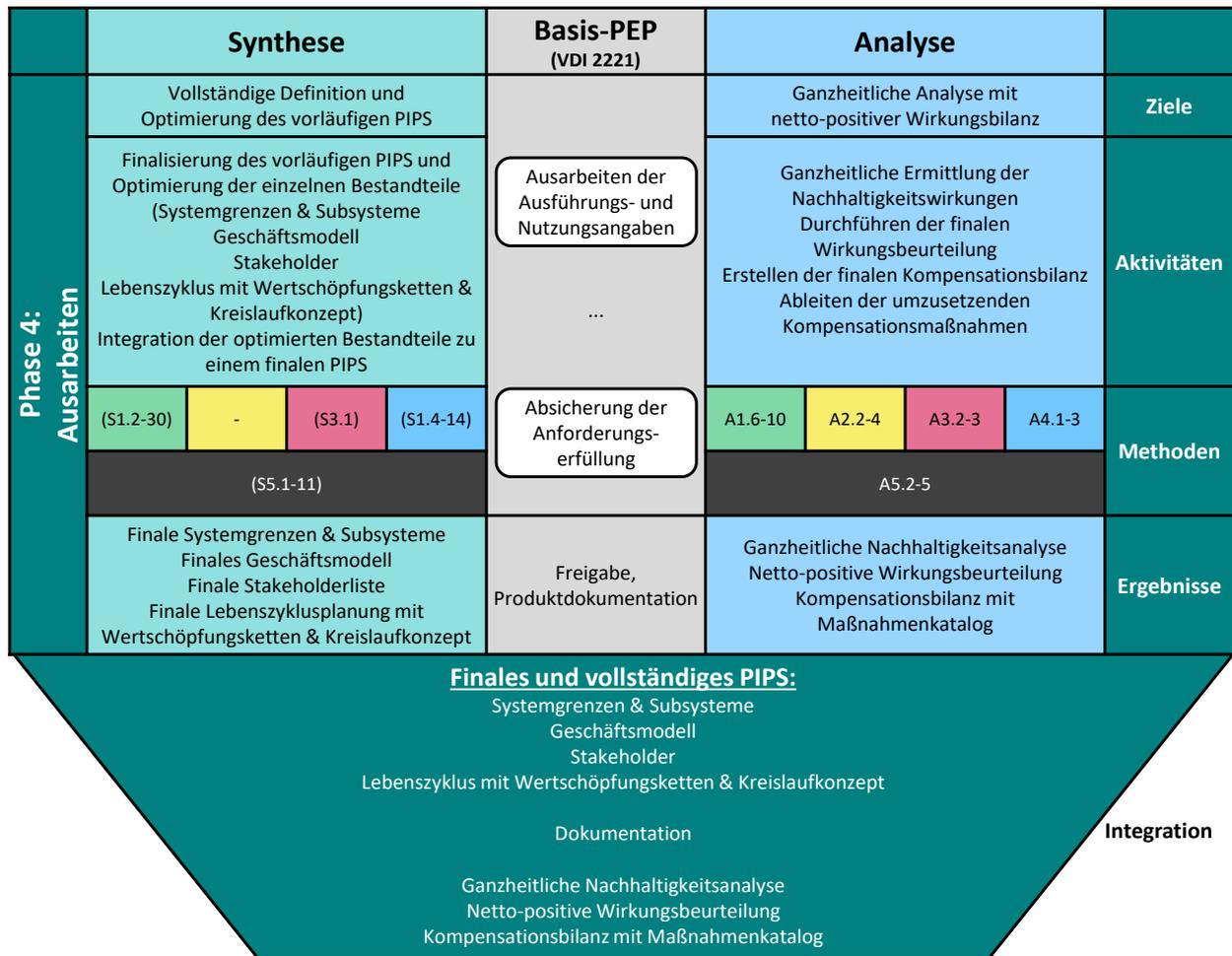
Prototypen sinnvoll sein, die das Produktsystem oder einzelne Teile davon, wie das Produkt selbst, abbilden.

Durch diese Syntheseaktivitäten steigt der Detailgrad des zu entwickelnden PIPS. Obwohl es noch nicht abschließend definiert wird, ermöglicht dies bereits eine **erste quantitative Analyse** der Nachhaltigkeitswirkungen. Um den Aufwand dieser vorläufigen Analyse gegenüber ganzheitlichen Ansätzen zu verringern, wird an dieser Stelle im PEP zunächst der Einsatz von spezifischen Methoden, wie der Ökobilanz (Tabelle 5-7: A2.4) oder dem S-LCA (Tabelle 5-7: A1.6) empfohlen. Denkbar ist ebenfalls der Einsatz von vereinfachten ganzheitlichen Ansätzen wie dem „Tiered approach“ des LCSA (Tabelle 5-7: A5.1) oder die Verwendung von generischen Daten aus Datenbanken, um die späteren Nachhaltigkeitswirkungen des vorläufigen PIPS abschätzen zu können. Die ermittelten Wirkungen werden im Rahmen des PIOL einer Wirkungsbeurteilung unterzogen. Falls erforderlich, können die Wirkungen durch den erneuten Einsatz von Synthesemethoden und die entsprechende Modifikation des Produktsystems im PIOL angepasst werden. Die darauffolgende vorläufige Kompensationsbilanz stellt sicher, dass für alle verbleibenden negativen Auswirkungen wirkungsgerechte Kompensationsmaßnahmen zur Verfügung stehen. Damit kann die netto-positive Wirkungsbilanz des vorläufigen PIPS überprüft und für die finale Ausarbeitung gewährleistet werden. Darüber hinaus sollten die entwickelten Prototypen validiert werden, um beispielsweise die Funktionserfüllung oder die Reparierbarkeit abzusichern. Die Teilergebnisse der Phase 3 werden in der **Integrationsphase** zusammengeführt und im vorläufigen PIPS festgehalten. Dieses vollständige Produktsystem auf Entwurfsebene bietet wiederum die Basis für die darauffolgende letzte Phase des PEP.

#### 5.5.5 Phase 4: Ausarbeiten

In der Phase 4 des PIPE-PEP gilt es, das **finale PIPS zu generieren**. Wie in Abbildung 5-13 visualisiert und in den Anforderungen an den PIPE-PEP gefordert (Tabelle 4-5: 4), ist das Ergebnis das in Kapitel 5.3 beschriebene PIPS. Im Rahmen des **Basis-PEP** werden Aktivitäten wie das „Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben“ und die „Absicherung der Anforderungserfüllung“ umgesetzt, woraus die Produktdokumentation und die Freigabe des Produkts folgen [VDI19a]. Durch die Synthese in der vierten Phase soll das vorläufige PIPS zum einem finalen Produktsystem ausgearbeitet und im Sinne des PIPE-Modell optimiert werden. Zum anderen soll dieses PIPS eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsanalyse enthalten und dank entsprechender Kompensationsmaßnahmen eine netto-positive Wirkungsbilanz aufweisen.

In Abhängigkeit vom Detailgrad und dem Optimierungspotenzial des in Phase 3 generierten vorläufigen PIPS kann der Umfang der durchzuführenden **Syntheseaktivitäten** variieren. Zum Optimierungspotenzial kann beispielsweise eine Verbesserung der Wirkungsbilanz oder der Produktfunktionalität zählen. Grundsätzlich ist der Lösungsraum in diesen späten Phasen des PEP bereits erheblich eingeschränkt, wodurch der Einsatz von Synthesemethoden nur noch eingeschränkt möglich ist. Daher steht die finale Ausarbeitung und Optimierung einzelner Bestandteile des Produktsystems zunächst im Vordergrund.



**Abbildung 5-13: PIPE-PEP Phase 4 - Ausarbeiten**

Hierdurch werden die finale Systemgrenze und die darin enthaltenen Subsysteme abschließend definiert. Ebenso wird das Geschäftsmodell sowie der Lebenszyklus endgültig formuliert. So werden unter anderem in den Wertschöpfungsketten die Lieferanten festgelegt und Produktionssysteme ermittelt. Im Kreislaufkonzept werden außerdem entsprechende Service- und Rücknahmesysteme etabliert. Dabei sind auch alle später beteiligten Stakeholder zu definieren. Die

optimierten und endgültigen Bestandteile werden zu einem vollständigen Produktsystem abermals zusammengeführt.

Dies ermöglicht letztlich die **ganzheitliche Nachhaltigkeitsanalyse des finalen Produktsystems**, auf die in Phase 4 des PIPE-PEP der Schwerpunkt gelegt wird. Hierbei sollten in erster Linie die vorgestellten ganzheitlichen Ansätze (Tabelle 5-7: A5.2-5) zum Einsatz kommen. Dabei profitieren Analysemethoden wie C-LCSA von den in Phase 3 erarbeiteten vorläufigen Ergebnissen der spezifischen Analysen mittels LCA, S-LCA oder dem MCI, die in der Regel nur noch auf die Anpassungen des Produktsystems in der vierten Phase adaptiert werden müssen. Nach Möglichkeit sollten bei der Analyse der Nachhaltigkeitswirkungen die generischen Daten aus Datenbanken durch eigens ermittelte Daten des realen Produktlebenszyklus ersetzt werden, um validere Ergebnisse zu erhalten. Ist die finale Nachhaltigkeitsanalyse abgeschlossen, erfolgt eine **abschließende Wirkungsbeurteilung**, in der nur noch positive und kompensierbare negative Auswirkungen auftreten. Für die verbleibenden negativen Auswirkungen wird eine **Kompensationsbilanz** aufgestellt, die diese überkompensiert, sodass eine netto-positive Bilanz erzielt wird. Die notwendigen Kompensationen werden in einem Maßnahmenkatalog festgehalten und die entsprechenden Projekte initiiert. Darüber hinaus erfolgt eine abschließende **Dokumentation**, in der alle relevanten Analysen und Wirkungsbilanzen nachvollziehbar transparent gemacht werden, um die Überprüfung der Netto-Positivität des PIPS auch für Dritte zu ermöglichen. Gemeinsam ergeben diese Elemente **das finale und vollständige PIPS als Ergebnis des PIPE-PEP**, das umfassend in Kapitel 5.3 beschrieben wurde.

Die Beschreibung des PIPE-PEP komplettiert somit die Vorstellung des PIPE-Modells, wodurch die „Präskriptive Studie“ im Vorgehen nach DRM (Kapitel 1.3) vollständig dargestellt wurde. In den folgenden Kapiteln dieser Arbeit gilt es, das vorgestellte Produktentstehungsmodell beispielhaft anzuwenden und anschließend zu diskutieren.

## 6 Validierung des PIPE-Modells durch Fallbeispiele

Im Vorgehen nach DRM (Kapitel 1.3) ist vorgesehen das in der „Präskriptiven Studie“ vorgestellte Modell im Rahmen einer zweiten „Deskriptiven Studie“ beispielhaft anzuwenden. Diese „Deskriptive Studie II“ soll zeigen, welchen Einfluss das Modell auf die zuvor aufgedeckten Defizite im Bereich der *Nachhaltigen Produktentstehung* hat und ob es für die vorgesehene Aufgabe effektiv genutzt werden kann. Darüber hinaus können durch die praktische Anwendung des bisher nur theoretisch beschriebenen Produktentstehungsmodells die einzelnen Prozesse veranschaulicht und notwendige Verbesserungen für die weitere Entwicklung abgeleitet werden. Zu den genannten Zwecken wird das in Kapitel 5 vorgestellte PIPE-Modell nun anhand zweier Produktbeispiele mit unterschiedlicher Komplexität angewendet. Die Beispiele sind so gewählt, dass sie im Rahmen dieser Arbeit nachvollziehbar dargestellt werden können.

Die ersten Anwendungen des PIPE-Modells fanden unter anderem in mehreren studentischen Arbeiten [Andr21, Andr22, Jung22] statt, die im Einverständnis der Studierenden in dieser Arbeit teilweise reproduziert werden. Die Dokumentation der PIPE-Umsetzung wird zugunsten der Übersichtlichkeit auf die umgesetzten Aktivitäten, die wichtigsten Zwischenergebnisse und das Endergebnis des PIPE-PEP beschränkt. Dabei können auch der PIOL und die Integrationsphasen nicht strikt gemäß dem theoretischen Vorgehen aus Kapitel 5 abgebildet werden.

Nach einer kurzen Einführung in die Fallbeispiele in Kapitel 6.1 erfolgt die Vorstellung der Entwicklung eines Kinderlaufrades nach PIPE in Kapitel 6.2 und die Anwendung des Modells auf die Entwicklung eines e-Bikes in Kapitel 6.3.

### 6.1 Einführung und Ziele

Um das beschriebene PIPE-Modell validieren zu können, muss es auf die Entwicklung konkreter Produktbeispiele angewendet werden. Wie bei der inhaltlichen Abgrenzung dieser Arbeit in Tabelle 1-1 dargestellt, fokussiert sich die Validierung dabei auf technische Produkte, auch wenn eine Übertragung auf andere Branchen vorstellbar ist. Im Rahmen studentischer Abschlussarbeiten wurde der PIPE-PEP beispielhaft für die **Entwicklung eines Wasserfilters** [Jung22] und eines **Kinderlaufrades** [Andr22] genutzt. Dabei konnte die grundsätzliche Vorgehensweise getestet und wichtige Erkenntnisse für die Weiterentwicklung des PIPE-Modells gewonnen werden. In dieser Arbeit wird ebenfalls das Kinderlaufrad als erstes Produktbeispiel gewählt, da es eine etwas höhere Komplexität im Vergleich zum Wasserfilter aufweist und dennoch simpel genug ist, um den PEP nachvollziehbar darstellen zu können. Hierfür wurde auf Basis der Abschlussarbeiten der PIPE-PEP mithilfe des hier vorgestellten finalen PIPE-Modell erneut durchgeführt. Zusätzlich wird versucht das PIPE-Modell in der zweiten Fallstudie auf ein technisch komplexeres Produkt anzuwenden. Dazu soll ein e-Bike, also ein Fahrrad mit elektrischem Hilfsmotor zur Unterstützung des Tretens, mit netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen entwickelt werden. Die beiden **Entwicklungsaufgaben werden in den Fallstudien nicht erneut hinterfragt oder abstrahiert**, wie eigentlich in Kapitel 5.5.2 gefordert, um einen überschaubaren Lösungsraum zu wahren.

Das **Ziel der Validierung** des Modells anhand der beiden Fallstudien ist es, dessen **Eignung zur systematischen Entwicklung von Produkten mit netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen** zu überprüfen. Durch die exemplarische Anwendung auf die Entwicklung eines Kinderlaufrades und eines e-Bikes soll gezeigt werden, dass das Modell sowohl praxistauglich als auch nachvollziehbar im PEP eingesetzt werden kann, insbesondere bei der Berücksichtigung der vielseitigen Herausforderungen im Bereich der *Nachhaltigen Produktentstehung*. Ein zentrales Kriterium ist dabei die **Bewertung der Ergebnisqualität in Bezug auf Nachhaltigkeit**, um sicherzustellen, dass die Anwendung des Modells zu Produkten führt, die tatsächlich netto-positive Auswirkungen auf die Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft haben. Weiterhin soll durch die Wahl von Produkten aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen die **Generalisierbarkeit und Übertragbarkeit** des Modells geprüft werden. Darüber hinaus werden die **Grenzen der Anwendbarkeit** aufgezeigt, um mögliche Limitationen zu identifizieren und Bereiche zu erkennen, in denen das Modell möglicherweise aktuell noch nicht vollständig umgesetzt werden kann. Solche Limitierungen können bei der Anwendung des Backcasting-Ansatzes (Kapitel 5.1) durchaus auftreten. So sollen auch **Potenziale für die Weiterentwicklung** des Modells und dessen **Übertragung** auf den heutigen Stand der Forschung und Technik offengelegt werden. Diese Validierungsziele orientieren sich an den Zielen der „Deskriptiven Studie II“ der DRM, welche darauf abzielt, methodische Ansätze auf ihre Realisierbarkeit und Wirksamkeit im praktischen Einsatz zu testen und fundierte Erkenntnisse zur Weiterentwicklung zu gewinnen.

## 6.2 Entwicklung eines PI-Kinderlaufrades

In der ersten Fallstudie wird das PIPE-Modell für die Entwicklung eines Kinderlaufrades eingesetzt. Ein Kinderlaufrad stellt ein technisches Produkt dar, das für Kleinkinder entwickelt wurde, um ihnen auf spielerische Weise das Radfahren näherzubringen. Es handelt sich um ein **zweirädriges, einspuriges Fahrzeug ohne Pedale**, bei dem sich die Kinder durch Abstoßen mit den Füßen fortbewegen. Als **inhärente positive Produkteigenschaft** fördert das Laufrad nicht nur die motorischen Fähigkeiten und den Gleichgewichtssinn von Kleinkindern, sondern kann auch potenziell, als eine Form nachhaltiger Mobilität betrachtet werden. Gleichzeitig trägt es zur Förderung der physischen Aktivität bei und stellt eine Möglichkeit für Eltern dar, gemeinsam mit ihren Kindern im Freien aktiv zu sein. In den folgenden Unterkapiteln werden die vier Hauptphasen des PIPE-PEP für die Entwicklung eines solchen Kinderlaufrades mit netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen beschrieben.

### 6.2.1 Phase 1: PI-Kinderlaufrad

Ziel der ersten Phase ist es, ausgehend von der Entwicklungsaufgabe ein **Profil für das spätere PIPS des Kinderlaufrades** zu erarbeiten (siehe Kapitel 5.5.2). Wie oben bereits erwähnt, wird der Entwicklungsauftrag aus Gründen der Darstellbarkeit im Rahmen dieser Fallstudie nicht weiter in Frage gestellt. Stattdessen wird auf Seiten der **Syntheseaktivitäten** eine **ausführliche Recherche** durchgeführt, die die Kundenbedürfnisse, die notwendigen Ressourcen und Stakeholder sowie

geltende Rahmenbedingungen identifizieren soll. Die **Marktanalyse** von [Andr21] umfasst 99 Kinderlaufräder und zeigt, dass eine Vielzahl von Marken und Bauformen auf dem Markt erhältlich ist. Die Preisspanne variiert dabei von einfachen Modellen ab rund 40€ bis hin zu technisch komplexeren Modellen für rund 1500€, was den Markt sowohl für preisbewusste als auch für qualitätsorientierte Käufer attraktiv macht. Insbesondere für nachhaltige bzw. umweltfreundliche Produkte scheint eine erhöhte Zahlungsbereitschaft bei Kinderspielzeugen zu bestehen [SKMK23]. Dennoch wird aus sozialer Sicht, nach Einsatz des „Design für Alle“-Ansatzes und DfBoP (Tabelle 5-6: S2.1-2), angestrebt, ein **Laufrad** zu entwickeln, das **für die breite Masse der Bevölkerung erschwinglich** bleibt. Mittels Target Costing (Tabelle 5-6: S3.2) kann somit ein **Zielpreis von 80€** für den deutschen Markt festgelegt werden.

Außerdem können aus der Marktanalyse wichtige Erkenntnisse zu den **gängigen Abmessungen und Geometrien** gewonnen werden, die als Anhaltspunkte für die spätere Konstruktion des PI-Kinderlaufrades genutzt werden können. Als weitere wichtige Randbedingung, die aus der Recherche hervorgeht, gilt es die Bestimmungen der Normenreihe „**DIN EN 71 – Sicherheit von Spielzeug**“ [DIN18, DIN21d, DIN21e] einzuhalten. Sie legt unter anderem Sicherheitsanforderungen fest, die gewährleisten, dass Spielzeuge mechanisch und physikalisch sicher, schwer entflammbar und frei von gefährlichen chemischen Stoffen sind.

Durch die Kombination mehrerer produktbezogener **Synthesemethoden** wie der Ten Golden Rules, Eco-Design und der verschiedenen Kreislaufstrategien (Tabelle 5-6: S1.1-2, S4.4) sowie weiterer Methoden zur Entwicklung eines nachhaltigen und kreislauffähigen Geschäftsmodells, wie dem CBMT (Tabelle 5-6: S4.5), entsteht parallel ein **Profil für das Produkt und das Geschäftsmodell**. Das Profil für das zu entwickelnde Kinderlaufrad soll die wesentlichen angestrebten Benefits – also den Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzen – gezielt in den Fokus nehmen und den Gestaltungsspielraum entsprechend spezifizieren. Die **Benefits** für die Zielgruppe der Kinder im Alter von 1,5 bis 4 Jahren sollen in einer einfachen Handhabung und altersgerechten Nutzbarkeit liegen. Dafür soll das Laufrad ein geringes Gewicht und eine niedrige Rollreibung aufweisen. Um den praktischen Nutzen für die Kinder über eine lange Zeit zu erhalten, soll der Sattel höhenverstellbar sein und eine Sitzhöhe von etwa 29 bis 35 cm ermöglichen, basierend auf Erkenntnissen der Marktanalyse. Das Laufrad soll für eine sichere und gesundheitlich unbedenkliche Nutzung gemäß den Anforderungen der DIN EN 71 für Spielzeugsicherheit ausgelegt sein. Eine breite Zugänglichkeit wird durch eine bezahlbare Preisgestaltung gewährleistet. Die möglichst hohe Kreislauffähigkeit des Produkts stellt einen weiteren zentralen Nutzen für Kunden und Anbieter dar. Das Laufrad soll hierfür einfach reparierbar, demontierbar und langlebig sein. Um diesen Benefit zu sichern, wird das Geschäftsmodell auf die Förderung des Kreislaufkonzepts und eine hohe Werterhaltung ausgelegt. Zur guten Nachverfolgbarkeit sozialer Aspekte und zur Förderung der lokalen Wertschöpfung soll das Produktsystem über transparente und kurze Lieferketten verfügen. Die **Zielkunden** umfassen sowohl Privatpersonen als auch institutionelle Abnehmer wie Kindergärten, die Wert auf langlebige und nachhaltige Kinderspielzeuge legen. Damit das spätere Produkt als „**Positive Impact Kinderlaufrad**“ (PI-Kinderlaufrad) bezeichnet werden kann, soll das

Produktsystem gemäß der Idee von PIPE eine **netto-positive Wirkungsbilanz in allen Nachhaltigkeitsaspekten** aufweisen. Neben dieser Beschreibung des PIPS-Profiles werden im Basis-PEP alle Anforderungen konkret in einer Anforderungsliste festgehalten, wie in der Arbeit von [Andr22] gezeigt.

Um eine **erste Analyse des PIPS-Profiles** durchführen zu können, wird das Profil grob skizziert, sodass die wesentlichen **In- und Outputs initial bewertet** werden können. Abbildung 6-1 zeigt eine solche Skizze des PIPS-Profiles, worin auch die Schlüsselressourcen und Schlüsselstakeholder dargestellt sind. Die **vier identifizierten Schlüsselstakeholder** sind in Form von Sechsecken schematisch im Produktsystem platziert. Dazu zählen die **Material- und Teilelieferanten (1)**, die entsprechenden Ressourcen zur Produktion des Laufrades bereitstellen. Die **Mitarbeiter des Unternehmens (2)** produzieren daraus das PI-Kinderlaufrad und sorgen nach der Nutzung auch für eine entsprechende Werterhaltung im Sinne der Kreislaufwirtschaft. Gegebenenfalls kooperieren sie dabei mit weiteren **Stakeholdern der Materialverwertung (3)**. Zu den weiteren Schlüsselstakeholdern zählen die **Kunden (4)**, darunter die Kinder, die das Laufrad nutzen sowie deren Eltern.

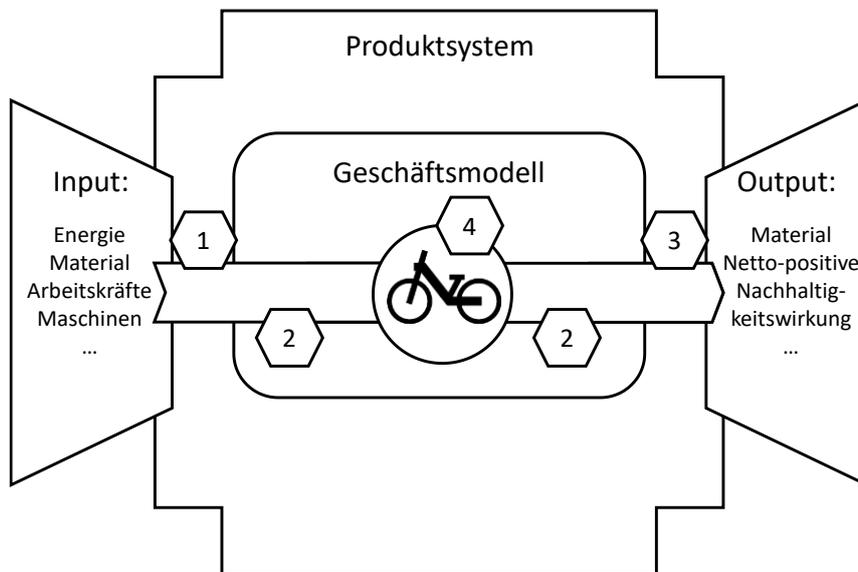


Abbildung 6-1: Skizze des PIPS-Profiles eines PI-Kinderlaufrad

Auch wenn das PIPS-Profil erst recht vage definiert ist, lassen sich bereits essenzielle **Schlüsselressourcen** ableiten. Dazu zählen auf Inputseite beispielsweise **Energie, Arbeitskräfte und Maschinen** zur Produktion des Kinderlaufrades. Ebenso müssen die **Materialien** bereitgestellt werden, aus denen das Laufrad gefertigt werden soll. Durch das geplante Kreislaufkonzept können diese Materialien auch wieder aus dem Produktsystem hinausfließen und in anderen Systemen genutzt werden. Als weiterer Output soll eine ganzheitlich **netto-positive Nachhaltigkeitswirkung** entstehen.

Auf Basis dieser Definition des PIPS-Profiles kann im Laufe des PIOL eine **erste Analyse** stattfinden. Diese fokussiert sich in erster Linie **aus Systemsicht auf die In- und Output Bewertung** und eine **Risikoanalyse der Schlüsselstakeholder**. Da das Profil auf eine möglichst lokale Wertschöpfung innerhalb Deutschlands abzielt, sind an dieser Stelle im PEP keine wesentlichen sozialen Risiken

wie beispielsweise Zwangsarbeit zu erwarten. Die In- und Output Wirkungsbeurteilung aus Abbildung 5-7 hilft dabei, die **Anforderungen an die notwendigen Schlüsselressourcen** genauer zu spezifizieren. Die benötigte Energie sollte aus erneuerbaren Quellen stammen oder, falls dies nicht möglich ist, sollten die negativen Auswirkungen der Nutzung anderer Energieformen vollständig kompensiert werden. Weiterhin sollten als Materialien nach Möglichkeit Sekundärmaterialien oder solche, die aus Abfällen wiedergewonnen werden, in das Produktsystem einfließen. Primärmaterialien aus erneuerbaren und nachhaltigen Quellen stellen hier eine weitere Möglichkeit dar. Dabei sollten diese Materialien so gewählt werden, dass sie nach ihrer Nutzung im Produktsystem möglichst ohne Qualitätsverluste weiterverwertet werden können. Alle in Abbildung 5-7 rot markierten Flüsse müssen durch die weitere Ausarbeitung des PIPS grundsätzlich vermieden werden. Ein weiterer positiver Effekt besteht in der Förderung der Bewegung und Koordination der Kinder, die das Laufrad nutzen. Eine Kostenanalyse ist zu diesem frühen Zeitpunkt im PEP noch nicht sinnvoll umsetzbar.

Diese **erste Wirkungsbeurteilung** lässt schließen, dass die Entwicklung eines PI-Kinderlaufrades mit netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen nach dem erarbeiteten PIPS-Profil realisierbar sein sollte. Nachdem die aus der Beurteilung abgeleiteten Anforderungen in das PIPS-Profil eingeflossen sind, muss der PIOL nicht erneut durchlaufen werden. Die Ergebnisse aus der ersten Phase können somit durch die **abschließende Integration** zusammengetragen werden. Das vollständige PIPS-Profil bildet die Grundlage für die weitere Entwicklung in der zweiten Phase des PIPE-PEP.

### 6.2.2 Phase 2: PI-Kinderlaufrad

Ziel der zweiten Phase ist, es auf Basis des PIPS-Profiles mehrere Konzepte für dessen Realisierung zu generieren und daraus das am besten geeignete Konzept auszuwählen. Im Rahmen der Fallstudie entstehen verschiedene PIPS-Konzepte, die durch die Kombination unterschiedlicher Geschäftsmodelle mit diversen Produktkonzepten generiert werden. An dieser Stelle wird jedoch aus Platzgründen nur ein Konzept für das Geschäftsmodell und zwei verschiedene Konzepte für die Produktebene vorgestellt.

#### **Entwicklung des Geschäftsmodells**

Das Geschäftsmodell wird in Abbildung 6-2 dargestellt und zuerst vorgestellt, da es **zusätzliche Anforderungen an das Produktkonzept** stellt und folglich vor diesem erarbeitet wurde. Durch das Geschäftsmodell werden außerdem wichtige Phasen des Produktlebenszyklus sowie weitere Stakeholder und Werterhaltungsoptionen festgelegt, welche ebenfalls visualisiert sind. Der **Produktlebenszyklus** beginnt auf der linken Seite mit noch vage formulierten Inputs, wie in der ersten Phase. Die folgende Aufbereitungsphase, in der die Inputs für den weiteren Lebenszyklus aufgewertet werden, liegt außerhalb des konzipierten Geschäftsmodell und wird voraussichtlich von externen **Material- und Teilelieferanten** (1) übernommen. Diese liefern die benötigten Materialien und Teile für die Produktion der Laufräder und eventuell benötigter Ersatzteile. Wie das rot hinterlegte Geschäftsmodell zeigt, gehören die Produktion und die darauffolgenden Phasen zum Geschäftsmodell und werden von internen **Mitarbeitern** (2) des Unternehmens umgesetzt.



Tabelle 6-1: Morphologischer Kasten für das PI-Kinderlaufrad mit Konzept A und B

Baugruppe/ Funktion	Teillösung 1	Teillösung 2	Teillösung 3
<b>Rahmen</b>			
Grundstruktur	„Diamant“-Form	Balkenrahmen (A,B)	
<b>Abrollinheit</b>			
Bereifung	Luftbereifung (A)	Vollmaterial (B)	Materialnoppen
Rad	Drahtspeichen	n-Speichen (B)	Scheibenfelge (A)
Lagerung	Wälzlager (A,B)	Gleitlager	Magnetlager
<b>Lenkeinheit</b>			
Lenkelement	Rohrlenker (A,B)	Lenkrad	
Lenklagerung	Wälzlager	Gleitlager (A,B)	Magnetlager
Griffe	Elastomer (A)	Integriert (B)	keine
<b>Sitz</b>			
Sitzfläche	Fahrradsattel (A)	Polstermatte	Kein Polster (B)
Höhenverstellung	verschiebbar (A,B)	Steckelemente	keine
Feststellelement	Schnellspanner (A)	Druckknopf	Schrauben (B)

Wie im morphologischen Kasten und in den Skizzen gezeigt, wird bei beiden Konzepten das Prinzip des einfachen Balkenrahmens verfolgt. **Konzept A stellt dabei die komfortablere und technische aufwändigere Lösung** dar. Es verfügt beispielsweise über eine federnde Hinterradschwinge, Luftbereifung, separate Griffe aus Elastomer und einen gepolsterten sowie stufenlos höhenverstellbaren Sattel. **Konzept B hingegen stellt eine technisch einfachere Lösung** dar, die sich auf die Erfüllung der maßgeblichen Funktionen zu beschränken versucht. Dies beeinflusst auch die mögliche Materialauswahl für das spätere Laufrad. In Abbildung 6-3 sind die **potenziellen Materialien** in den Skizzen farblich hervorgehoben. Wie die Marktrecherche zeigt, eignen sich für Strukturbauteile wie den Rahmen oder die Vorderradgabel Metalle wie Stahl oder Aluminium, Holz sowie verschiedene Thermoplaste. Für stark beanspruchte Bauteile wie Achsen oder Schrauben werden Metalle verwendet. Zur Sicherstellung einer guten Haftung und eines gewissen Komforts ist für Reifen, Griffe oder Sattel voraussichtlich der Einsatz verschiedener Elastomere erforderlich.

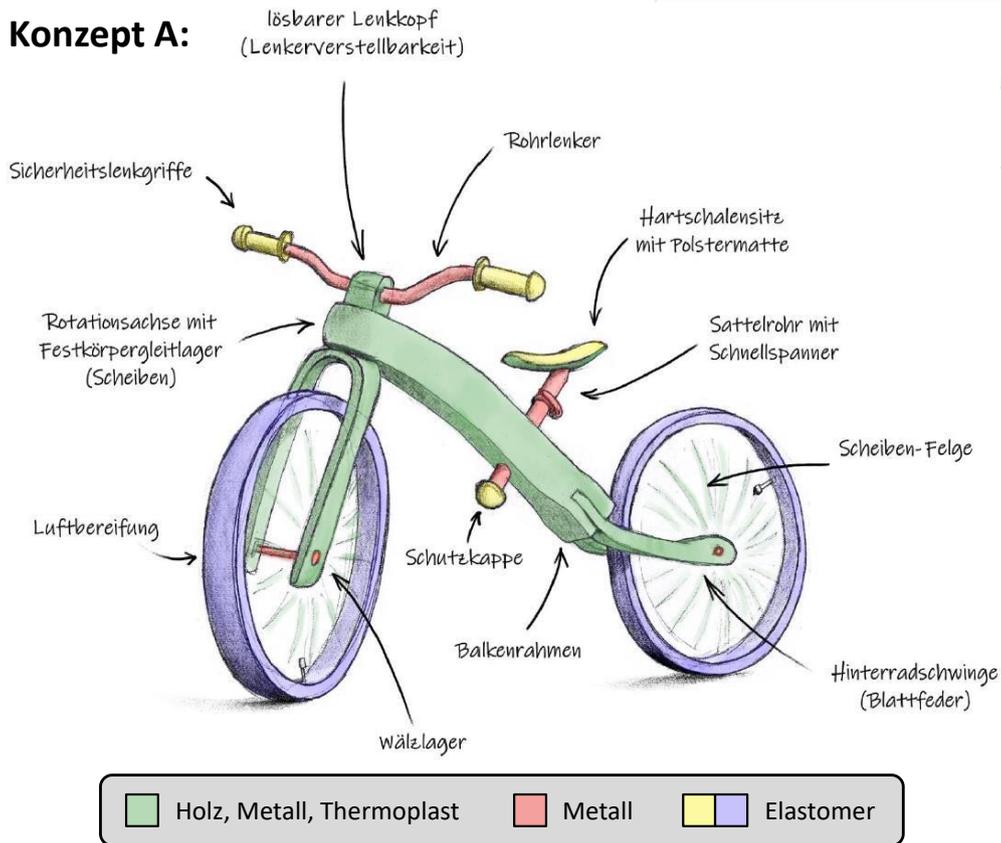
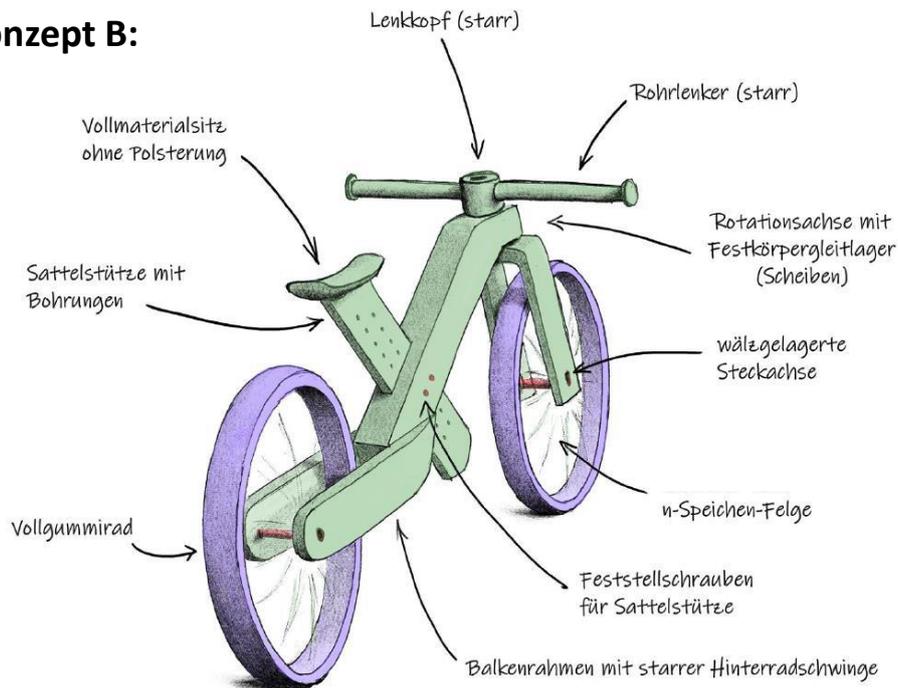
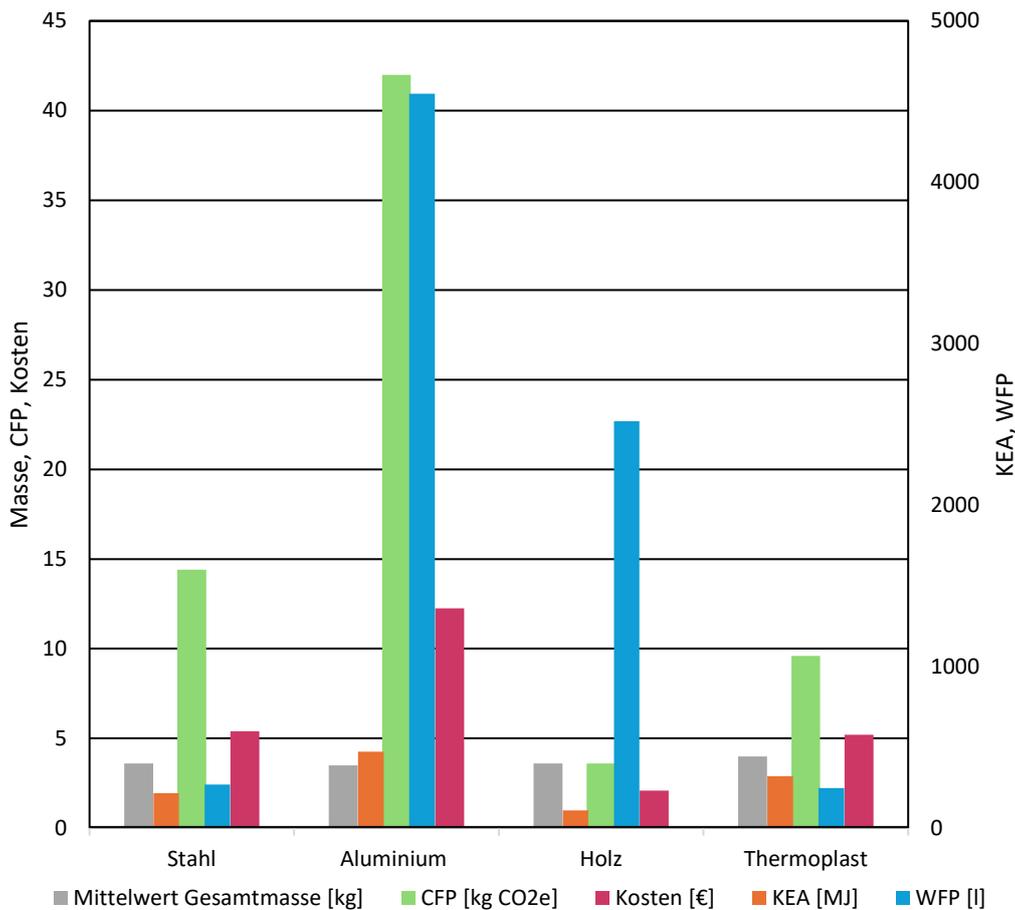
**Konzept A:****Konzept B:**

Abbildung 6-3: Konzept A und B für das PI-Kinderlaufrad nach [Andr22]

**Analyse der Nachhaltigkeitsaspekte**

Nach dem groben Entwurf der Konzepte erfolgt beim Durchlaufen des PIOL eine erste Analyse der Nachhaltigkeitsaspekte. Diese wird im Folgenden beispielhaft durch die **Analyse möglicher Materialgruppen für die Strukturbauteile** des Laufrades aufgezeigt. Dabei erfolgt ein Vergleich

der in der Marktanalyse am häufigsten verwendeten Materialien – **Stahl, Aluminium, Holz und Thermoplaste** – anhand von Durchschnittskennwerten aus Materialdatenbanken (Tabelle 5-7: A1.5) und einer Marktrecherche. Um die möglichen Umweltauswirkungen an dieser Stelle im PIPE-PEP abschätzen zu können, werden Durchschnittswerte für den **KEA**, den **CFP**, den **WFP** und die **Kosten** pro kg des Materials für die Materialbereitstellung und eine gängige Weiterverarbeitung abgerufen. Anschließend werden die Werte, für die in der Marktrecherche ermittelten, durchschnittlichen Gesamtmassen der vier Rahmenmaterialien, multipliziert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-4 dargestellt. Zusätzlich wird die grundsätzliche **Recyclingfähigkeit der Materialien** untersucht.



**Abbildung 6-4: Vergleich der Materialklassen für mögliche Strukturwerkstoffe**

Da ein möglichst kreislauffähiges und langlebiges Laufrad entstehen soll, wird Holz aufgrund der fehlenden Recyclingfähigkeit ausgeschlossen. Aluminium scheidet aufgrund der höchsten Werte für KEA, CFP und WFP aus. Im Vergleich der Umweltauswirkungen und aus Kostensicht liegen Rahmen aus Stahl und aus Thermoplasten dicht beieinander. Da der zu erwartende CFP eines Rahmens aus Thermoplast niedriger eingeschätzt wird, scheint in dieser frühen Entwicklungsphase der **Einsatz von recycelten Thermoplasten** die nachhaltigste Alternative zu sein und wird daher im weiteren PEP verfolgt.

### Wirkungsbeurteilung

Im Rahmen des PIOL erfolgt eine umfassende Wirkungsbeurteilung der In- und Outputs der beiden PIPS-Konzepte, die bei der Integration der zweiten Phase auch die Grundlage für eine Konzeptauswahl bietet. Aus Nachhaltigkeitssicht fallen dabei insbesondere die Bauteile aus Elastomeren wie Griffe, Sattel oder Reifen auf. Da Elastomere aus technischen und wirtschaftlichen Gründen aktuell recht niedrige Recyclingquoten aufweisen [RoMS17], gilt es, diese Materialien möglichst zu vermeiden und zu reduzieren. Dies führt unter anderem zur **Auswahl des Konzepts B für die weitere Entwicklung**, welches bis auf die Reifen gänzlich auf Elastomere verzichtet. Aufgrund der reduzierten Materialvielfalt und der vereinfachten technischen Gestaltung erweist sich dieses Konzept prinzipiell als geeigneter für die Entwicklung eines netto-positiven Produktsystems. Um die **Recyclingfähigkeit der Reifen** bereits in der Konzeptphase sicherzustellen, wurde eine detailliertere Materialauswahl durchgeführt. Ethylen-Vinylacetat (EVA) wurde als potenziell recyclingfähiges Material identifiziert, das aufgrund seiner Abriebfestigkeit und stoßdämpfenden Eigenschaften auch im industriellen Maßstab, beispielsweise für Schuhsohlen, eingesetzt wird [BFSV23, LFRD15]. Außerdem besteht die Möglichkeit, **biobasiertes EVA** aus erneuerbaren Rohstoffen herzustellen, welches ebenfalls recyclebar ist [Bras24]. Ein möglicherweise auftretender Reifenabrieb des biologisch nicht abbaubaren EVA wird als Emission betrachtet, die entsprechend kompensiert werden muss. Durch die vergleichsweise geringe Belastung der Reifen und der hohen Abriebfestigkeit des gewählten Werkstoffs werden die Materialverluste jedoch sehr gering eingeschätzt. Optimal wären hier Reifen, deren Abrieb vollständig biologisch abbaubar ist. Auch wenn sich solche Reifen in Entwicklung befinden [Good20, Köll17], konnte kein marktreifer Werkstoff identifiziert werden, sodass EVA als Reifenmaterial gewählt wurde. Damit kann vorerst sichergestellt werden, dass die Wirkungsbeurteilung der In- und Outputs nach Abbildung 5-7 den Vorgaben von PIPE entspricht. Daraus ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle 6-2 dargestellten **Schlussfolgerungen für die weitere Ausarbeitung** in der dritten Phase des PIPE-PEP.

Tabelle 6-2: Wirkungsbeurteilung des Konzept B und Schlussfolgerungen für die weitere Entwicklung

Input	Output
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metall aus sekundären Quellen</li> <li>• Thermoplast aus sekundären Quellen bzw. aus Abfall oder Umweltverschmutzungen</li> <li>• Erneuerbare Energie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metall, Thermoplast und EVA als Sekundärmaterialien</li> <li>• Förderung der Bewegung und Koordination</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Primäres biobasiertes EVA aus erneuerbaren, nachhaltig bewirtschafteten Quellen</li> <li>• (Nicht erneuerbare Energie mit entsprechender Kompensation)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (Sekundärmaterialien mit Qualitätsverlusten)</li> <li>• Emissionen mit entsprechender Kompensation</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• -</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• -</li> </ul>

Möglichst positive Inputs entstehen durch die Verwendung von **Sekundärmaterialien**, wie Metalle und Thermoplaste aus sekundären Quellen bzw. Abfall oder der Beseitigung von Umweltverschmutzungen. Insbesondere in der **Reduzierung von bestehenden Umweltverschmutzungen** besteht die Möglichkeit, **positive Effekte für die Umwelt** zu erzielen. Ebenso sollten im späteren Produktsystem nach Möglichkeit ausschließlich **erneuerbare Energien** eingesetzt werden. Ist dies nicht umsetzbar, müssen nicht erneuerbare Energien durch geeignete Kompensationsmaßnahmen in ihrer Bilanz netto-positiv gestaltet werden. Wie oben erwähnt, sollte das EVA für die Reifen aus **erneuerbaren, nachhaltig bewirtschafteten Quellen** gewonnen werden. Auf Outputseite sollte das Produktsystem gewährleisten, dass alle Materialien in möglichst **gleicher Qualität wiederverwendet** werden können. Die Förderung der Bewegung und Koordination bleibt als positive inhärente Wirkung des Kinderlaufrades bestehen. Der Anteil an Sekundärmaterialien mit Qualitätsverlusten und Emissionen sollten in der weiteren Ausarbeitung des Konzepts nach Möglichkeit reduziert werden. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass in dieser frühen Entwicklungsphase nicht alle Auswirkungen bekannt sein können. So ist beispielsweise die Nutzung von Landflächen im Produktsystem zwar mit hoher Wahrscheinlichkeit nötig, wird aber an dieser Stelle noch nicht analysiert und bewertet.

### **Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

Phase 2 des PIPE-PEP wird somit erfolgreich durch die Erarbeitung eines konzeptionellen Geschäftsmodells, eines Stakeholderüberblicks sowie eines konzeptionellen Lebenszyklus abgeschlossen (Abbildung 6-2). Darin sind die Wertschöpfungsketten und ein Kreislaufkonzept, das auf eine nachhaltige und kreislauffähige Gestaltung des Produktsystems abzielt, bereits integriert. Die ersten Konzeptskizzen des Produkts und die qualitative Nachhaltigkeitsanalyse vollenden die Konzeptphase, in der die potenziellen Wirkungen des Produktsystems bewertet und in Bezug auf ihre netto-positive Wirkung geprüft wurden. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die nächste Phase und schaffen die Basis für die weiterführende Entwicklung des Produktsystems.

### **6.2.3 Phase 3: PI-Kinderlaufrad**

In der dritten Phase gilt es, das Produktsystem auf Grundlage des PIPS-Konzept vollständig zu entwerfen und auszuarbeiten, um daraufhin eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsanalyse mit vorläufiger Wirkungsbeurteilung durchführen zu können. In dieser Phase wird zunächst die vorläufige Konstruktion des Laufrades vorgestellt und die entsprechende Materialauswahl erläutert. Die Beschreibung weiterer Bestandteile des Produktsystems, einschließlich des Geschäftsmodells, der Stakeholder sowie des Lebenszyklus mit Wertschöpfungsketten und Kreislaufkonzept, erfolgt im Anschluss, sobald alle erforderlichen Materialien und Wertströme definiert sind. Damit werden auch die Voraussetzungen für eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsanalyse geschaffen.

### Vorläufiges Produktsystem in Phase 3

In Abbildung 6-5 ist der Entwurf des PI-Kinderlaufrades nach [Andr22] gezeigt. Dieser Entwurf dient als **vorläufiger Gesamtentwurf des Produkts** in Phase 3 dieser Fallstudie. Eine detaillierte Beschreibung der konstruktiven Maßnahmen, Entscheidungen und Methoden ist in [Andr22] dokumentiert, sodass hier nur auf die wesentlichen Merkmale eingegangen wird. Der Schwerpunkt liegt auf der **Materialauswahl** und den eingesetzten **Fertigungsverfahren**, da diese die wesentlichen Nachhaltigkeitswirkungen des Produkts maßgeblich bestimmen. Wie farblich in Abbildung 6-5 visualisiert, besteht der vorläufige Entwurf aus **vier verschiedenen Werkstoffen** (zuzüglich eines Schmierfetts).

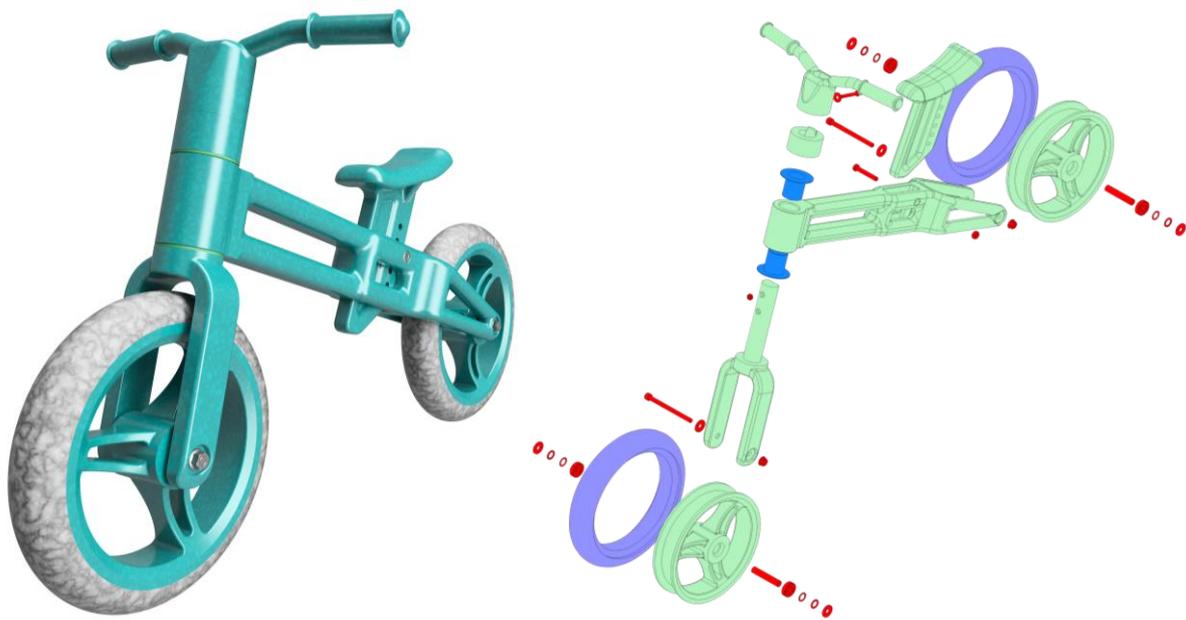


Abbildung 6-5: CAD-Entwurf und Explosionszeichnung des PI-Kinderlaufrad nach [Andr22]

Die **Strukturbauteile** Rahmen, Lenker, Gabel, Felgen und Sattel sollten dabei aus **recyceltem Polyethylen** mit hoher Dichte (englisch: High Density Polyethylen (HDPE)) im **Spritzgussverfahren** hergestellt werden. Dieses Material wurde gewählt, da es zu den am häufigsten produzierten Kunststoffarten in Deutschland [LSFH22] und auch weltweit zählt. Daher stehen enorme Mengen für ein potenzielles Recycling zur Verfügung, die zu einem großen Teil auch in der Umwelt in Form von Plastikabfällen vorhanden sind [HeBu19]. HDPE ist außerdem die häufigste Kunststoffart, die in Ozeanen und Flüssen als Umweltverschmutzung auftritt [Ocea24a]. Eine der positiven Wirkungen des späteren Produktsystems soll darin bestehen, Umweltverschmutzungen zu verringern und dadurch aktiv zur Regeneration der Natur von negativen menschlichen Einflüssen beizutragen. Es existieren mehrere gemeinnützige Stiftungen und Projekte, die diese **Kunststoffabfälle aus der Umwelt weltweit sammeln, sortieren und zu Rezyklaten verarbeiten** [Ocea24b, Ocea24c, Ocea24d]. Die Strukturbauteile des Laufrades sollen aus solchen HDPE-Rezyklaten hergestellt werden. Sollte sich im weiteren Entwicklungsprozess zeigen, dass aus fertigungstechnischen Gründen eine Beimischung von primärem HDPE erforderlich ist, besteht beispielsweise über das Programm „IMPAC+“ von „Oceanworks Inc.“ die Möglichkeit, den dadurch

entstehenden „Plastik-Fußabdruck“ durch das Entfernen weiterer Umweltverschmutzungen durch Plastik zu kompensieren [Ocea24e]. Um diesen zusätzlichen Aufwand möglichst zu vermeiden, wird angestrebt, den Anteil an recyceltem HDPE so hoch wie möglich zu halten.

Die zweite Materialart, die im PI-Kinderlaufrad verwendet wird, umfasst die **Bauteile aus Stahl**. Bei der Konstruktion wurde unter Einsatz verschiedener Synthesemethoden versucht, die Verwendung dieses Werkstoffs auf ein Minimum zu reduzieren, da die Herstellung und Verarbeitung in der Regel vergleichsweise energieintensiv sind. Der Einsatz ist nur an den am **höchsten belasteten Bauteilen** notwendig. Zusätzlich wurde im Sinne der Kreislaufwirtschaft darauf geachtet, überwiegend **Normbauteile** zu verwenden, die in großen Stückzahlen effizient produziert und nach ihrem Gebrauch im Kinderlaufrad nochmals wiederverwendet werden können. Es werden insgesamt vier **Schrauben** mit Muttern für die Achsen und die Befestigung von Sattelstütze und Lenker eingesetzt. Außerdem werden vier **Wälzlager**, zwei **Distanzhülsen** und mehrere **Unterlegscheiben** bzw. Distanzscheiben für eine Lagerung der Räder mit niedrigem Rollwiderstand gewählt. Auch hier sollen die benötigten Bauteile vollständig aus **rezykliertem Stahl** hergestellt werden, wie er beispielsweise durch die „XCarb® Initiative“ [Arce24] bereitgestellt wird. In dieser wird Stahl aus Stahlschrott mit ausschließlich erneuerbarer Energie produziert. Die Wälzlager werden in einer abgedichteten Ausführung ausgewählt, um sowohl das Eindringen von Schmutz als auch den Verlust von Schmierstoff zu verhindern und so eine lange Haltbarkeit zu gewährleisten. Ein passendes Lager wäre beispielsweise das einreihige Rillenkugellager „6001-C-2Z>V“ [Scha24]. Für die Fallstudie wird angenommen, dass alle Stahlbauteile aus dem rezyklierten Stahl hergestellt werden. Um die Nutzung fossiler Ressourcen zu vermeiden, muss ein **Schmierfett** gewählt werden, das aus **nachwachsenden Rohstoffen** gewonnen wird und gleichzeitig vollständig **biologisch abbaubar** ist. Solche Schmierfette sind aus der Produktion in Deutschland in verschiedenen Formen erhältlich [Kajo16, Kajo24].

Die Materialauswahl für die Reifen wurde in Phase 2 des PIPE-PEP vorgezogen und fiel auf EVA (siehe Kapitel 6.2.2). Die vierte Materialart im vorläufigen Entwurf wird durch die beiden **Gleitlagerbuchsen der Lenkung** bestimmt. Diese sorgen für eine leichtgängige Lenkung und tragen durch ihre Wartungsfreiheit zu einer längeren Lebensdauer des Laufrades im Vergleich zur Materialpaarung HDPE-HDPE bei. Solche Gleitlagerbuchsen können auch aus **nachwachsenden Rohstoffen** hergestellt werden, wie etwa die Gleitlager der Reihe „iglidur® N94“ [Iigus23, Iigus24], die einen Anteil von 94 % nachwachsender Rohstoffe aufweisen und zugleich recycelbar sind. Damit sind **alle fünf erforderlichen Materialarten festgelegt**, die zugleich den geforderten Prinzipien der Kreislaufwirtschaft entsprechen.

Infolgedessen lässt sich auch das Produktsystem weiter ausarbeiten und das **Geschäftsmodell sowie die Lebenszyklusphasen** näher bestimmen. Das vorläufige Produktsystem ist in Abbildung 6-6 mit allen Lebenszyklusphasen und Stakeholdern visualisiert. Zur besseren Übersichtlichkeit wurde dabei auf die Darstellung der zahlreichen umgesetzten Werterhaltungsoptionen, die in Abbildung 5-7 angedeutet sind, verzichtet, auch da diese im Text behandelt werden. Die Inputseite wurde entsprechend der ausgewählten Materialien genauer detailliert. Zudem werden für

die zugelieferten Bauteile und Rohstoffe des Kinderlaufrades, die nicht vom Unternehmen selbst gefertigt werden, **sechs zusätzliche Subsysteme für Zulieferer** notwendig. Die ersten drei Zulieferer sind für die Aufbereitung der Abfälle und Rohstoffe zuständig. **Zulieferer 1** stellt aus Stahlschrott mittels erneuerbarer Energie Recyclingstahl her und liefert es an **Zulieferer 4**, der daraus die Normteile wie Schrauben und Wälzlager fertigt, welche ohne weitere Bearbeitung in der unternehmensinternen Produktion beim Zusammenbau des Laufrades genutzt werden. **Zulieferer 2** bereitet aus nachwachsenden Rohstoffen biobasierte Vorprodukte auf. Diese sind für die Fertigung der Gleitlager durch **Zulieferer 5**, die Herstellung des biobasierten Schmierfett durch **Zulieferer 6** und die unternehmensinterne Produktion der Reifen aus biobasiertem EVA im Spritzgussverfahren notwendig. Die Strukturbauteile werden ebenfalls unternehmensintern durch Spritzgießen gefertigt. Dazu liefert **Zulieferer 3** das in der Umwelt gesammelte HDPE in Form von aufbereiteten Pellets zu. Nach dem erfolgreichen Zusammenbau wird zunächst die voraussichtlich notwendige, jedoch noch nicht genauer definierte **Kompensation** der entstehenden Auswirkungen vorgenommen. Die notwendigen Maßnahmen müssen erst durch die Analyse der Auswirkungen berechnet werden und erfolgen dann durch **unternehmensexterne Kooperationspartner**. Zusätzlich wird angestrebt, **soziale Projekte** durch das Geschäftsmodell zu fördern, welche ebenfalls durch ein weiteres Subsystem dargestellt sind. Das netto-positive Produkt wird anschließend durch ein externes **Logistikunternehmen** zu den Endkunden versendet. Wird das Laufrad nicht mehr genutzt, wird es über das gleiche oder ein anderes Logistikunternehmen zum Unternehmen zurückgesendet, woraufhin das Kinderlaufrad in der Deproduktion geprüft und zerlegt wird. Je nach Zustand des Produkts kann es komplett weiterverwendet werden oder nur einzelne Bauteile des Laufrades, die dann als Ersatzteile in die Wartung oder in die Produktion einfließen können. Defekte Bauteile werden auf Materialebene aufbereitet oder verwertet. Unternehmensintern sollen die **Strukturbauteile und die Reifen materiell recycelt** werden, indem sie zerkleinert und wieder im Spritzgussverfahren zu neuen Bauteilen geformt werden. Alternativ könnte das aufbereitete Granulat von HDPE und EVA auch als Material für andere Produktsysteme weiterverkauft werden. Ausgesonderte Stahlbauteile werden als Stahlschrott an Zulieferer 1 rückveräußert, der daraus wiederum Recyclingstahl produziert. Analog werden defekte Gleitlager an Zulieferer 5 zurückgesendet und dort zu N94-Granulat für die Produktion neuer Gleitlager aufbereitet. Einzig die geringe verbleibende Menge Schmierfett in den Wälzlagern kann nicht mehr auf materieller Ebene zurückgeführt werden und wird voraussichtlich im Recyclingprozess der Stahlbauteile in der Regel thermisch verwertet.

In Abbildung 6-6 sind zusätzlich die verschiedenen **Stakeholder** mit Sechsecken markiert und durchnummeriert. Durch die detaillierteren Lieferketten können diese nun genauer bestimmt werden, wie beispielsweise in Form der einzelnen Zulieferer. Durch die unternehmensinterne Aufbereitung der Reifen und Strukturbauteile und der Kooperation mit den Zulieferer 1 und 5 am EoL, wird die in Abbildung 6-2 genannte Stakeholdergruppe 3 obsolet und daher nicht mehr aufgeführt.

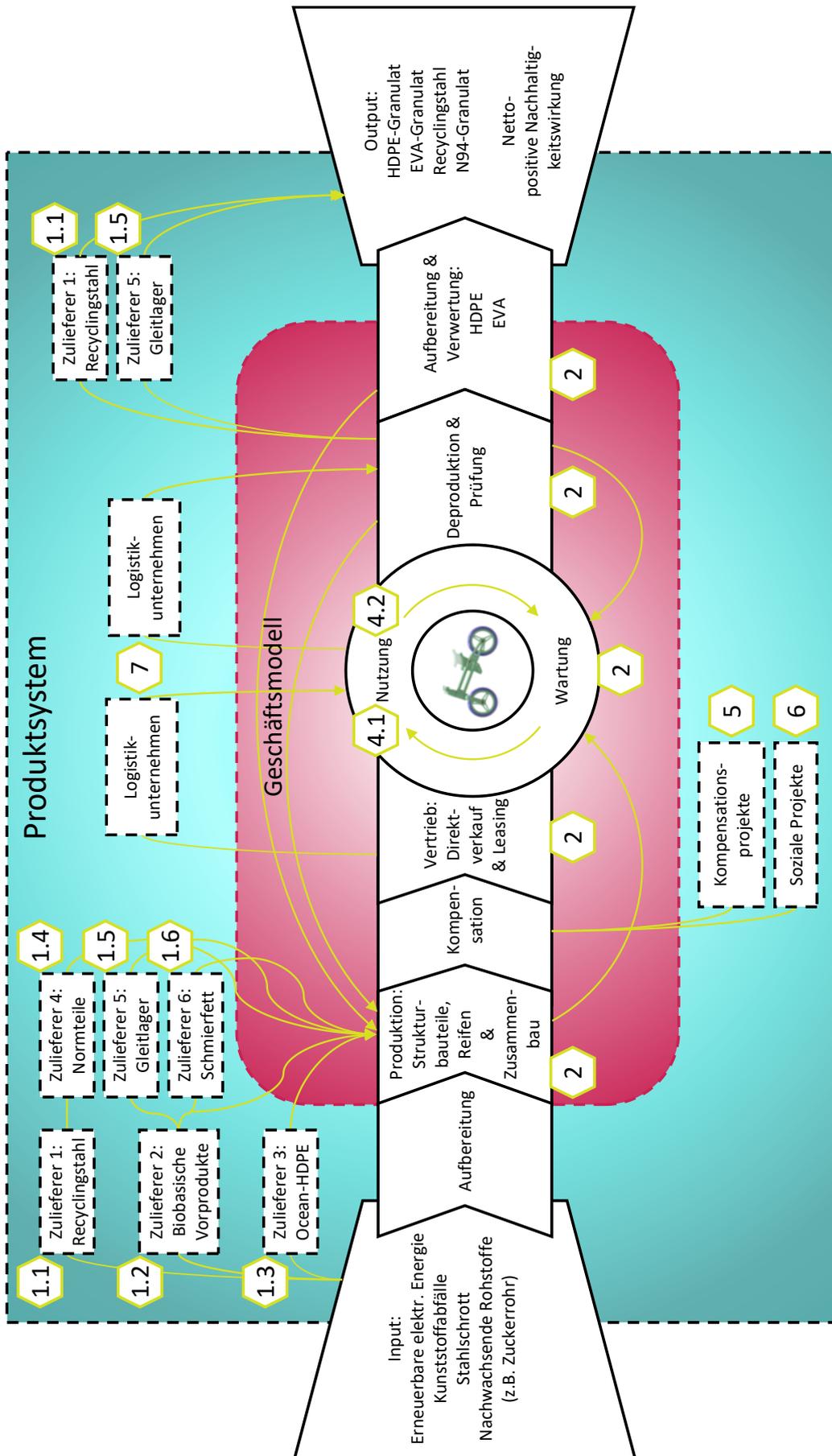


Abbildung 6-6: Vorläufiges Produktsystem in Phase 3 des PIPE-PEP

### **Ganzheitliche Nachhaltigkeitsanalyse**

Damit ist die Grundlage für eine erste umfassende Nachhaltigkeitsanalyse gegeben, die in der dritten Phase der Fallstudie durch die Anwendung der Methoden **LCA**, **LCC**, **S-LCA** und **MCI** (Tabelle 5-7: A1.6, A2.4, A3.2, A4.1) umgesetzt wurde. Im Folgenden werden nur die Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen für die weitere Entwicklung und die Kompensation negativer Auswirkungen aufgezeigt.

### **Analyse der ökologischen Aspekte**

Zur Analyse der ökologischen Auswirkungen wurde das beschriebene Produktsystem in der **Ökobilanz-Software** „SimaPro“ [Prés24] modelliert und die auftretenden Umweltauswirkungen mittels der hinterlegten „ecoinvent-Datenbank“ [Ecoi24] abgeschätzt. Das Produktsystem wurde nach der Beschreibung in [Andr22] mit den generischen Materialien und Prozessen der Datenbank nachmodelliert und mit der Wirkungsabschätzungsmethode „ReCiPe2016 Midpoint Hierarchist“ [HSES16] ausgewertet. Um den Einfluss des Kreislaufkonzepts abbilden zu können, werden zwei Szenarien kalkuliert. Im **Szenario „Entsorgung“** wird davon ausgegangen, dass das Kinderlaufrad nicht an den Hersteller zurückgesendet wird und stattdessen über die in der Datenbank hinterlegten kommunalen Entsorgungsprozesse in Deutschland als Abfall behandelt wird. Das zweite **Szenario „Recycling“** bildet die gewünschte Kreislaufführung der Kinderlaufräder ab und ist weiter unten im Rahmen der Kreislaufbewertung mittels MCI näher beschrieben. Die Modellierung in der Ökobilanz-Software SimaPro des Produktsystems für das Szenario „Recycling“ in Phase 3 ist im Anhang A.1 visualisiert. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzungen beider Szenarien werden der in Kapitel 5.4.2 beschriebenen Wirkungsbeurteilung unterzogen und, wie in Tabelle 6-3 gezeigt, in die gelbe und rote Kategorie eingeteilt.

Es wird deutlich, dass durch die Modellierung mit generischen Prozessen aus der ecoinvent-Datenbank **in allen Wirkungskategorien negative Umweltauswirkungen** festgestellt werden. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die **Verwendung generischer Daten in einer Ökobilanz** einen Kompromiss darstellt, da hierbei häufig auf globale oder nationale Durchschnittswerte, wie beispielsweise für den Strommix oder Materialherstellungsprozesse, zurückgegriffen wird. Diese Durchschnittswerte ermöglichen zwar eine schnelle Analyse der wahrscheinlichen ökologischen Auswirkungen, ohne alle realen und kontextspezifischen Prozesse des Produktsystems modellieren zu müssen, bergen jedoch das Risiko, Prozesse z.B. in Vorketten einzubeziehen, die in einem PIPS nicht erwünscht sind. Da im Rahmen der theoretischen Fallstudie keine Ökobilanzierung mit realen Daten des Produktsystems möglich ist, wird trotz dieser Umstände mit den generischen Werten und Prozessen der ecoinvent-Datenbank gerechnet und die so kalkulierten Wirkungen im PIOL bewertet.

Im Vergleich der beiden Szenarien sind die negativen Auswirkungen im Szenario „Entsorgung“ in allen Kategorien um ein Vielfaches höher als im „Recycling“-Szenario. Dies lässt sich durch die Einsparung der benötigten Ressourcen und Produktionsschritte erklären und unterstreicht die **ökologische Relevanz des Kreislaufkonzepts**.

Tabelle 6-3: Wirkungsabschätzungen der Ökobilanzen für beide Szenarien in Phase 3

Wirkungskategorien nach ReCiPe2016	Einheit	Szenario Entsorgung	Szenario Recycling
Klimaänderung	kg CO <sub>2</sub> eq	22,7	3,29
Ozonabbau in der Stratosphäre	kg CFC11 eq	6,64E-06	1,12E-06
Ozonbildung, Menschliche Gesundheit	kg NO <sub>x</sub> eq	2,24E-02	3,72E-03
Bildung von Feinstaub	kg PM2.5 eq	1,20E-02	1,84E-03
Ozonbildung, Terrestrische Ökosysteme	kg NO <sub>x</sub> eq	2,45E-02	4,15E-03
Terrestrische Versauerung	kg SO <sub>2</sub> eq	2,91E-02	4,28E-03
Frischwasser Eutrophierung	kg P eq	6,52E-03	7,39E-04
Marine Eutrophierung	kg N eq	1,07E-03	1,24E-04
Landnutzung	m <sup>2</sup> a crop eq	0,991	0,138
Mineralische Ressourcenverknappung	kg Cu eq	5,81E-02	8,84E-03
Fossile Ressourcenverknappung	kg oil eq	3,98	0,729
Wassernutzung	m <sup>3</sup>	0,157	0,0179
Ionisierende Strahlung	kBq Co-60 eq	2,34	0,250
Terrestrische Ökotoxizität	kg 1,4-DCB	217	44,4
Frischwasser Ökotoxizität	kg 1,4-DCB	1,21	0,149
Marine Ökotoxizität	kg 1,4-DCB	1,86	0,244
Humantoxizität, karzinogene Effekte	kg 1,4-DCB	3,83	0,597
Humantoxizität, nicht-karzinogene Effekte	kg 1,4-DCB	21,2	2,95

Die abgeschätzten negativen Auswirkungen sollen nach der **Vermeidungshierarchie** (Abbildung 5-6) in der weiteren Entwicklung nach Möglichkeit vermieden werden, insbesondere die **Wirkungen der roten Kategorie**, da diese nicht kompensiert werden können. Aus diesem Grund wurden die kritischen Wirkungen genauer analysiert, um zu identifizieren, welche Bauteile und generischen Prozesse im Modell der Ökobilanz für die nicht kompensierbaren Auswirkungen verantwortlich sind. Als eine der Hauptursachen für die Entstehung der rot kategorisierten Wirkungen konnten unter anderem die verschiedenen Vorketten des Strommix in der Produktion aufgedeckt werden, da hierdurch ionisierende Strahlung durch anteilige Verwendung von Kernenergie und verschiedene Toxizitäten im Rahmen fossiler Stromproduktion entstehen. Außerdem gehen aus den Prozessen der Metallverarbeitung mehrere rot kategorisierte Auswirkungen hervor, wie karzinogene Effekte auf den Menschen durch die entstehende Schlacke. Diese und weitere müssen durch entsprechende Anpassungen des Produktsystems in Phase 4 des PIPE-Modells adressiert und nach Möglichkeit vollständig vermieden oder durch nachhaltige Lösungen substituiert werden.

Für die **gelb kategorisierten Wirkungen** stehen grundsätzlich entsprechende Kompensationsmaßnahmen (Tabelle 5-4) zur Verfügung. Dennoch sollten diese Wirkungen im Sinne der Vermeidungshierarchie durch den weiteren Einsatz von Synthesemethoden weitestgehend reduziert werden. Hierfür werden in erster Linie **Leichtbaumethoden zur Verbesserung der Materialeffizienz** eingesetzt. Direkte positive Wirkungen entstehen in der ökologischen Dimension vor allem durch das Entfernen von Kunststoffabfällen aus der Umwelt. Dieser positive Effekt lässt sich jedoch mit den vorhandenen Prozessen der verwendeten Software nicht abbilden.

### Analyse der ökonomischen Aspekte

Auf Basis der im CAD-Entwurf abgeleiteten Materialmassen, der gewählten Fertigungsprozesse und der Preise der zugekauften Bauteile können die **Herstellkosten** (vgl. Abbildung 3-11) des vorläufigen Produkts abgeschätzt werden. Dazu wurden marktübliche Preise für die verwendeten Materialien, Maschinen und Prozesse recherchiert und eine **Produktion von 10.000 Kinderlauf-rädern über einen Zeitraum von fünf Jahren** angenommen. Die erste Abschätzung der Herstellkosten erfolgt auf der Grundlage des LCC und ist in Abbildung 6-7 graphisch dargestellt.

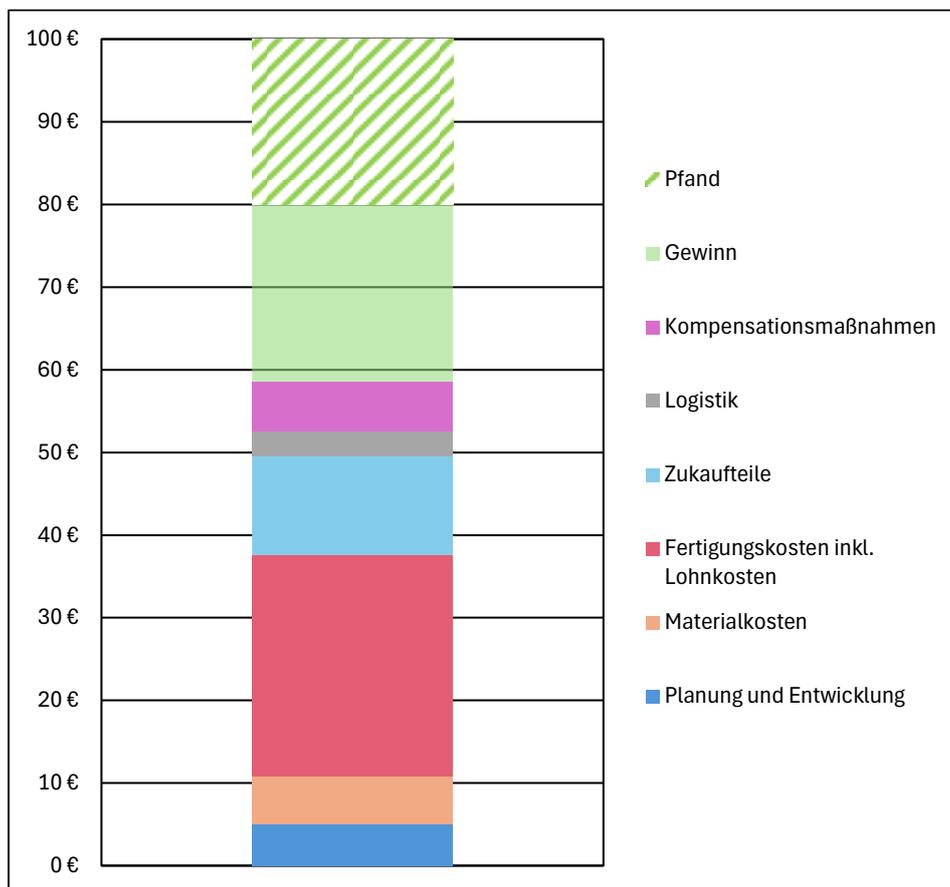


Abbildung 6-7: Kostenverteilung und Gewinnspanne für den vorläufigen Entwurf des Kinderlaufrades

Hierin ist die **Kostenverteilung** zwischen **Planungs- und Entwicklungskosten, Material- und Fertigungskosten** für die unternehmensinterne Produktion, **Kosten für die Zukaufteile** und die **Logistik** dargestellt. Weiterhin sind vorläufig rund 10 % der Herstellkosten zusätzlich für wahrscheinlich notwendige **Kompensationsmaßnahmen** eingepreist, wodurch sich die abgeschätzte

Gesamtsumme für die Produktion eines Kinderlaufrades auf 58,59€ beläuft. Diese liegt unter dem durch Target Costing ermittelten Zielpreis von 80€ und lässt einen **Gewinnüberschuss** von 21,41€ pro direkt verkauften Laufrad zu. Auf den Zielpreis wird ein **Pfand** von 20€ aufgeschlagen, wodurch die Endkunden zur Rücksendung des Kinderlaufrades nach der Nutzung motiviert werden sollen. Um den potenziellen Gewinn zu steigern bzw. den Marktpreis weiter senken zu können, sind Optimierungen durch Materialeffizienz und das Entfernen nicht zwingend benötigter Bauteile für die weitere Entwicklung anzustreben.

### **Analyse der sozialen Aspekte**

Im S-LCA wurden alle identifizierten Stakeholder des vorläufigen Produktsystems untersucht und mögliche positive wie negative soziale Auswirkungen abgeschätzt. Da die **Wertschöpfung** möglichst lokal gestaltet wurde, findet diese komplett **innerhalb Deutschlands** statt. Dadurch werden Standards wie faire Arbeitsbedingungen, gerechte Löhne und soziale Sicherheit für die Arbeitnehmer gewährleistet. Negative soziale Auswirkungen wie Kinderarbeit, Zwangsarbeit oder Diskriminierung sind in Deutschland aufgrund der strengen gesetzlichen Rahmenbedingungen auszuschließen. Eine zusätzliche Sicherheit kann durch die **Zertifizierung aller Zulieferer nach SA8000** (Tabelle 5-7: A2.3) erreicht werden. Die enge **Einbindung lokaler Zulieferer** fördert zudem stabile Beschäftigungsverhältnisse und stärkt die lokale Wirtschaft. Zudem ergeben sich positive Effekte für die Gesellschaft, beispielsweise durch die **Schaffung neuer Arbeitsplätze** und die Förderung transparenter und verantwortungsvoller Lieferketten. Für die Konsumenten wird ein **hohes Maß an Sicherheit** gewährleistet, da das Produkt den in Deutschland geltenden strengen Sicherheitsstandards, wie der DIN EN 71, entspricht. Somit sind in der sozialen Dimension zu diesem Entwicklungszeitpunkt keine Anpassungen notwendig. Wie bereits angesprochen, wären jedoch **zusätzliche Projekte zur Schaffung sozialer Handabdrücke** denkbar, sofern ein ausreichender Gewinnüberschuss erreicht werden kann, um solche Projekte zu finanzieren.

### **Analyse der Kreislauffähigkeit**

Als letzte Analysemethode wurde der **MCI des Kinderlaufrades** mit Hilfe der Vorlage von [Godd24] berechnet. Durch die konsequente Anwendung von Synthesemethoden zur Optimierung der Kreislauffähigkeit konnte bereits in Phase 3 des PIPE-PEP ein **MCI-Wert von 0,93** unter Berücksichtigung der angenommenen Lieferketten im Szenario „Recycling“ erzielt werden. Die hohe Kreislauffähigkeit ergibt sich durch überwiegende Verwendung von Sekundärmaterialien und die hohe Sammelrate am EoL, welche durch das Geschäftsmodell abgesichert werden soll. Durch das **Leasingkonzept und die Einführung des Pfands** für direkt verkaufte Laufräder soll erreicht werden, dass 95 % der Laufräder nach der Nutzungsphase wieder zurückgesendet werden und ganz oder teilweise weiterverwendet werden können. Aufgrund des möglicherweise auftretenden Reifenabriebs wird die Sammelrate der Reifen auf 90 % gesetzt. Ein niedriger MCI-Wert weist vor allem das Schmierfett auf, da es nicht mehr vollständig aus den Wälzlagern entfernt werden kann und im Recyclingprozess nur thermisch verwertet werden kann. Da das Schmierfett für eine lange Lebensdauer und eine niedrige Rollreibung der Lager essenziell ist, kann es nicht

eingespart werden. Weiteres Optimierungspotenzial der Kreislauffähigkeit ist daher nur in der Verbesserung der Sammelrate und der Recyclingeffizienz zu identifizieren. Da beide mit 95 % schon recht hoch angesetzt sind, werden in der weiteren Entwicklung **keine Anpassungen des Kreislaufkonzepts notwendig**.

Tabelle 6-4: Bill of Material mit MCI-Berechnung des vorläufigen Entwurfs nach [Godd24]

Komponente	Gewicht [g]	Anzahl	Material	Ursprung	% regen. Mat.	Sammelrate	Wert-erhaltung	MCI
Rahmen	1.156	1	HDPE	Reman.		95 %	Reman.	0,93
Sattel	444	1	HDPE	Reman.		95 %	Reman.	0,93
Felgen	445	2	HDPE	Reman.		95 %	Reman.	0,93
Lenker	231	1	HDPE	Reman.		95 %	Reman.	0,93
Gabel	393	1	HDPE	Reman.		95 %	Reman.	0,93
Reifen	305	2	Bioplastics	Virgin	95 %	90 %	Reman.	0,93
Gleitlager	6	2	Bioplastics	Virgin	94 %	95 %	Reman.	0,93
Normteile	356	1	Steel	Reman.		95 %	Reuse	0,96
Schmierfett	0,1	4	Biofuels	Virgin	100 %	0 %	Energy Rec.	0,55
							<b>MCI Produkt</b>	<b>0,93</b>

### Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zusammenfassend konnten durch die erste ganzheitliche Analyse und das Durchlaufen des PIOL mehrere Schlussfolgerungen für die weitere Konstruktion abgeleitet werden. Zunächst sollte die **Vermeidung von roten Wirkungen** durch die Beseitigung ihrer Ursachen priorisiert werden, beispielsweise durch den Wechsel auf erneuerbare Energien in der Produktion oder den Einsatz nachhaltiger Transportmittel. Die **Materialeffizienz** kann durch gezielte Leichtbaumaßnahmen, insbesondere an den Strukturbauteilen, deutlich gesteigert werden, was zugleich positive Effekte auf die Herstellkosten hat. Zudem ist eine **Verringerung der Teileanzahl** des Gesamtprodukts, insbesondere bei den Stahlteilen, anzustreben, um Material- und Produktionsressourcen einzusparen. Hierdurch soll auch die Montage des Produkts gegenüber dem vorläufigen Entwurf vereinfacht werden. Die sozialen Aspekte des Produktsystems sollen durch eine **präzisere Definition der Lieferketten** abgesichert werden. Außerdem müssen die notwendigen Kompensationsmaßnahmen kalkuliert und die Möglichkeit zur Umsetzung sozialer Projekte überprüft werden. Die Ergebnisse dieser Optimierungen und Anpassungen werden im folgenden Kapitel beschrieben.

#### 6.2.4 Phase 4: PI-Kinderlaufrad

In der letzten Phase des PIPE-PEP wird das Produktsystem abschließend detailliert ausgearbeitet, wobei die in Phase 3 identifizierten verbleibenden Optimierungspotenziale weitestgehend realisiert werden. Ziel ist die **vollständige Definition eines PIPS**, wie es in Kapitel 5.3 beschrieben wird. Da der Lösungsraum in dieser späten Phase des PEP zunehmend eingeschränkt wird und

die Synthesemethoden primär zur Optimierung dienen, liegt der methodische **Schwerpunkt auf der Analyse** des Produktsystems. Als wichtigste Ergebnisse dieser Phase und des gesamten PIPE-PEP wird zunächst die finale Konstruktion des Kinderlaufrades beschrieben, mit Fokus auf den Änderungen gegenüber dem vorläufigen Entwurf. Anschließend wird auf die Anpassungen des restlichen Produktsystems eingegangen und die Ergebnisse der ganzheitlichen Nachhaltigkeitsanalyse vorgestellt. Es folgen die Wirkungsbeurteilung und die Beschreibung der Kompensationsbilanz, wodurch das PIPS komplettiert wird.

#### **Finales Produktsystem in Phase 4**

Der finale CAD-Entwurf des PI-Kinderlaufrades ist in Abbildung 6-8 gezeigt. Wie im Vergleich zum vorläufigen Entwurf (Abbildung 6-5) zu erkennen ist, wurden mehrere Maßnahmen zur Erhöhung der Materialeffizienz umgesetzt.



**Abbildung 6-8: Finaler CAD-Entwurf und Explosionszeichnung des PI-Kinderlaufrades**

Hierdurch sollen die mit der Ressourcennutzung verbundenen Umweltauswirkungen und das Gesamtgewicht des Laufrades zur Verbesserung der Funktionalität reduziert werden. Dabei wurden alle Bauteile bis auf die Felgen durch Leichtbaumaßnahmen konstruktiv optimiert. Das **Gesamtgewicht** des dargestellten Kinderlaufrades liegt bei **3,68kg** und ist 413g unter dem des vorläufigen Entwurfs. Im Rahmen dieser Optimierungen wurde auch die Teilevielfalt verringert und **Bauteile aus Stahl durch HDPE substituiert**. Insbesondere bei der Konstruktion der Achsen konnten mehrere Stahlteile eingespart oder geringer dimensioniert werden und gleichzeitig eine einfachere Montage ermöglicht werden. Die Distanzhülsen, die vorher aus Stahl gefertigt wurden, sind durch HDPE-Bauteile ersetzt worden. Außerdem wurde der **Neigungswinkel des Sattel** vergrößert, um das Laufrad besser an das körperliche Wachstum der nutzenden Kinder anzupassen. Zusätzlich wurden die Schrauben vereinheitlicht, wodurch sich das Kinderlaufrad mit nur einem **einzigem Inbus-Werkzeug vollständig montieren, einstellen und demontieren** lässt. Um eine

einfache Anpassung der Sitzhöhe oder eine Demontage zum platzsparenden Transport stets zu ermöglichen, ist dieses Werkzeug am Rahmen in der Nähe des Hinterrads untergebracht und somit immer verfügbar.

Die konstruktiven Änderungen haben nur geringfügige Anpassungen in den Lieferketten zur Folge, da die **gleichen Zulieferer** benötigt werden, auch wenn sich die zugelieferten Teile oder Mengen geändert haben. Ebenso bleiben die **Lebenszyklusphasen** und die beschriebenen **Subsysteme gleich zur Darstellung des vorläufigen Produktsystems von Phase 3** in Abbildung 6-6. Das Geschäftsmodell wurde auf der Grundlage der ersten Konzeption kontinuierlich mit dem TLBMC weiterentwickelt. Die finale Version des TLBMC ist im Anhang A.2 dargestellt. Als wesentliche Bestandteile werden an dieser Stelle die Einnahmequellen stellvertretend für die Beschreibung des gesamten Geschäftsmodells vorgestellt. Hierbei bestehen mit dem Direktverkauf, dem Leasingmodell, dem Ersatzteilhandel und dem potenziellen Verkauf von Rezyklaten, die nicht mehr für die Produktion neuer Bauteile benötigt werden, insgesamt **vier verschiedene Einnahmequellen**. Der durch Target Costing ermittelte **Zielpreis von 80€** soll auch den späteren Marktpreis für den Direktverkauf bilden, wobei das zuzügliche **Pfand von 20€** ebenfalls berücksichtigt werden muss. Alternativ besteht die Möglichkeit, das Kinderlaufrad **monatsweise für ca. 6€/Monat oder jahresweise für ca. 60€/Jahr** zu leasen. Die möglichen Einnahmen durch Ersatzteile und den Verkauf von Rezyklaten sind abhängig vom jeweiligen Bedarf und vorab schwer zu quantifizieren.

### ***Ganzheitliche Nachhaltigkeitsanalyse mit Wirkungsbeurteilung***

Für die vollständige Beschreibung des PIPS, wie es in Abbildung 5-4 gefordert ist, müssen in dieser Phase des PIPE-PEP die abschließende Nachhaltigkeitsanalyse, die Wirkungsbeurteilung und die daraus abgeleitete Kompensationsbilanz umgesetzt werden. Im Rahmen der ganzheitlichen Nachhaltigkeitsanalyse wurde aufbauend auf den Analysen in Phase 3 ein übergreifendes **C-LCSA** für die beschriebene finale Definition des Produktsystems durchgeführt. Darin wurden auch die konstruktiven Änderungen und Optimierungen berücksichtigt und ein einheitlicher Untersuchungsrahmen verwendet. Die **Ergebnisse der Einzelmethoden LCA, LCC, S-LCA und MCI** werden im Folgenden erläutert und zugleich einer Wirkungsbeurteilung unterzogen.

### ***Analyse der ökologischen Aspekte***

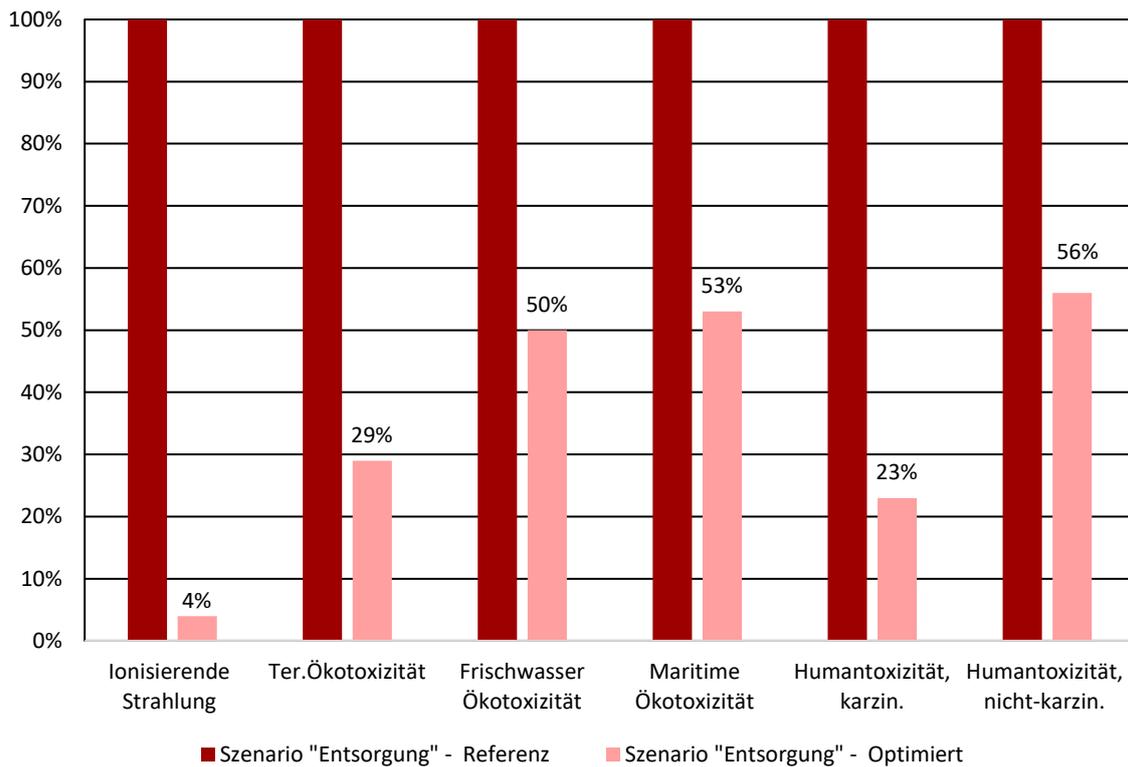
Die in Kapitel 6.2.3 vorgestellte Ökobilanz wurde in der vierten Phase überarbeitet und auf die finale Definition des Produktsystems angepasst. Im Anhang A.3 ist die Modellierung in SimaPro des Produktsystems in Phase 4 für das Szenario „Entsorgung“ dargestellt. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung mittels ReCiPe2016 sind für beide EoL-Szenarien in Tabelle 6-5 dargestellt. Die Wirkungskategorien sind dabei in kompensierbare (gelb) und nicht kompensierbare Wirkungen (rot) anhand der Wirkungsbeurteilung nach Tabelle 5-4 eingeteilt. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Ökobilanzierung des vorläufigen Entwurfs (Tabelle 6-3) konnten **alle Umweltauswirkungen im Mittel um rund 12 % gesenkt** werden. Dies lässt sich in erster Linie auf die erhöhte Materialeffizienz im finalen Entwurf zurückführen. Somit konnten die **kompensierbaren negativen**

**Auswirkungen** (gelb) gemäß der Vermeidungshierarchie (Abbildung 5-6) erfolgreich weiter reduziert werden. Für diese Wirkungen können folglich die benötigten Kompensationsmaßnahmen kalkuliert werden. Die Kompensationsbilanz wird am Ende des Kapitel gesondert beschrieben (siehe Tabelle 6-8).

Tabelle 6-5: Wirkungsabschätzungen der Ökobilanzen für beide Szenarien in Phase 4

Wirkungskategorien nach ReCiPe2016	Einheit	Szenario Entsorgung	Szenario Recycling
Klimaänderung	kg CO <sub>2</sub> eq	20,6	2,96
Ozonabbau in der Stratosphäre	kg CFC11 eq	5,86E-06	9,88E-07
Ozonbildung, Menschliche Gesundheit	kg NO <sub>x</sub> eq	1,99E-02	3,30E-03
Bildung von Feinstaub	kg PM2.5 eq	1,06E-02	1,63E-03
Ozonbildung, Terrestrische Ökosysteme	kg NO <sub>x</sub> eq	2,18E-02	3,69E-03
Terrestrische Versauerung	kg SO <sub>2</sub> eq	2,59E-02	3,80E-03
Frischwasser Eutrophierung	kg P eq	5,83E-03	6,61E-04
Marine Eutrophierung	kg N eq	9,36E-04	1,09E-04
Landnutzung	m <sup>2</sup> a crop eq	0,877	0,122
Mineralische Ressourcenverknappung	kg Cu eq	5,04E-02	7,75E-03
Fossile Ressourcenverknappung	kg oil eq	3,56	0,648
Wassernutzung	m <sup>3</sup>	0,141	0,016
Ionisierende Strahlung	kBq Co-60 eq	2,13	0,228
Terrestrische Ökotoxizität	kg 1,4-DCB	185	38,8
Frischwasser Ökotoxizität	kg 1,4-DCB	1,05	0,131
Marine Ökotoxizität	kg 1,4-DCB	1,61	0,214
Humantoxizität, karzinogene Effekte	kg 1,4-DCB	3,19	0,513
Humantoxizität, nicht-karzinogene Effekte	kg 1,4-DCB	18,3	2,58

Die **rot kategorisierten Wirkungen** konnten durch die konstruktiven Anpassungen zwar ebenfalls deutlich reduziert werden, doch nicht, wie Abbildung 5-6 gefordert, gänzlich vermieden werden. Da diese Wirkungen irreversiblen Schäden verursachen können und folglich keine effektiven Kompensationsmaßnahmen existieren, steht diese Bewertung im **Widerspruch zum PIPE-Ansatz**. Um die Ursachen dieser Wirkungen besser zu verstehen, wurde das modellierte Produktsystem bereits in Phase 3 näher untersucht und die verursachenden Elemente in allen roten Wirkungskategorien identifiziert. In jeder Kategorie wurden dazu die **drei Prozesse mit dem größten Beitrag zur jeweiligen negativen Umweltauswirkung** im Szenario „Entsorgung“ festgestellt und auf ihre **Substituierbarkeit mit nachhaltigen Prozessen** untersucht.



**Abbildung 6-9: Vermeidungspotenzial roter Wirkungen durch die Vermeidung der drei größten Prozessbeiträge**

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen hier beispielhaft anhand der **Wirkungskategorien „Ionisierende Strahlung“** und **„Terrestrische Ökotoxizität“** beschrieben werden. Wie bereits in Kapitel 6.2.3 im Rahmen der Ökobilanz des vorläufigen Produktsystems beschrieben, werden größtenteils generische Materialien und Prozesse genutzt, die zum Teil regionale und zum Teil globale Durchschnittswerte verwenden. Die hohen Werte im Bereich der Ökotoxizität überwiegend durch Prozesse in den Vorketten, wie beispielsweise der **Koksproduktion für die Stahlherstellung**, zu Stande. Diese wird in den generischen Prozessen anteilig den Produktionen der Spritzgussmaschine, des Transport-LKW und der Stahlteile zugerechnet. Eine weitere Hauptursache für die große Menge an 1,4-Dichlorbenzoläquivalenten (DCB) konnte im generisch modellierten **Abrieb der Bremsen** des Transport-LKW identifiziert werden. In der realen Umsetzung des präsentierten Produktsystems können die Prozesse durchaus von solchen generischen Prozessen abweichen. Die in der Ökobilanz aufgedeckten Ursachen für hohe Toxizitäten bieten somit die Möglichkeit **im realen Produktsystem nachhaltigere Prozesse und Lieferketten auszuwählen**. So besteht die Möglichkeit, **Koks durch die Verwendung von Wasserstoff** in der Stahlproduktion als Reduktionsmittel zu ersetzen [LZWX21] oder den Bremsenabrieb durch **beschichtete Bremscheiben oder neuartige Bremsbeläge** erheblich zu verringern [HHAW21]. In der Wirkungskategorie „Ionisierende Strahlung“ lassen sich die drei Hauptursachen auf die notwendigen Prozessketten des genutzten Strommixes zurückführen, insbesondere auf die **anteilige Stromerzeugung durch Kernenergie**. Dabei entsteht radioaktive Strahlung durch den **Abraum aus dem Uranabbau, abgebrannte Brennelemente und das Uranerz selbst**. Würde im gesamten Produktsystem auf die Verwendung von Kernenergie verzichtet und diese **durch erneuerbare Energie**

**substituiert** werden, könnten diese Wirkungen nahezu vollständig vermieden werden. Um das Vermeidungspotenzial der drei bedeutendsten Ursachen in jeder rot markierten Wirkungskategorie zu veranschaulichen, werden in Abbildung 6-9 die ursprünglich im Szenario „Entsorgung“ berechneten Wirkungen als Referenz mit den verbleibenden Wirkungen eines optimierten Szenarios verglichen. Im Bereich der ionisierenden Strahlung kann durch die Vermeidung der drei genannten Materialien beispielsweise eine Reduktion auf 4 % der Wirkungen im Referenzszenario erreicht werden. Obwohl die verbleibenden prozentualen Wirkungen in den anderen Wirkungskategorien höher ausfallen, zeigt sich deutlich, dass der **Verzicht auf wenige Prozesse ein erhebliches Vermeidungspotenzial** birgt.

Durch diese und weitere technologische Entwicklungen könnten in Zukunft Produktsysteme entstehen, die die negativen Auswirkungen in der roten Kategorie gänzlich vermeiden. Um **Problemverschiebungen zu vermeiden**, müssen die Alternativtechnologien ganzheitlich analysiert und die entstehenden Wirkungen wiederum beurteilt werden. Da diese potenziell nachhaltigeren Technologien noch nicht in der verwendeten Datenbank hinterlegt sind und keine verlässlichen Daten für die zu substituierenden Prozesse und Materialien recherchiert werden konnten, wurde auf eine Änderung der generischen Prozesse in der Ökobilanz verzichtet. Dadurch soll auch die Konsistenz der präsentierten Ergebnisse gewahrt werden. Bezüglich der ökologischen Auswirkungen lässt sich also abschließend festhalten, dass im Rahmen der Fallstudie zwar **nicht alle nicht kompensierbaren Wirkungen vermieden** werden konnten, jedoch durch die verbleibenden Wirkungen **wertvolle Hinweise auf notwendige technologische Optimierungen** in der Zukunft gewonnen werden können.

### **Analyse der ökonomischen Aspekte**

Die Berechnung der Lebenszykluskosten des finalen Entwurfs mittels LCC musste auf die konstruktiven Änderungen hin angepasst werden. Durch die Maßnahmen zur Verbesserung der Materialeffizienz konnte der Großteil der Komponenten gewichtsoptimiert werden. Die **niedrigeren Materialmengen senken auch die Herstellkosten**, wie im **Kostenvergleich** gegenüber dem vorläufigen Entwurf in Abbildung 6-10 deutlich wird. Ebenso wirkt sich die Reduzierung der Anzahl an zugekauften Teilen positiv auf die Herstellkosten und damit den erzielten Gewinn im Direktverkauf aus. Während Planungs-, Entwicklungs- und Logistikkosten für beide Entwicklungsstände gleich angenommen werden, können nun auch die weiter unten beschriebenen Kompensationsmaßnahmen zum Teil genauer eingepreist werden. Durch die Änderungen konnte der Gewinn von 21,46€ auf 26,54€ gesteigert werden. Hierdurch wird die Unterstützung eines zusätzlichen sozialen Projekts ermöglicht, welches in dieser Arbeit jedoch nicht näher spezifiziert wird. Pro verkauftem oder geleastem Laufrad werden vom Unternehmen **5€ in ein gemeinnütziges Projekt mit Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung** gespendet, wodurch sich der Gewinn auf 21,54€ reduziert. Durch das umfassende Kreislaufkonzept kann sich die Gewinnspanne wiederum erhöhen, wenn zurückgegebene Kinderlaufräder in aufbereiteter Form wieder verkauft werden oder

zumindest Teile oder Materialien wiederverwendet und dadurch die Herstellkosten gesenkt werden.

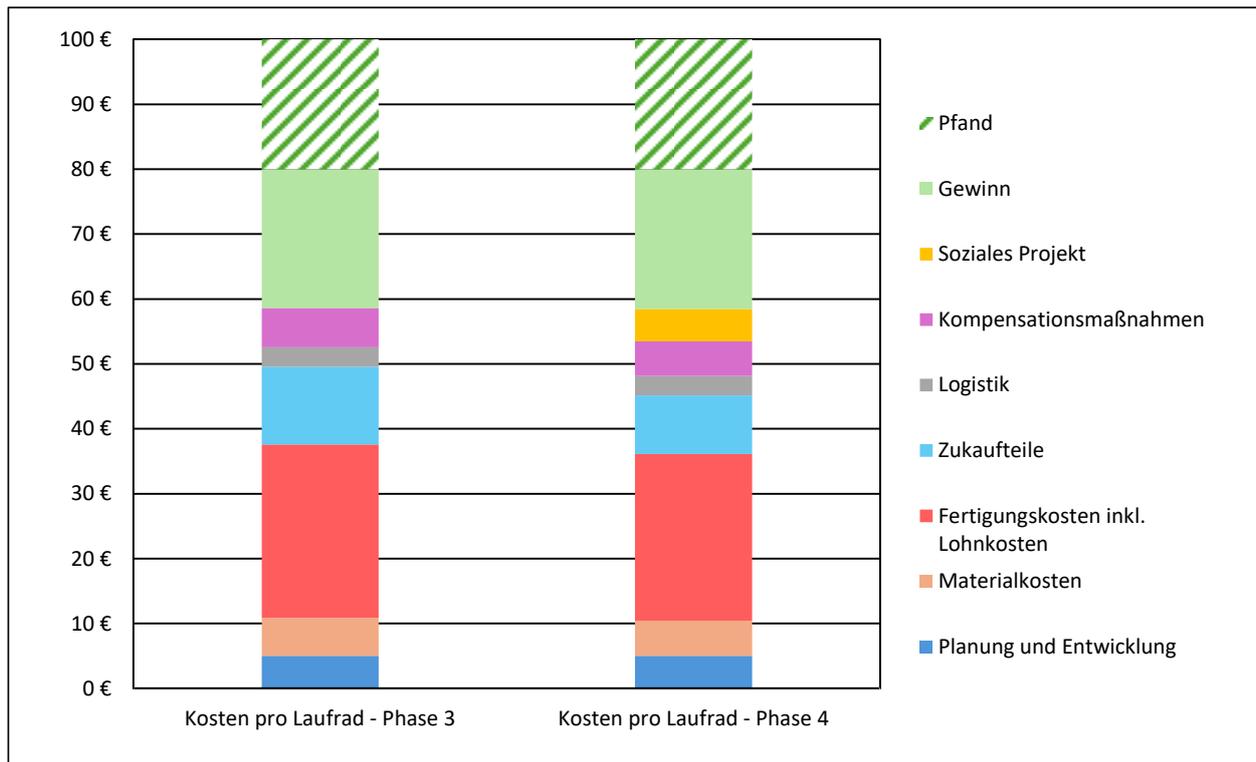


Abbildung 6-10: Kostenverteilung und Gewinnspanne für den vorläufigen und finalen Entwurf

### Analyse der sozialen Aspekte

Die genaue Analyse der sozialen Aspekte aller identifizierten Stakeholder gestaltet sich bei einer solchen theoretischen Fallstudie schwierig, da keine realen Aspekte untersucht werden können. In Tabelle 6-6 sind die im Produktsystem identifizierten Stakeholder aufgeführt und lokalisiert. Wie bereits in Kapitel 6.2.3 beschrieben, findet die Wertschöpfung überwiegend in der BRD statt, wodurch keine wesentlichen negativen sozialen Auswirkungen, wie sie in Tabelle 5-5 aufgeführt wurden, zu erwarten sind. Hingegen kann die **Schaffung oder Sicherung von Arbeitsplätzen** durch die notwendigen Wertschöpfungsketten des Kinderlaufrades als positiver sozialer Aspekt genannt und grün in Tabelle 6-6 markiert werden. Die Arbeitsplätze sollen bei den Zulieferern durch **langfristige Lieferantenverhältnisse** zusätzlich gesichert werden. Gesondert muss hier jedoch der Zulieferer des HDPE betrachtet werden, bei dem auch die genannten positiven Effekte auftreten können. Hier könnten aber auch durch fehlende Gesetze **potenziell negative Auswirkungen** auftreten, die in Tabelle 6-6 rot hervorgehoben sind. Da die Kunststoffabfälle theoretisch global gesammelt werden können, ist ein besonderes Augenmerk auf die jeweiligen **lokalen Arbeitsbedingungen und die Einbindung der lokalen Gemeinschaft** in solche Sammelprojekte zu legen. Da die Zulieferer bereits durch die Reduktion von Kunststoffabfällen in der Umwelt einen positiven Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leisten, kann davon ausgegangen werden, dass auch die Einhaltung von Standards, wie den ILO-Kernarbeitsnormen, gewährleistet sein wird.

Tabelle 6-6: Analyse der sozialen Auswirkungen anhand der identifizierten Stakeholder

Nr.	Beschreibung	Ort	Potenzielle positive und negative soziale Aspekte
1.1	Zulieferer des Recyclingstahl	BRD	Schaffung/Sicherung von Arbeitsplätzen Langfristiges Lieferantenverhältnis
1.2	Zulieferer der biobasischen Vorprodukte	BRD	
1.3	Zulieferer des HDPE aus gesammelten Kunststoffabfällen	Global	Schaffung/Sicherung von Arbeitsplätzen Langfristiges Lieferantenverhältnis Saubere Umwelt für lokale Gemeinschaft
			Lokale Arbeitsbedingungen (Faires Gehalt, Arbeitszeiten, Vereinigungsfreiheit, ...) Einbindung der lokalen Gemeinschaft
1.4	Zulieferer der Normteile	BRD	Schaffung/Sicherung von Arbeitsplätzen Langfristiges Lieferantenverhältnis
1.5	Zulieferer der Gleitlager	BRD	
1.6	Zulieferer des Schmierfett	BRD	
2	Mitarbeiter des Unternehmens	BRD	Schaffung von Arbeitsplätzen Langfristige Beschäftigungsverhältnisse Partizipation an Entscheidungen Gewinnbeteiligung
3	Entfällt, da Materialaufbereitung durch 1.1, 1.5 & 2	-	-
4.1	Endkunden Direktverkauf	BRD	Gesundes und nachhaltiges Produkt Förderung der Gesundheit durch Laufradnutzung Bereitstellung transparenter Informationen und einfacher Feedbackmöglichkeiten
4.2	Endkunden Leasingmodell		
5	Kooperationspartner für Kompensationsmaßnahmen	Global	Schaffung/Sicherung von Arbeitsplätzen
			Einbindung der lokalen Gemeinschaft in Kompensationsprojekte
6	Begünstigte durch soziale Projekte	Global	Positive soziale Aspekte durch Projekt (nicht näher spezifiziert)
7	Logistikunternehmen	BRD	Schaffung/Sicherung von Arbeitsplätzen Langfristiges Vertragsverhältnis

Die Mitarbeiter des Unternehmens, welches die Kinderlaufräder produziert und vertreibt, profitieren durch sichere **Arbeitsplätze mit langfristigen Beschäftigungsverhältnissen**. Sie werden außerdem in Entscheidungsprozesse miteingebunden und am erwirtschafteten Gewinn des Unternehmens beteiligt. Die verschiedenen Endkunden erhalten ein nachhaltiges Produkt, das durch die Bewegung auch die Gesundheit der Kinder fördert. Außerdem stehen **transparente Informationen über verwendete Materialien, Lieferketten, Produktion, Reparaturanleitungen, Ersatzteile und die Nachhaltigkeitsanalyse** des Laufrades zur Verfügung. Das Unternehmen bietet den Kunden zusätzlich einfache Möglichkeiten für Kundenfeedback und zur Unterstützung bei offenen Fragen. Die erforderlichen Kompensationsprojekte für unvermeidbare negative Umweltauswirkungen können theoretisch global realisiert werden und schaffen dadurch wiederum

Arbeitsplätze. Es wird zwar eine Umsetzung bevorzugt, die geografisch nahe an den zu kompensierenden Auswirkungen angesiedelt ist, jedoch müssen stets die lokalen Gemeinschaften in solche Projekte eingebunden werden. Als letzter positiver Effekt des entwickelten PIPS kann das nicht näher definierte **soziale Projekt** genannt werden, durch das die beteiligten Stakeholder in einem oder mehreren Aspekten positiv beeinflusst werden.

### Analyse der Kreislauffähigkeit

Die letzte Analyse im Rahmen des C-LCSA befasst sich mit der Kreislauffähigkeit des entwickelten Kinderlaufrades und wurde wiederum mit dem **MCI** umgesetzt. Hierbei wurde die Analyse des vorläufigen Entwurfs aktualisiert und durch die genaue Auflistung der Normteile präzisiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-7 gezeigt.

Tabelle 6-7: Bill of Material mit MCI-Berechnung des finalen Entwurfs nach [Godd24]

Komponente	Gewicht [g]	Anzahl	Material	Ursprung	% regen. Mat.	Sammelrate	Wert-erhaltung	MCI
Rahmen	1.048	1	HDPE	Reman		95 %	Reman	0,93
Sattel	456	1	HDPE	Reman		95 %	Reman	0,93
Felgen	445	2	HDPE	Reman		95 %	Reman	0,93
Lenker	207	1	HDPE	Reman		95 %	Reman	0,93
Gabel	284	1	HDPE	Reman		95 %	Reman	0,93
Distanzhülsen	3	4	HDPE	Reman		95 %	Reman	0,93
Reifen	283	2	Bioplastics	Virgin	95 %	90 %	Reman	0,93
Gleitlager	6	2	Bioplastics	Virgin	94 %	95 %	Reman	0,93
Wälzlager 6001	21	4	Steel	Reman		95 %	Reuse	0,96
Unterlegscheibe (125)	1	2	Steel	Reman		95 %	Reuse	0,96
Unterlegscheibe (9021)	3	2	Steel	Reman		95 %	Reuse	0,96
Mutter (986)	5	4	Steel	Reman		95 %	Reuse	0,96
Schraube M6x45	13	2	Steel	Reman		95 %	Reuse	0,96
Schraube M6x95	24	2	Steel	Reman		95 %	Reuse	0,96
Inbusschlüssel 5mm	18	1	Steel	Reman		95 %	Reuse	0,96
Schmierfett	0,1	4	Biofuels	Virgin	100 %	0 %	Energy Recovery	0,55
							<b>MCI Produkt</b>	<b>0,93</b>

Der MCI-Wert des Gesamtprodukts beträgt, wie im vorläufigen Entwurf, **0,93** und hat sich durch die konstruktiven Anpassungen auf Produktebene nicht verändert. Die angenommenen Werte sind für idealisierte Bedingungen aufgestellt worden und sollten im realen Geschäftsbetrieb überprüft werden. Es ist außerdem zu erwähnen, dass ungewünschte Materialverluste entstehen, die sich konstruktiv nicht weiter vermeiden lassen, etwa durch unkontrollierten Abrieb oder durch nicht mehr genutzte Produkte, die nicht ans Unternehmen zurückgesendet und auf anderem Wege entsorgt werden könnten. Diese Verluste wurden in der ökologischen Analyse im Rahmen des Szenario „Entsorgung“ berücksichtigt und müssen durch entsprechende Kompensationsmaßnahmen adressiert werden.

### **Kompensationsbilanz**

Nach Abschluss der Nachhaltigkeitsanalyse und der Bewertung der ermittelten Wirkungen wird die Kompensationsbilanz erstellt. In Tabelle 6-8 sind **alle erforderlichen Maßnahmen und Projekte** zusammengefasst, die für die Erreichung einer netto-positiven Nachhaltigkeitsbilanz in den kompensierbaren Wirkungskategorien notwendig sind. Die Tabelle zeigt außerdem eine **Kostenschätzung für die notwendigen Kompensationen**.

Die Kostenabschätzung erfolgt dabei in der Wirkungskategorie **Klimaänderung mit marktüblichen Preisen** für Kompensationsprojekte. In den restlichen Wirkungskategorien bestehen zwar Ansätze zur Kompensation, jedoch noch keine kommerziellen Kompensationsprojekte. Aufgrund dieser fehlenden Marktpreise werden die Kosten, vergleichbar zum CEC-Ansatz [MBFH23a, MBFH23b], mit **Umweltkosten** nach [SSML18] abgeschätzt (siehe Kapitel 3.4.2). Da für die Wirkungskategorien im Bereich der Ressourcenverbräuche keine Umweltkosten existieren, werden **marktübliche Preise für Rohöl, Kupfer und Wasser** genutzt. Dieses Vorgehen soll einen möglichen Ansatzpunkt bieten, um abzuschätzen, wie viel in die jeweiligen Kompensationsprojekte investiert werden sollte. Die tatsächlichen positiven Wirkungen und Projektkosten müssen für alle zukünftigen Kompensationsprojekte jeweils präzise berechnet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die **tatsächlichen Kosten von den hier angenommenen Umweltkosten bzw. Marktpreisen abweichen** können. Die geschätzten Kosten werden **pro Laufrad und für die Gesamtproduktion von 10.000 Kinderlaufrädern** berechnet.

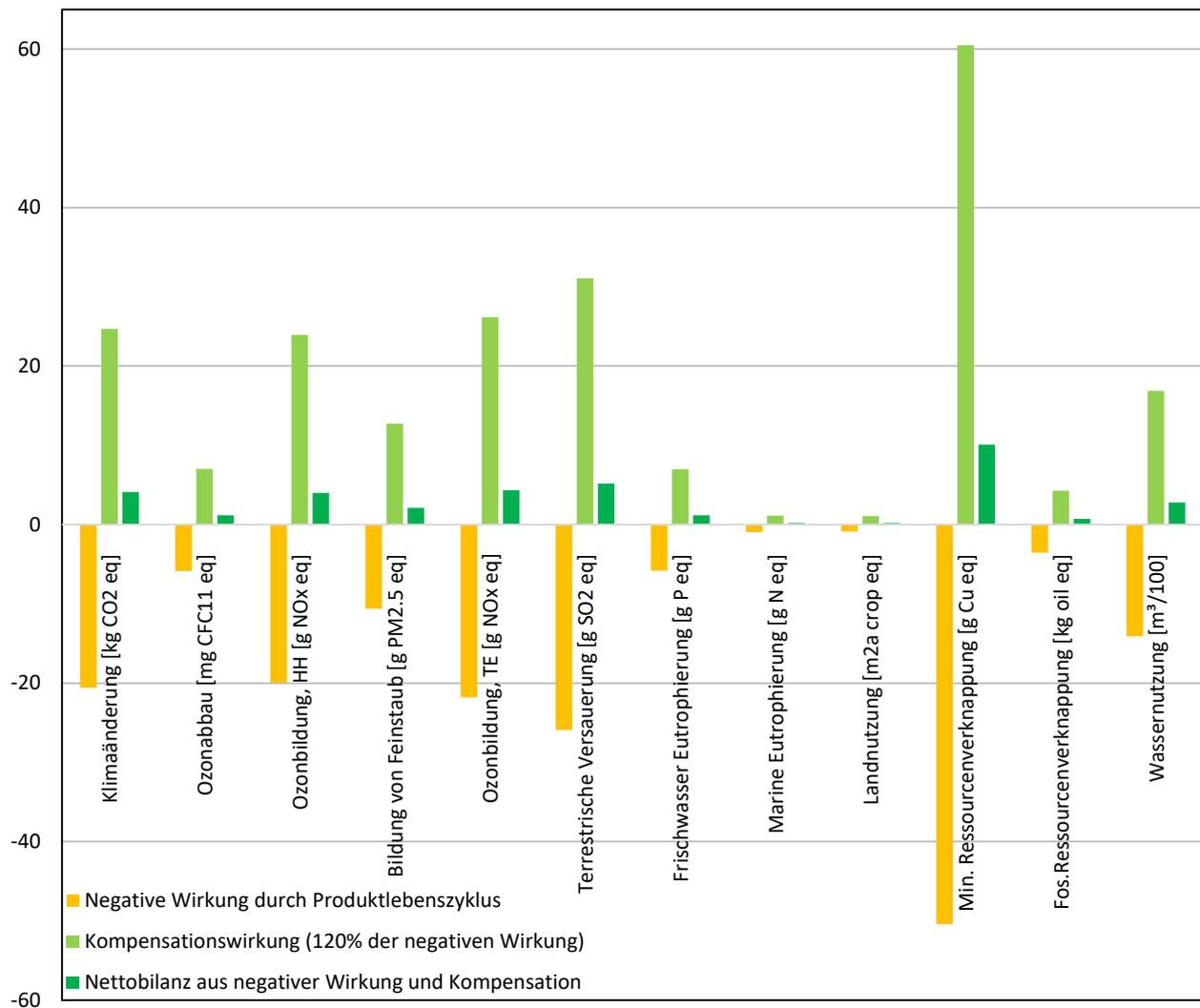
Um die kalkulierten negativen Wirkungen nicht nur auszugleichen, sondern netto-positiv bilanzieren zu können, werden **pauschal 20 % der Wirkungen zusätzlich kompensiert**. Außerdem werden für die Kompensationsbilanz die wesentlich höheren Wirkungen des Szenario „Entsorgung“ verwendet. Auch wenn ein Kreislaufkonzept besteht, soll dadurch der ungünstigste Fall der Behandlung des Kinderlaufrades am EoL abgedeckt werden.

Tabelle 6-8: Kompensationsmaßnahmen und Abschätzung der Kompensationskosten für das PI-Kinderlaufrad

Wirkungskategorien nach ReCiPe2016	Einheit	Negative Wirkung pro Laufrad, Szenario Entsorgung	Beispielhafte Kompensationsmaßnahmen	Kompensationskosten/ Umweltkosten/ Marktpreis in €/Einheit	Geschätzte Kosten für 120 % Kompensation pro Laufrad	Geschätzte Kosten für 120 % Kompensation für 10.000 Laufräder
Klimaänderung	kg CO <sub>2</sub> eq	20,6	Schutz und Wiederherstellung von Mooren	0,025	0,62 €	6.175,56 €
Ozonabbau in der Stratosphäre	kg CFC11 eq	5,86E-06	Ersetzen ineffizienter Kühlgeräte	123,00	0,00 €	8,65 €
Ozonbildung, Menschliche Gesundheit	kg NO <sub>x</sub> eq	1,99E-02	Vermeidung der Vorläufersubstanzen an anderen Quellen	2,10	0,05 €	502,68 €
Bildung von Feinstaub	kg PM2.5 eq	1,06E-02	Verhinderung von Müllverbrennung	69,00	0,88 €	8.795,34 €
Ozonbildung, Terrestrische Ökosysteme	kg NO <sub>x</sub> eq	2,18E-02	Vermeidung der Vorläufersubstanzen an anderen Quellen	2,10	0,05 €	549,35 €
Terrestrische Versauerung	kg SO <sub>2</sub> eq	2,59E-02	Kalkung von Böden	8,12	0,25 €	2.523,53 €
Frischwasser Eutrophierung	kg P eq	5,83E-03	Vermeidung der Nährstoffeinträge in die Ökosysteme durch veränderte Landwirtschaft	1,90	0,01 €	132,90 €
Marine Eutrophierung	kg N eq	9,36E-04	Anlegen von Muschelfarmen zur Nährstoffbindung	3,11	0,00 €	34,95 €
Landnutzung	m <sup>2</sup> a crop eq	0,877	Renaturierung, Begrünung, Entsiegelung von Flächen	0,037	0,04 €	389,27 €
Mineralische Ressourcenverknappung	kg Cu eq	5,04E-02	Substitution mineralischer durch erneuerbare Ressourcen an anderer Stelle	7,50	0,45 €	4.537,66 €
Fossile Ressourcenverknappung	kg oil eq	3,56	Substitution fossiler durch erneuerbare Ressourcen an anderer Stelle	0,60	2,56 €	25.641,58 €
Wassernutzung	m <sup>3</sup>	0,141	Trinkwasserprojekte	2,31	0,39 €	3.902,59 €
				<b>Summe:</b>	<b>5,32 €</b>	<b>53.194,06 €</b>

Die **geschätzten Kompensationskosten belaufen sich pro Laufrad auf etwa 5,32 €** und liegen somit unter den zuvor angenommenen 10 % der Herstellkosten. Daher wird die finanzielle Umsetzbarkeit der Kompensationsmaßnahmen als realistisch eingeschätzt.

Um die netto-positive Kompensationsbilanz zusätzlich zu visualisieren, sind in Abbildung 6-11 alle Einzelbilanzen in den kompensierbaren Wirkungskategorien dargestellt. Darin sind jeweils die **negative Wirkung durch den Produktlebenszyklus** des PI-Kinderlaufrades, die gewünschte **positive Wirkung durch Kompensationsprojekte** und die **Nettobilanz aus beiden Wirkungen** visualisiert. Die Einheiten der einzelnen Wirkungskategorien sind zu Gunsten einer besseren Skalierung angepasst. Durch die **Überkompensation von 20 %** können in allen gelb kategorisierten Wirkungskategorien netto-positive Bilanzen erzeugt werden.



**Abbildung 6-11: Kompensationsbilanz der kompensierbaren negativen Wirkungen für den Lebenszyklus eines PI-Kinderlaufrades im Szenario „Entsorgung“**

Um eine ganzheitlich netto-positive Wirkungsbilanz erreichen zu können, müssten neben den Kompensationsmaßnahmen zusätzlich die in Tabelle 6-5 rot kategorisierten Wirkungen gänzlich vermieden werden. Dieses Ziel konnte im Rahmen der Fallstudie nicht vollständig realisiert werden. Dennoch wurde anhand ausgewählter Beispiele veranschaulicht, dass technologische Fortschritte in der Zukunft Potenziale eröffnen könnten, um die Entstehung derartiger Wirkungen zu verhindern.

**PIPS des PI-Kinderlaufrades**

In Abbildung 6-12 ist das vollständige PIPS visualisiert, welches in Kombination mit dem technischen Entwurf das zentrale Ergebnis des PIPE-PEP der Fallstudie zum PI-Kinderlaufrad darstellt. Damit sind die in Tabelle 4-4 aufgeführten Anforderungen an das Produktsystem, abgesehen von den verbleibenden rot kategorisierten Umweltauswirkungen, erfüllt: Es ist **ganzheitlich durch den PEP definiert**, weist **netto-positive Nachhaltigkeitswirkungen** in den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit auf und ist durch diese Netto-Positivität so gestaltet, dass die **Nachhaltigkeit des Systems für Endkunden leicht nachvollziehbar** bleibt.

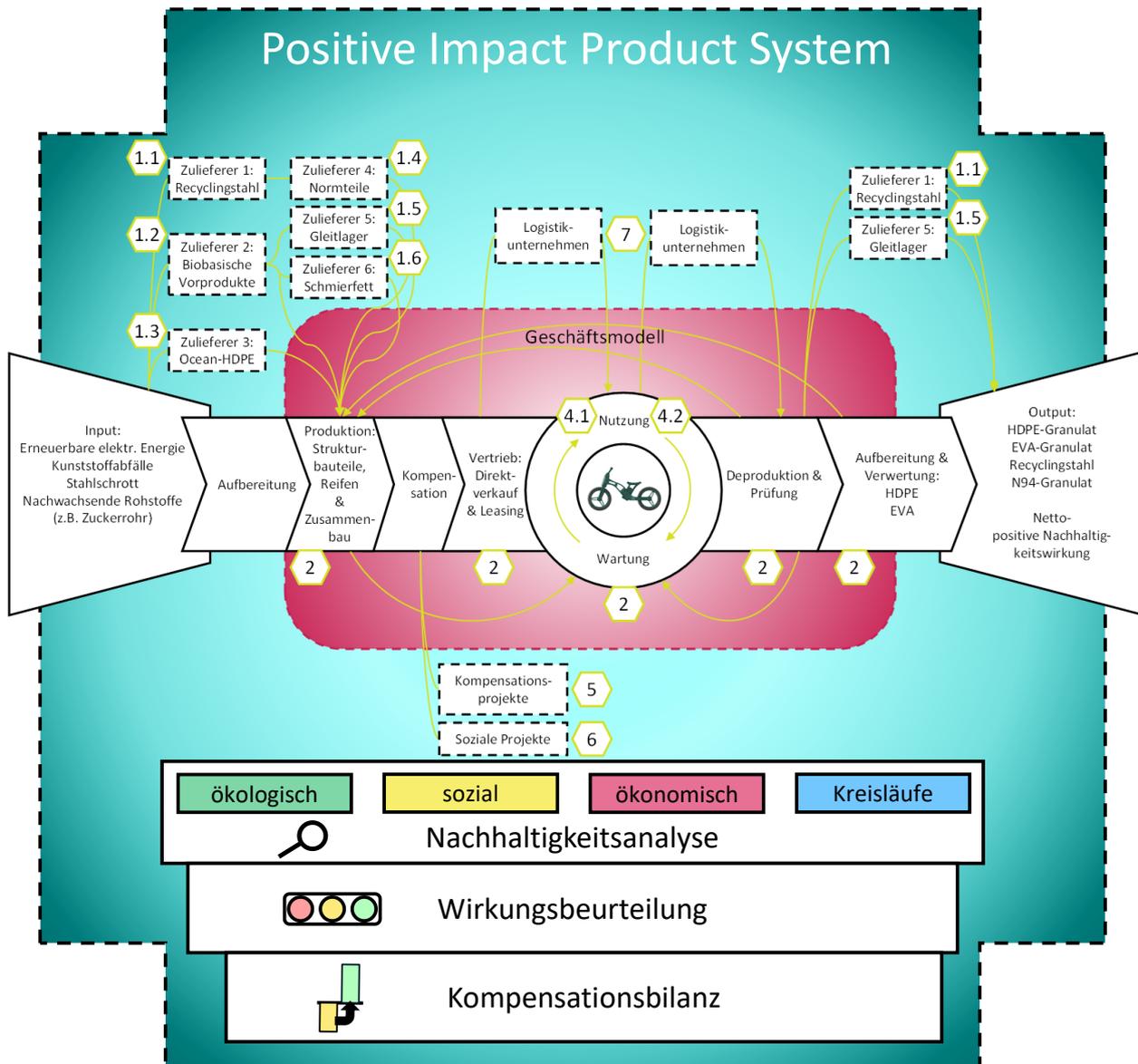


Abbildung 6-12: Finales PIPS des PI-Kinderlaufrad

### 6.2.5 Fazit der Fallstudie PI-Kinderlaufrad

Durch die Fallstudie am Produktbeispiel PI-Kinderlaufrad konnte die Anwendung des PIPE-Modells für die Entwicklung eines technischen Produkts veranschaulicht werden. Es wurde gezeigt, dass die **grundlegende Vorgehensweise des PIPE-PEP funktional** ist und systematisch die geforderten Ergebnisse liefert. Das Bewusstsein für die Nachhaltigkeitswirkungen des Produktsystems konnte durch die kontinuierliche Kombination von Analyse- und Synthesemethoden von Beginn an im PEP integriert werden. Somit konnten die Anforderungen an den zu entwickelnden PIPE-PEP aus Tabelle 4-5 größtenteils erfolgreich überprüft werden. Eine Ausnahme bildet hierbei die Anforderung, ein netto-positives Produktsystem zu generieren, wie es in Tabelle 4-4 beschrieben ist. Im Kontext der theoretischen Fallstudie konnte nur ein Teil der kalkulierten negativen Auswirkungen vermieden werden. Das liegt unter anderem an fehlenden Informationen aufgrund des nicht realisierten Produktsystems, wie beispielsweise über die genauen Stakeholdergruppen und die konkreten Prozess- und Arbeitsbedingungen. Daher konnten auch die genauen Prozesse und Wirkungen im Rahmen der Sammelprojekte der Kunststoffabfälle nicht eindeutig nachvollzogen werden. Somit konnten die **Nachhaltigkeitswirkungen nur mit Modellen abgeschätzt** und nicht real gemessen werden. Insbesondere verwendet die Ökobilanz generische Daten, die den aktuellen Durchschnitt der Umweltauswirkungen für bestimmte Prozesse widerspiegeln, anstatt die Umweltauswirkungen des nachhaltigsten dieser Prozesse zu berücksichtigen. Dadurch werden in der Fallstudie negative Umweltauswirkungen aufgezeigt, die bei der Realisierung eines ganzheitlich netto-positiven Produktsystems vermieden werden müssen. Ähnlich zu sozialen Risikoanalysen (siehe Kapitel 3.2.3) bieten die Analysen der Fallstudie damit die Möglichkeit zur Aufdeckung von solchen potenziellen negativen Auswirkungen. Zukünftige technologische Weiterentwicklungen können einen maßgeblichen Beitrag leisten, das Auftreten solcher negativer Auswirkungen weiter zu vermeiden. Da das PIPE-Modell auf dem Backcasting-Ansatz basiert, gehört das **Aufdecken noch notwendiger Entwicklungen** zu den erwarteten Ergebnissen. Die Darstellung der skizzierten Materialkreisläufe in einem realen Produktsystem stellt eine weitere Einschränkung der Fallstudie dar. Zwar wurden Verluste durch Reifenabrieb oder nicht zurückgegebene Laufräder einbezogen, die genauen Werte können jedoch erst im realen Produktsystem verifiziert werden. Dazu gehören auch Parameter der technischen Recyclingfähigkeit, wie Rezyklatanteile und die maximale Zyklenzahl im materiellen Recycling. Trotz dieser Einschränkungen hat die Fallstudie gezeigt, dass die Anwendung des PIPE-Modells eine vielversprechende **Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung netto-positiver Produktsysteme** in der Zukunft bietet.

### 6.3 Entwicklung eines PI-e-Bike

Die erste Fallstudie zeigt die grundsätzliche Funktionsweise des PIPE-Modells anhand eines technischen Produkts mit geringer bis mittlerer Komplexität auf. Zur Validierung des Modells in Hinblick auf **technisch komplexere Produkte** folgt eine zweite Studie, die auf die Entwicklung eines e-Bikes mit netto-positiver Nachhaltigkeitswirkung abzielt (kurz: PI-e-Bike). Ein e-Bike ist ein technisches Produkt, das für eine breite Zielgruppe entwickelt wurde, um unter anderem nachhaltige Mobilität zu fördern. Es handelt sich um ein **elektrisch unterstütztes Fahrrad**, das mithilfe eines Elektromotors die Trittkraft des Fahrers verstärkt und so eine komfortable Fortbewegung ermöglicht. Als inhärente positive Produkteigenschaft trägt das e-Bike durch die aktive Teilnahme des Fahrers an der Fortbewegung auch zur körperlichen Gesundheit des Fahrers bei. Im Folgenden wird das PIPE-Modell auf die **Entwicklung eines e-Bikes mit netto-positiver Wirkungsbilanz** angewendet.

#### 6.3.1 Phase 1: PI-e-Bike

In der ersten Phase des PIPE-PEP soll ein Profil des zu entwickelnden Produktsystems generiert werden, welches anschließend auf seine potenziellen Nachhaltigkeitswirkungen untersucht und bewertet wird. Analog zur ersten Fallstudie, wurde zunächst eine **Marktrecherche** durchgeführt, um bestehende Konzepte zu sichten und marktübliche Anforderungen zu identifizieren. Da viele Erkenntnisse aus der Fallstudie des PI-Kinderlaufrades auf Teile des PI-e-Bikes übertragen werden können, wird besonderer Fokus auf die Komponenten gelegt, die die beiden Produkte voneinander unterscheiden. Im Gegensatz zum Laufrad verfügen die durch die Marktrecherche identifizierten e-Bikes in der Regel über jeweils ein **Bremssystem für Vorder- und Hinterrad** und einen **pedalgetriebenen Antrieb, der zusätzlich elektromotorisch unterstützt** werden kann. Die Energie für die elektromotorische Unterstützung wird in einem **elektrischen Energiespeicher** gespeichert, wobei in aller Regel ein Akkumulator (kurz: Akku) eingesetzt wird. Über eine entsprechende **Steuerung** wird die gespeicherte Energie an den Elektromotor abhängig von der gewünschten Unterstützung weitergeleitet. Optional sind noch weitere Baugruppe wie eine **Beleuchtung** oder ein **Informationssystem zur Bedienung** der Pedalunterstützung vorgesehen. Zur Entwicklung eines Profils für das PI-e-Bike und das zugehörige Geschäftsmodell werden verschiedene Synthesemethoden kombiniert. Da die Beschreibung des gesamten Prozesses der Profilentwicklung den Rahmen der Fallstudie übersteigen würde, wird nur das **entwickelte Profil** selbst vorgestellt. Das e-Bike soll eine **nachhaltige und effiziente Mobilitätslösung** darstellen, die sowohl auf urbane Pendler als auch auf Freizeitfahrer zugeschnitten ist. Zentral hierfür stehen ein leistungsfähiger, langlebiger und leicht austauschbarer Akku mit einer **Reichweite von mindestens 80 Kilometern** sowie ein Elektromotor, der dem Nutzer eine **intuitive Unterstützung** bietet. Ein materialeffizienter und zugleich robuster Rahmen soll eine **lange Nutzungsdauer** ermöglichen und an verschiedene Körpergrößen anpassbar sein. Um unterschiedlichen Nutzeranforderungen gerecht zu werden, soll er zudem **flexibel erweiterbar** sein, etwa durch Gepäckträger oder Kindersitze. Das Produkt soll außerdem den **gesetzlichen Anforderungen** entsprechen,

um sicher im Straßenverkehr eingesetzt werden zu können. Durch die höhere technische Komplexität im Vergleich zum Kinderlaufrad werden voraussichtlich auch wesentlich mehr ökonomisch und ökologisch wertvolle Ressourcen zur Realisierung des Produkts benötigt. Um den Wert dieser Ressourcen im Sinne der Kreislaufwirtschaft langfristig erhalten zu können, wird neben einer möglichst **kreislauffähigen Produktgestaltung ein entsprechendes Geschäftsmodell** benötigt. Dieses Geschäftsmodell soll ermöglichen, dass jedes PI-e-Bike nach seiner Nutzung wieder zum produzierenden Unternehmen zurückgesendet wird, um dort durch verschiedene Werterhaltungsoptionen weiterhin wertschöpfend genutzt werden zu können. Daher wird ein **reines Leasingmodell** angestrebt, bei dem die Eigentumsrechte der Fahrräder beim Unternehmen verbleiben und nur temporär an die Kunden übertragen werden, wodurch eine bessere Kontrolle über den Lebenszyklus der Fahrräder und eine effiziente Rückführung gewährleistet werden soll. Transparente und regional ausgerichtete Lieferketten tragen dazu bei, die ökologischen und sozialen Auswirkungen zu minimieren. Damit das Produkt als PI-e-Bike gelten kann, soll es in allen Dimensionen der Nachhaltigkeit netto-positive Wirkungen erzielen.

Um eine erste Bewertung des PIPS-Profiles zu ermöglichen, wird eine **vorläufige Darstellung** skizziert, die zentrale Inputs und Outputs des Systems sowie die wichtigsten Stakeholder aufzeigt. Abbildung 6-13 illustriert diese Skizze und hebt analog zum Kinderlaufrad wesentliche Akteure hervor: **Lieferanten** für Materialien und Komponenten (1), **Produktionsmitarbeiter**, die das e-Bike herstellen und die Kreislaufstrategien umsetzen (2), mögliche **Partner für die Rückführung** in andere Kreisläufe (3) und schließlich die **Kunden** (4), die das e-Bike während des Leasings nutzen.

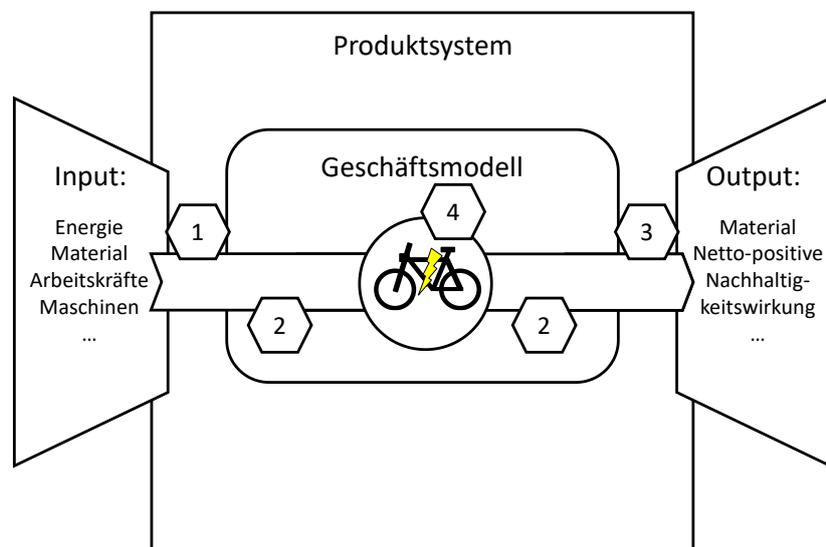


Abbildung 6-13: Skizze des PIPS-Profiles eines PI-e-Bike

Auch wenn das PIPS-Profil für das PI-e-Bike in dieser frühen Phase der Entwicklung noch nicht vollständig ausgearbeitet ist, lassen sich auch in dieser Fallstudie bereits zentrale **Schlüsselressourcen** identifizieren. Dazu zählen auf der Inputseite unter anderem Energie, qualifizierte Arbeitskräfte und Maschinen für die Herstellung des e-Bikes. Ebenso erforderlich sind die Materialien, aus denen die wesentlichen Komponenten wie Rahmen, Akku, Antriebseinheit, Steuerung

und Reifen gefertigt werden. Das geplante Kreislaufkonzept sieht vor, dass diese Materialien nach ihrer Nutzungsdauer im Produktsystem zurück in den Materialkreislauf geführt werden, um sie für andere Produkte wiederverwenden zu können. Als Ergebnis des Systems wird neben einem funktionalen und langlebigen Produkt eine netto-positive Nachhaltigkeitsbilanz angestrebt. Auf Grundlage dieses PIPS-Profiles erfolgt im PIOL eine erste **Analyse**. Diese konzentriert sich auf die Bewertung der In- und Outputs sowie auf eine Untersuchung der Risiken, die mit den wichtigsten Stakeholdern verbunden sind. Auch hier wird in der frühen Phase eine weitgehende lokale Wertschöpfung innerhalb Deutschlands angestrebt, um soziale Risiken gering zu halten. Mit Hilfe der In- und Output Wirkungsbeurteilung aus Abbildung 5-7 lassen sich die Anforderungen an die zentralen Ressourcen präzisieren und mit den Forderungen des PIPE-Ansatzes abgleichen. Für die Produktion und auch die spätere Nutzung sollte bevorzugt **Energie aus erneuerbaren Quellen** genutzt oder, falls dies nicht vollständig möglich ist, durch geeignete Maßnahmen kompensiert werden. Hier wird eine erste Problematik identifiziert, da der Akku des e-Bikes **vom späteren Nutzer an verschiedenen Stromquellen geladen** werden könnte. Da die ökologischen Auswirkungen in der Nutzungsphase stark abhängig von der primären Energieform zur Stromerzeugung sind, können diese aufgrund der fehlenden Informationen über die ursprüngliche Energieform nicht ausgewertet werden. Eine vollständige Nutzung von erneuerbaren Energiequellen ist im aktuellen Strommix nicht flächendeckend umsetzbar, sodass mit hoher Wahrscheinlichkeit negative Nachhaltigkeitswirkungen entstehen. Da diese sich jedoch technisch nicht valide abschätzen lassen, wird auch die benötigte netto-positive Kompensation dieser Wirkungen in der Nutzungsphase nicht präzise möglich sein.

Bei den eingesetzten **Materialien** sollte der Schwerpunkt wieder auf Sekundärrohstoffen oder recycelten Materialien aus Abfallströmen liegen. Insbesondere bei den Komponenten des elektromotorischen Antriebs werden durch die Analyse im Rahmen des PIOL fortlaufend kritische Punkte aufgedeckt. Die in der Marktrecherche identifizierten e-Bikes verwenden Materialien, die seitens der EU als **kritische Rohstoffe** eingeordnet werden [EDBB17, Euro17]. Dazu zählen beispielsweise Lithium, Kobalt und Nickel für den Akku oder seltene Erden wie Neodym und Dysprosium in den Motoren. Viele dieser Stoffe werden unter **Einsatz von toxischen Chemikalien** gewonnen und sind mit **sozialen negativen Auswirkungen** verbunden [Umwe23], wodurch der Einsatz in Form von Primärmaterialien in einem netto-positiven Produkt ausgeschlossen werden muss. Ein Recycling dieser kritischen Rohstoffe findet noch nicht im größeren Maßstab statt [PAAV19], auch wenn für die nahe Zukunft gesetzliche Recyclingquoten von 90 % in der EU beschlossen wurden [Euro23b]. Durch den erneuten Einsatz von Synthesemethoden im PIOL konnten alternative Lösungskonzepte mit teilweise substituierten Rohstoffen oder Initiativen für eine **sozial nachhaltige Rohstoffgewinnung** recherchiert werden [Thef24]. Viele dieser potenziell nachhaltigeren Lösungskonzepte für Komponenten des elektromotorischen Antriebs befinden sich jedoch noch in der Entwicklung und stellen aktuell aus funktionaler und ökonomischer Sicht **keine marktfähige Alternative** dar. In Verbindung mit den verbleibenden Risiken für sozial negative Folgen bei technisch derzeit nicht substituierbaren Rohstoffen, konnte die

**Wirkungsbeurteilung in der ersten Phase des PIPE-PEP für das PI-e-Bike nicht erfolgreich durchgeführt** werden. Das Auftreten von negativen Nachhaltigkeitswirkungen, die sich weder vermeiden noch kompensieren lassen wird als hoch eingeschätzt, weswegen die Entwicklung des PI-e-Bikes unter den aktuell vorherrschenden Bedingungen bereits in der ersten Phase der Fallstudie abgebrochen wird.

### 6.3.2 Fazit der Fallstudie PI-e-Bike

Die zweite Fallstudie über die Entwicklung eines PI-e-Bikes kann nicht erfolgreich durchgeführt werden und zeigt damit aktuelle Limitationen des PIPE-Modells auf, woraus sich wertvolle Erkenntnisse ziehen lassen. Zunächst ist vorteilhaft zu bewerten, dass potenzielle nicht zu vermeidende negative Nachhaltigkeitswirkungen durch die Wirkungsbeurteilung in Phase 1 zu einem **frühen Entwicklungszeitpunkt im PEP** aufgedeckt und untersucht werden konnten. Dadurch wurden Entwicklungsressourcen geschont, da das Produktsystem nicht vollständig entwickelt wurde, bevor die Nachhaltigkeitswirkungen retrospektiv untersucht wurden. Dies spricht für die Untergliederung in mindestens vier Phasen des PEP und die integrative Zusammenführung von Synthese und Analyse. Gleichzeitig zeigt die Fallstudie auf, dass das PIPE-Modell **unter aktuellen Umständen nicht für jedes technische Produkt vollständig anwendbar** ist. Insbesondere komplexe und energieverbrauchsrelevante Produkte, nicht nachhaltige Energieformen, intransparente Lieferketten und die Kritikalität einiger Rohstoffe verhindern zu diesem Zeitpunkt die Gestaltung von netto-positiven Produktsystemen. Die Limitationen des PIPE-Modells über diese Fallstudie hinaus werden im folgenden Kapitel 7.2 ausführlicher diskutiert. Eine Möglichkeit diesen Einschränkungen entgegenzutreten, besteht unter anderem darin, die **Entwicklungsaufgabe kritisch zu hinterfragen**. Im Rahmen der Fallstudie wurde durch die Vorgabe eines elektromotorischen Antriebs bereits ein gewisser Lösungsraum vorgegeben. Wie in 5.5.2 erwähnt, gilt es in solchen Fällen, die Entwicklungsaufgabe im Sinne der Nachhaltigkeit in Frage zu stellen und das zu lösende Problem weiter zu abstrahieren. Dadurch wird der Lösungsraum erweitert und die Umsetzung netto-positiver Lösungskonzepte ermöglicht.



## 7 Diskussion

Im Anschluss an die beiden Validierungsbeispiele werden in diesem Kapitel das vorgestellte PIPE-Modell sowie Erkenntnisse und Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Fallstudien systematisch analysiert und kritisch reflektiert. Dazu erfolgt zunächst ein Abgleich mit den in Kapitel 4.3 gestellten Anforderungen an den PIPE-PEP (Kapitel 7.1.1) und das PIPS (Kapitel 7.1.2). Darauf aufbauend werden in Kapitel 7.2 Limitationen des Ansatzes diskutiert, wobei sowohl methodische als auch Herausforderungen in der Umsetzung beleuchtet werden. Dabei werden auch Hinweise auf notwendige zukünftige Entwicklungen gegeben, die für eine erfolgreiche Realisierung des PIPE-Ansatzes von Bedeutung sind. Nachfolgend werden die Forschungsfragen in Kapitel 7.3 abschließend beantwortet, um die Zielsetzung der Dissertation zu validieren und die Ergebnisse im Forschungskontext einzuordnen.

### 7.1 Überprüfung der Anforderungen

Zunächst wird verifiziert, ob und inwiefern das entwickelte Produktentstehungsmodell den im Handlungsbedarf formulierten Anforderungen für PEP und PIPS gerecht wird.

#### 7.1.1 Anforderungserfüllung des PIPE-PEP

In Kapitel 4.3 wurden basierend auf den Defiziten des Stands der Forschung und dem daraus abgeleiteten Handlungsbedarf Anforderungen an den zu entwickelnden PEP hergeleitet und in Tabelle 4-5 festgehalten. In Rahmen der Diskussion soll nun die **Anforderungserfüllung des vorgestellten PIPE-PEP** untersucht werden. Die Anforderungen können anhand eines **fünfstufigen Bewertungssystems**, das von „voll erfüllt“ bis „nicht erfüllt“ reicht, beurteilt werden, wie in Tabelle 7-1 veranschaulicht.

Der PIPE-PEP ist als **überlagernder Prozess** um einen Basis-PEP herum konzipiert. Ergänzend zu den Basisaktivitäten der Produktentstehung werden über den gesamten PEP hinweg sowohl Analyse- als auch Syntheseaktivitäten spezifisch in jeder Entwicklungsphase durchgeführt. Der PIOL, als zentrales Element des PIPE-Modells, ermöglicht eine **kontinuierliche Verbesserung der Nachhaltigkeit durch den iterativen Einsatz von Synthese- und Analysemethoden**. Damit gelten die ersten beiden Anforderungen durch den gewählten Aufbau des PIPE-PEP als vollständig erfüllt. Um bei der Produktentstehung alle Aspekte der Nachhaltigkeit berücksichtigen zu können, erfordert der PIPE-PEP eine **ganzheitliche Herangehensweise**. Durch die umfassende Einbindung etablierter Methoden aus dem aktuellen Stand der Forschung werden ökologische, soziale sowie Aspekte der Kreislauffähigkeit systematisch adressiert. Obwohl der Prozess mehrere Methoden zur Kostenrechnung und zur Entwicklung des Geschäftsmodells einbezieht, fehlt ein fundierter **Bezug zur ökonomischen Nachhaltigkeit**. Aufgrund fehlender Definitionen und Grundlagen in diesem Bereich (siehe Kapitel 2.1.4) konnte die ökonomische Dimension lediglich im Rahmen des aktuellen Verständnisses berücksichtigt werden und gilt daher als größtenteils erfüllt. Der Grundsatz der **Lebenszyklusbetrachtung** ist sowohl im PIPE-PEP als auch in den meisten der darin eingebundenen Methoden fest verankert, wodurch die Anforderung, den gesamten

Produktlebenszyklus einzubeziehen, ebenfalls erfüllt wird. Die **Systembetrachtung** umfasst die Integration aller relevanten, mit dem Produkt und dem Geschäftsmodell verbundenen Systeme und Stakeholder. Die Fallstudie aus Kapitel 6.2 hat am Beispiel des vergleichsweise einfachen Produkts „PI-Kinderlaufrad“ gezeigt, dass die vollständige Berücksichtigung aller Subsysteme, wie der zugelieferten Materialien und Bauteile, einen hohen Umsetzungsaufwand und die enge Zusammenarbeit mit den beteiligten Verantwortlichen erfordert. Auch wenn eine vollständige Systembetrachtung grundsätzlich in PIPE eingebunden ist, wird die Anforderung aufgrund der aktuell **schwierigen Umsetzbarkeit** nur größtenteils erfüllt. In Kombination mit den Defiziten im Bereich der ökonomischen Nachhaltigkeit, kann also auch die ganzheitliche Herangehensweise im PIPE-PEP unter derzeitigen Randbedingungen nur zum größten Teil umgesetzt werden.

Der PIPE-PEP wurde in einer **strukturierten und generischen Form** entwickelt, um die vielseitigen Herausforderungen der *Nachhaltigen Produktentstehung* systematisch anzugehen und ihn auf möglichst viele Entwicklungsaufgaben technischer Produkte anwenden zu können. Dazu tragen der übersichtliche Aufbau nach **vier etablierten Hauptphasen** sowie die fest definierten **Zwischenziele** bei, die am Ende jeder Phase durch die **Integration von Basis-, Analyse- und Syntheseaktivitäten** sowie deren Ergebnissen erreicht werden. Da der PIPE-PEP kein Referenzprodukt erfordert und sowohl mit einem Problem als auch einer konkreten Entwicklungsaufgabe starten kann, eignet er sich gleichermaßen für **Neuentwicklungen und Produktgenerationsentwicklungen**. Die **Entscheidungsfindung** im PEP wird durch das kontinuierliche Durchlaufen des PIOL sowie die damit verbundene Beurteilung der analysierten Wirkungen methodisch unterstützt. Durch die ganzheitliche Analyse werden sowohl technische als auch Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigt, die mithilfe multikriterieller Entscheidungsfindung zu fundierten Entscheidungen führen. Ergänzend bietet die **umfangreiche Methodensammlung** in tabellarischer Form eine Unterstützung bei der Auswahl geeigneter Methoden im PIPE-PEP. Da das PIPE-Modell bisher nur auf wenige Produkte durch mit dem Modell vertraute Personen angewendet wurde, muss die Methodensammlung in der Anwendung des Modells durch Dritte validiert und gegebenenfalls erweitert werden. Aus den gleichen Gründen konnte die Anforderung, die **Interdisziplinarität** im PEP zu fördern, im Rahmen der Fallstudien nicht vollständig geprüft werden und gilt daher nur als teilweise erfüllt. Die ganzheitliche Herangehensweise erfordert die Zusammenarbeit von Personen aus mehreren Fachbereichen und verschiedenen Disziplinen. Gegebenenfalls muss das PIPE-Modell auf die benötigte Interdisziplinarität weiter angepasst werden. Somit konnte die übergreifende Anforderung, einen strukturierten PEP in generischer Form darzustellen, zum größten Teil erfüllt werden.

Der PIPE-PEP kann zudem durch die kontinuierliche Integration von Analyseaktivitäten und die Zielsetzung eines netto-positiven Produktsystems von Beginn an dabei unterstützen, die **Nachhaltigkeit sowie positive Wirkungen zu fokussieren und zu fördern**. Bei Bedarf ermöglicht er auch, die Entwicklungsaufgabe in dieser Hinsicht zu hinterfragen. Wie im folgenden Unterkapitel 7.1.2 näher erläutert wird, konnte die Anforderung, durch den PIPE-PEP ein netto-positives Produktsystem zu generieren, größtenteils erfüllt werden.

Tabelle 7-1: Bewertung der Anforderungserfüllung des entwickelten PIPE-PEP

Nr.	Anforderung	Bewertung
	Das Produktentstehungsprozess soll...	
1.	sowohl Analyse-, als auch Syntheseaktivitäten im Vorgehensmodell kontinuierlich integrieren.	●
1.1	als iterativer Prozess zur kontinuierlichen Verbesserung der Nachhaltigkeit des Produktsystems beitragen.	●
2.	eine ganzheitliche Herangehensweise aufzeigen.	◐
2.1	die ökologischen Aspekte betrachten.	●
2.2	die sozialen Aspekte betrachten.	●
2.3	die ökonomischen Aspekte betrachten.	◐
2.4	die Aspekte der Kreislaufwirtschaft betrachten.	●
2.5	durch die Lebenszyklusbetrachtung den gesamten Produktlebenszyklus miteinbeziehen.	●
2.6	durch die Systembetrachtung alle relevanten, mit dem Produkt verbundenen Systeme, Stakeholder und das Geschäftsmodell berücksichtigen.	◐
3.	einen strukturierten PEP in generischer Form darstellen.	◐
3.1	eine nachvollziehbare Vorgehensweise mit klaren Zwischenzielen aufzeigen.	●
3.2	mindestens die vier Phasen „Planen und Klären der Aufgabe“, „Konzipieren“, „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“ umfassen.	●
3.3	sowohl auf Neuentwicklungen als auf Produktgenerationsentwicklungen anwendbar sein.	●
3.4	bei der Entscheidungsfindung unterstützen.	●
3.5	eine Hilfestellung zur Auswahl passender Methoden leisten.	◐
3.6	Interdisziplinarität in der Entwicklung fördern.	◐
4.	soll als Ergebnis ein netto-positives Produktsystem generieren, wie es in Tabelle 4-4 beschrieben ist.	◐
4.1	dabei unterstützen die Nachhaltigkeit und positive Wirkungen von Beginn an zu fokussieren und die Entwicklungsaufgabe diesbezüglich kritisch hinterfragen.	●

● voll erfüllt / hoch

◐ größtenteils erfüllt

◑ teilweise erfüllt

◒ wenig erfüllt

○ nicht erfüllt / niedrig

### 7.1.2 Anforderungserfüllung des PIPS

Als zweiter Teil des PIPE-Modells wird das PIPS bezüglich der zuvor in Kapitel 4.3 gestellten Anforderungen aus Tabelle 4-4 bewertet. Die **Anforderungen und die Bewertung ihrer Erfüllung durch das PIPS** sind in Tabelle 7-2 dargestellt. Die ganzheitliche Herangehensweise im PEP soll zu einer entsprechend **ganzheitlichen Definition des Produktsystems** führen. Dabei konnte in der ersten Fallstudie gezeigt werden, dass sich der gesamte **Produktlebenszyklus** inklusive der Wertströme und Lieferketten im PIPS abbilden lässt. Anhand dieser Wertströme konnten auch die involvierten **Stakeholder** im Produktsystem identifiziert werden. Das **Geschäftsmodell** und die zugehörigen **Subsysteme** werden im PIPS-Modell ebenfalls berücksichtigt, jedoch nur in vereinfachter Form. Diese beiden Elemente des PIPS bieten die Möglichkeit, das Modell zu erweitern, um die verschiedenen Aspekte des Geschäftsmodells und die Detailtiefe der Subsysteme noch präziser abzubilden. In Hinblick auf diese Defizite gilt die ganzheitliche Definition des Produktsystems als größtenteils erfüllt.

Die zweite übergreifende Anforderung an das PIPS zielt auf eine **netto-positive Nachhaltigkeitswirkung in den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit** ab. Die Fallstudie des „PI-Kinderlaufrad“ hat gezeigt, dass die gewählten Analysemethoden die ökologischen, sozialen und ökonomischen Wirkungen sowie die Aspekte der Kreislauffähigkeit umfassend abbilden können. Die vollständige Vermeidung negativer Wirkungen, die zu irreversiblen Schäden führen und daher nicht kompensierbar sind, konnte jedoch in der Fallstudie nicht erreicht werden. In der sozialen Dimension wurden potenzielle Risiken für negative Auswirkungen identifiziert, wodurch die Möglichkeit entsteht, diese aktiv im realisierten Produktsystem zu vermeiden. Bei der ökologischen Wirkungsabschätzung wurden in der Ökobilanz mehrere dieser nicht kompensierbaren Wirkungen, insbesondere in den hinterlegten Vorketten zur Material- und Energiebereitstellung, identifiziert. Es konnten zwar Hinweise gegeben werden, wie diese durch technologische Entwicklungen zum Teil vermieden werden könnten, jedoch bleibt **fraglich, ob die vollständige Vermeidung in komplexen Produktsystemen möglich ist**. Daher konnte diese Anforderung im Rahmen der Fallstudie nur teilweise erfüllt werden.

Tabelle 7-2: Bewertung der Anforderungserfüllung des entwickelten PIPS

Nr.	Anforderung	Bewertung
	Das Produktsystem soll...	
1.	ganzheitlich durch den PEP definiert werden.	
1.1	den gesamten Produktlebenszyklus inklusive der benötigten Lieferketten und Wertströme beinhalten.	
1.2	alle involvierten Stakeholder berücksichtigen.	
1.3	das Geschäftsmodell miteinbeziehen.	
1.4	alle relevanten Subsysteme inkludieren.	
2.	eine netto-positive Nachhaltigkeitswirkung in den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit aufzeigen.	
2.1	so analysiert sein, dass alle ökologischen, sozialen und ökonomischen Nachhaltigkeitswirkungen sowie Aspekte der Kreislauffähigkeit, positiver wie negativer Art, vollständig bekannt sind.	
2.2	keine negativen Auswirkungen aufweisen, die zu irreversiblen Schäden führen.	
2.3	die Nachhaltigkeitswirkungen derart bilanzieren, dass (falls notwendig durch Kompensationsmaßnahmen) eine netto-positive Nachhaltigkeitsbilanz in jeder Wirkungskategorie, in der reversible negative Auswirkungen auftreten, entsteht.	
3.	so gestaltet sein, dass die Nachhaltigkeit des Systems für den Endkunden einfach nachvollziehbar ist.	

voll erfüllt / hoch     
 größtenteils erfüllt     
 teilweise erfüllt  
 wenig erfüllt     
 nicht erfüllt / niedrig

Die kompensierbaren negativen Auswirkungen konnten in der theoretischen Fallstudie durch entsprechende Kompensationsmaßnahmen netto-positiv bilanziert werden. Dennoch besteht Bedarf, die **Kompensationsmöglichkeiten in allen gelb kategorisierten Wirkungskategorien weiter auszubauen** und diese entsprechend den **Anforderungen an Kompensationsmaßnahmen** aus Tabelle 5-2 zu gestalten. Somit bietet das Modell des PIPS grundsätzlich die Möglichkeit, eine netto-positive Nachhaltigkeitswirkung aufzuzeigen, jedoch besteht für die erfolgreiche

Realisierung solcher Produktsysteme derzeit noch Handlungsbedarf, der in Kapitel 7.2 genauer definiert wird. Die Anforderung wird entsprechend zum größten Teil erfüllt.

Die Herausforderungen bei der Umsetzung der Netto-Positivität des PIPS führen dazu, dass die letzte Anforderung lediglich in Teilen erfüllt werden kann. Die Nachhaltigkeit des Produktsystems sollte vor allem durch die ganzheitliche Netto-Positivität auch für den Endkunden einfach nachvollziehbar sein.

## 7.2 Übergreifende Diskussion und Schlussfolgerungen

Nachdem die Erfüllung der einzelnen Anforderungen an den PIPE-PEP und das PIPS bewertet wurden, wird in diesem Kapitel eine **umfassende Diskussion** des PIPE-Ansatzes geführt, aus der auch **Schlussfolgerungen für die weitere Entwicklung** abgeleitet werden. PIPE repräsentiert ein visionäres Produktentstehungsmodell, das mithilfe des Backcasting-Ansatzes als erstrebenswertes Zukunftsbild konzipiert wurde. Durch das klare Ziel, Produktsysteme zu schaffen, die eine positive Wirkung auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft haben, statt ihnen zu schaden, wird eine **neue Denkweise innerhalb der Nachhaltigen Produktentstehung** etabliert. In diesem Sinne der Öko-Effektivität bietet PIPE ein strukturiertes Modell zur systematischen Entwicklung von Produktsystemen mit netto-positiver Nachhaltigkeitswirkung. Werden solche Produktsysteme erfolgreich realisiert, ist die Nachhaltigkeit der Systeme sichergestellt und auch für fachfremde Endkunden einfach nachvollziehbar. Zudem bietet PIPE Produktentwicklern ein eindeutiges Nachhaltigkeitsziel, indem es die Vision des netto-positiven Produktsystems etabliert, anstatt wie bei vielen bisherigen Ansätzen üblich, lediglich Effizienzsteigerungen anzustreben. Die ganzheitliche Herangehensweise im Modell bietet die **methodischen Grundlagen, alle relevanten Wirkungen erfassen und beurteilen** zu können, wodurch sich PIPE von bestehenden Ansätzen, die meist nur wenige der vielfältigen Nachhaltigkeitswirkungen betrachten, abheben kann. Durch die umfassende Betrachtung der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit und Aspekten der Kreislaufwirtschaft, könnte der oft vorherrschende Tunnelblick, beispielsweise auf einzelne Emissionen, überwunden werden. Durch das „**Frontloading**“ und die kontinuierliche Integration von Analysemethoden kann das Bewusstsein der Produktentwickler für die Nachhaltigkeitswirkungen von Beginn an im PEP gestärkt werden. Die neuartige Vorgehensweise iterativer Optimierungsschleifen aus Analyse- und Synthesemethoden der *Nachhaltigen Produktentstehung* im Rahmen des PIOL fördert zudem das **Verständnis für Wechselwirkungen und Zielkonflikte innerhalb der Nachhaltigkeitsdimensionen sowie mit konstruktiven Entscheidungen**. Dadurch kann die Entscheidungsfindung im PEP auf Basis fundierter Erkenntnisse umgesetzt werden. Außerdem bietet die umfangreiche und erweiterbare Methodensammlung die Möglichkeit, passende Methoden für die jeweilige Entwicklungsaufgabe und Zielsetzung individuell im PEP auswählen zu können. Obwohl das PIPE-Modell vielversprechende Vorteile bietet, ist es im Rahmen des Backcasting-Ansatzes und der Diskussion auch erforderlich, die **bestehenden Limitationen sowie die notwendigen Entwicklungen zu deren Überwindung** aufzuzeigen. Die Umsetzbarkeit von PIPE ist aktuell

durch mehrere Faktoren begrenzt, auf die im Folgenden eingegangen werden soll. Die erste Limitation besteht in der **Komplexität** des PIPE-PEP und der zu entwickelnden Produktsysteme. Durch die Zielsetzung einer ganzheitlichen Herangehensweise muss der **Untersuchungsrahmen** insbesondere für die Analysemethoden schon bei simplen Produktsystemen sehr weit gefasst werden, wie in der ersten Fallstudie gezeigt wird. Dabei stellen komplexe und globale Lieferketten mit unbekanntem Nachhaltigkeitswirkungen eine besondere Herausforderung dar. Es können zwar durchschnittliche potenzielle Auswirkungen modellbasiert (z.B. Ökobilanzdatenbanken) abgeschätzt werden, jedoch sind für eine ganzheitliche Analyse die **real auftretenden Wirkungen** zu erfassen. Auch wenn die vollständige Erfassung unternehmensintern derzeit vorstellbar ist, setzt die Analyse der real auftretenden Auswirkungen verbundener Subsysteme, die **Kooperation und transparente Informationsweitergabe** zwischen den einzelnen Akteuren der Wertschöpfungsketten voraus. Erweiterungen des Lieferkettensorgfaltspflichtengesetzes sowie besondere (gesetzliche) Anforderungen an Zulieferer und Kooperationspartner, wie eine verpflichtende Zertifizierung nach SA8000 oder die Bereitstellung von Ökobilanzen des Produktportfolios, stellen potenziell vorteilhafte Entwicklungen dar. Diese könnten die Komplexität in der ganzheitlichen Erfassung von Produktsystemen durch die **Verteilung der Verantwortlichkeiten** und Stärkung der Kooperationen verringern. Dabei könnten auch die **Erweiterung und verbesserte Verfügbarkeit von Datenbanken**, wie beispielsweise im „Global LCA Data Access network“ [Life24, VVFS24] der LCI, sowie die Nutzung **neuer technologischer Ansätze zur Datenverarbeitung**, etwa durch künstliche Intelligenz [GMWT25] oder Graph-Datenbanken [SMBV22], hilfreich sein. Wenn der PIPE-Ansatz zudem **auf andere Branchen und Systeme übertragen** wird und andere beteiligte Systeme bereits netto-positive Nachhaltigkeitswirkungen aufweisen, verringert sich die Komplexität erheblich. Beispielsweise könnten genormte Bauteile wie Schrauben, Lager oder Profile, die in vielen Systemen Verwendung finden, einen geeigneten Ausgangspunkt für die Entwicklung und den Vertrieb von PI-Bauteilen darstellen. Aus diesem Grund stellt die Umsetzung und der Ausbau vielversprechender Konzepte wie das der Positivfabrik [Geb122, HBKS15] eine weitere, erstrebenswerte Entwicklung für die Zukunft dar.

Eine zusätzliche Limitation von PIPE besteht im aktuellen Fortschritt der **Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft**. In PIPE werden kreislauffähige Produktsysteme angestrebt, die insbesondere bei komplexen Produkten **technologische und infrastrukturelle Voraussetzungen** der Kreislaufwirtschaft benötigen. Durch den zukünftigen Ausbau der Kreislaufwirtschaft sollten sich beispielsweise die Verfügbarkeit von Rezyklaten und die Bandbreite an Möglichkeiten des materiellen Recyclings zunehmend verbessern. Dies erleichtert gleichzeitig die Umsetzbarkeit eines kreislauffähigen PIPS inklusive eines passenden zirkulären Geschäftsmodells (vgl. [HWFL21]).

Die Fallstudien haben zudem weitere notwendige technologische Entwicklungen aufgedeckt. Dazu zählen insbesondere die Notwendigkeit für **neue und nachhaltige Formen der Energiegewinnung sowie neue Transport- bzw. Mobilitätslösungen**. Auch wenn in diesen Bereichen die Abkehr von fossilen Energieträgern begonnen hat und erneuerbare Energien bereits einen

wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leisten, ist im Sinne des PIPE-Ansatzes eine weitere Forschung nach nachhaltigen Lösungen erstrebenswert.

Weitere Limitationen bestehen im Bereich der **Kompensationen** innerhalb des PIPE-Modells. Wie bereits beim Abgleich der Anforderungen in Kapitel 7.1.2 festgestellt wurde, müssen die Kompensationsmaßnahmen für die Realisierung eines PIPS weiter ausgebaut werden. Das gilt besonders für die kompensierbaren Wirkungskategorien neben der Wirkungskategorie Klimaänderung. Verbesserungsbedarf besteht jedoch auch bei den Klimakompensationsmaßnahmen, deren **Wirksamkeit** dringend besser überprüft werden muss, wie mehrere Forschungsarbeiten zeigen [BBCF23, BFHH22, DLKW24, GiKH24, HAAB23, Haya10, Haya19, HCSG20, HEBB23, OCFH23, RiWP15, SNPB23, WBSK20, WeBF19, WeBH24, West16, WWSB23]. Die Effektivität von Kompensationen muss durch weitere Forschungsarbeiten und gesetzliche Regelungen besser verstanden und abgesichert werden. Zudem müssen zukünftig auch die **Nachhaltigkeitswirkungen erfasst werden, die durch die Kompensationsprojekte entstehen**. Neben den gewünschten positiven Effekten können auch **ungewünschte negative Auswirkungen** entstehen, wie beispielsweise von Ali et al. [AHWG24] gezeigt. Diese müssen bei einer konsequenten Umsetzung des PIPE-Ansatzes ebenfalls in die Wirkungsbilanz einfließen. Außerdem sollte der **Einfluss der räumlichen Distanz** zwischen dem Entstehungsort einer negativen Wirkung und dem Kompensationsort auf die Wirksamkeit der Maßnahmen untersucht werden. Für den Fall, dass nicht in jeder Wirkungskategorie effektive Kompensationsmöglichkeiten etabliert werden können, könnte PIPE als **Innovationstreiber für neue nachhaltige Technologien** dienen, die negative Auswirkungen in diesen Kategorien gänzlich vermeiden. Durch die Kompensationsmaßnahmen entstehen in aller Regel zusätzliche Kosten, die als Anreiz dienen können, negative Auswirkungen gemäß der Vermeidungshierarchie (Abbildung 5-6) zunächst zu vermeiden und zu reduzieren, statt sie einfach zu kompensieren. Dieser Mechanismus sollte künftig auch die korrekte Bepreisung von Umwelt- und sozialen Kosten in die Lebenszykluskosten eines Produkts integrieren.

Eng mit den Kompensationsmaßnahmen verbunden ist die **Wirkungsbeurteilung**, für die in dieser Arbeit ein erster **Vorschlag zur qualitativen Bewertung ökologischer und sozialer Wirkungen** in den drei Kategorien grün, gelb und rot unterbreitet wurde. Diese Einteilung sollte im wissenschaftlichen Diskurs in verschiedenen Fachbereichen weiter untersucht und gegebenenfalls überarbeitet werden, bis ein **Konsens auf wissenschaftlicher Basis** gefunden wird. Es ist denkbar, dass in Zukunft zusätzliche Wirkungskategorien entwickelt werden, um Wirkungen zu berücksichtigen, die in den derzeitigen Modellen der Wirkungsabschätzung noch nicht erfasst werden. Somit könnte auch eine gänzlich andere Klassifizierung der Wirkungen notwendig werden.

Für eine Anwendung des PIPE-Modells in der industriellen Praxis wäre zudem ein **unabhängiger Zertifizierungsprozess durch Dritte** erforderlich, der mindestens die Berechnung der Nachhaltigkeitswirkungen und der damit verbundenen Kompensationsbilanz sowie die Effektivität der Kompensationsmaßnahmen überprüft. Dadurch soll die Netto-Positivität der entwickelten Produktsysteme für alle Stakeholder und insbesondere für die Endkunden nachvollziehbar gewährleistet

werden. Hierbei könnten auch die Grundlagen für eine mögliche **Standardisierung des PIPE-Modells** mit entsprechenden Bewertungsdokumenten gelegt werden.

Durch die Diskussion der verschiedenen Limitationen der aktuellen Umsetzbarkeit von PIPE konnten entsprechende Schlussfolgerungen für notwendige Entwicklungen in der Zukunft abgeleitet werden. Trotz der identifizierten Herausforderungen bleibt die erfolgreiche **Umsetzung des PIPE-Modells ein erstrebenswertes Ziel**. Auch wenn dieses Ziel ambitioniert ist, kann es durch seine hohen Ansprüche als potenzieller Leuchtturm im Bereich der *Nachhaltigen Produktentstehung* eine wegweisende Funktion erfüllen.

Zur besseren Übersicht sind die wesentlichen, zukünftig erforderlichen Entwicklungen für eine erfolgreiche Anwendung des PIPE-Modells in Stichpunkten zusammengefasst. An dieser Stelle werden jedoch nur die externen Rahmenbedingungen und systemischen Voraussetzungen thematisiert. Im Ausblick in Kapitel 8.2 werden weitere modellbezogene Entwicklungsmöglichkeiten von PIPE selbst abschließend aufgegriffen und präsentiert.

#### **Notwendige systemische Entwicklungen**

- Ausbau der Möglichkeiten zur Datenerfassung und -verarbeitung
- Förderung und Etablierung einer umfassenden Kreislaufwirtschaft
- Entwicklung neuer, nachhaltiger Technologien in Schlüsselbereichen wie Energieversorgung, Mobilität und industrieller Produktion
- Weiterentwicklung der Kompensationsmaßnahmen:
  - Erweiterung auf alle ökologischen Wirkungskategorien
  - Sicherstellung der Effektivität der Maßnahmen durch wissenschaftlich fundierte Methoden
  - Erfassung der Nachhaltigkeitswirkungen von Kompensationsprojekten
- Erarbeitung eines wissenschaftlich fundierten Konsenses zur Wirkungsbeurteilung
- Etablierung eines unabhängigen Zertifizierungsprozesses für PIPE

### **7.3 Beantwortung der Forschungsfragen**

Im Anschluss an die Diskussion erfolgt die abschließende Beantwortung der Forschungsfragen. Diese wurden in Kapitel 1.2.2 formuliert und in Kapitel 4.2 bereits teilweise behandelt, sodass nun nach der Vorstellung und Validierung des PIPE-Modells und der anschließenden Diskussion die Voraussetzungen für eine umfassende Beantwortung geschaffen sind. Im Folgenden wird separat auf die einzelnen Forschungsfragen eingegangen.

#### **1.) Wie können Produktsysteme so gestaltet werden, dass sie positive Nachhaltigkeitswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft haben?**

Die übergreifende Forschungsfrage formuliert das Gesamtziel dieser Arbeit. Zur Gestaltung von Produktsystemen mit positiven Nachhaltigkeitswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und

Wirtschaft, wurde in Kapitel 5 das Produktentstehungsmodell PIPE vorgestellt. PIPE wurde auf Basis des Backcasting-Ansatzes entwickelt, wodurch aktuelle technologische, politische und infrastrukturelle Einschränkungen zunächst ausgeklammert wurden, um die Vision von Produkten mit einem „Positive Impact“ uneingeschränkt verfolgen zu können. Das so entstandene Modell umfasst einen in vier Phasen strukturierten PEP, der systematisch die Entstehung eines Produktsystems mit netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen (PIPS) ermöglicht. Durch die Iteration von Synthese- und Analysemethoden und der qualitativen Beurteilung der Nachhaltigkeitswirkungen im PIOL wird das Ziel einer netto-positiven Wirkungsbilanz in allen drei Dimensionen der Nachhaltigkeit von Beginn des PEP an konsequent verfolgt. Mittels Integration der Einzelergebnisse der verschiedenen Aktivitäten zu Zwischenzielen am Ende jeder PEP-Phase wird die Erreichung dieses Ziels kontinuierlich überprüft.

Die Umsetzbarkeit des PIPE-Modells wurde in Kapitel 6 in Form von zwei Fallstudien validiert. Am Beispiel eines PI-Kinderlaufrades konnte das Modell weitgehend erfolgreich angewendet und praktisch veranschaulicht werden. Die Entwicklung des wesentlich komplexeren zweiten Produktbeispiels eines PI-e-Bikes musste bereits bei der Integration der ersten Phase des PEP abgebrochen werden, da die Erreichung einer netto-positiven Wirkungsbilanz aufgrund sozialer Risiken und technologischer Limitationen als nicht realisierbar eingestuft wurde. Die derzeit eingeschränkte Umsetzbarkeit ist wenig überraschend, da das Modell auf dem Backcasting-Ansatz basiert und die Umsetzung netto-positiver Produktsysteme ein ausgesprochen anspruchsvolles Ziel darstellt.

In der Diskussion (Kapitel 7.2) wurden daher die vorherrschenden Limitationen des Modells kritisch reflektiert und die notwendigen Entwicklungen für eine erfolgreiche Umsetzung abgeleitet. Dabei wurde das Modell auch hinsichtlich der in Kapitel 4.3 gestellten Anforderungen bewertet. Das PIPE-Modell konnte diesen Anforderungen mit wenigen Einschränkungen gerecht werden.

Die Untergliederung der Hauptforschungsfrage in die folgenden Unterfragen ermöglicht eine vertiefte Erläuterung.

## **2.) Wie lässt sich die Nachhaltigkeitswirkung von Produktsystemen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft bestimmen?**

Die zweite Forschungsfrage wurde bereits in Kapitel 4.3 umfassend behandelt. In Kapitel 3.2 wurden verschiedene Analysemethoden vorgestellt, die eine differenzierte und ganzheitliche Bestimmung der Nachhaltigkeitswirkungen in den jeweiligen Dimensionen ermöglichen. Zudem wurden in Kapitel 3.4 spezielle Rahmenwerke zur Identifizierung positiver Nachhaltigkeitswirkungen erläutert. Auch wenn in der Bewertung des aktuellen Forschungsstands (Kapitel 4.1.1 und 4.1.3) noch Defizite aufgezeigt werden konnten, bieten die vorgestellten Methoden eine ausreichende Grundlage, um die Nachhaltigkeitswirkungen von Produktsystemen zu erfassen und

diese effektiv in das PIPE-Modell einzubinden. Die Eignung der gewählten Methoden konnte in den Fallstudien bestätigt werden.

### **3.) Wie können (netto-)positive Nachhaltigkeitswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft durch Produktsysteme entstehen?**

Auch die dritte Forschungsfrage konnte bereits in Kapitel 4.3 zum größten Teil beantwortet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Möglichkeiten zur Entstehung positiver Nachhaltigkeitswirkungen identifiziert. Einerseits können inhärente positive Eigenschaften des Produktsystems selbst, wie etwa die Bindung und Dekontamination von Gift- und Schadstoffen aus der Umwelt, zu positiven Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft führen. Andererseits ist es möglich, durch gezielte zusätzliche Maßnahmen mit positiver Wirkung die unvermeidbaren negativen Auswirkungen des Produktsystems zu überkompensieren, sodass eine netto-positive Wirkungsbilanz innerhalb der einzelnen Wirkungskategorien erzielt werden kann (siehe Kapitel 3.4.1). Beide Möglichkeiten sind im PIPE-Modell integriert und in Kapitel 5.3.2 bzw. 5.4.1 näher erläutert. Dabei werden präzise Anforderungen insbesondere an die Kompensationsmaßnahmen formuliert, um deren Effektivität bei der Erzeugung positiver Wirkungen zu sicherzustellen (Tabelle 5-2). Zur vereinfachten Klassifizierung werden die Auswirkungen des Produktsystems mithilfe eines Ampelsystems kategorisiert. Diese Klassifizierung sollte künftig von den beteiligten Fachbereichen überprüft und auf Grundlage wissenschaftlich fundierter Entscheidungen weiterentwickelt werden.

### **4.) Wie lässt sich die Entstehung positiver Nachhaltigkeitswirkungen in den Produktentstehungsprozess integrieren?**

In Kapitel 4.3 konnten bereits Teilaspekte der letzten Forschungsfrage thematisiert werden. Dabei wurde die Notwendigkeit eines neuartigen und übergreifenden Produktentstehungsmodells betont, für das in Kapitel 4.3 entsprechende Anforderungen abgeleitet wurden. Auf Basis dieser Anforderungen wurde das PIPE-Modell entwickelt und in Kapitel 5 vorgestellt. Wie bereits in der Beantwortung der ersten Forschungsfrage erläutert, wird die Zielsetzung der netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen im PIPE-PEP von Beginn an konsequent verfolgt. Dazu werden etablierte Analyse- und Synthesemethoden sowie spezielle Verfahren zur Generierung positiver Wirkungen aus dem aktuellen Stand der Forschung systematisch integriert und iterativ im Rahmen der Optimierungsschleife des PIOL angewendet. Damit wird die Entstehung positiver Nachhaltigkeitswirkungen im PEP schrittweise überprüft und kontinuierlich sichergestellt.

Als **übergreifendes Fazit** lässt sich feststellen, dass die **Forschungsfragen dieser Arbeit weitgehend beantwortet** werden konnten. Durch die Entwicklung und Validierung des PIPE-Modells wurde eine fundierte Grundlage geschaffen, um Produktsysteme mit netto-positiven

Nachhaltigkeitswirkungen systematisch zu gestalten. Die Arbeit zeigt, dass die Integration etablierter Methoden in ein neuartiges Produktentstehungsmodell mit iterativem PEP einen effektiven Ansatz darstellt, um die komplexen Anforderungen der Nachhaltigkeit innerhalb der Produktentstehung gezielt zu adressieren. Die **Zielsetzung dieser Arbeit**, ein Produktentstehungsmodell für Produktsysteme mit netto-positiver Nachhaltigkeitswirkung auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft zu entwickeln (Kapitel 1.2.1), wurde damit **grundsätzlich erreicht**. Gleichzeitig wurden bestehende Limitationen, wie technologische und soziale Herausforderungen, kritisch reflektiert und zukünftige Entwicklungsbedarfe abgeleitet.

Diese Limitationen verdeutlicht auch die abschließende **Bewertung des PIPE-Modells** in Tabelle 7-3, die auf den in Kapitel 4.1 definierten Bewertungskriterien basiert und zur Bewertung des Forschungsstands aus Kapitel 3 herangezogen wurde (siehe Tabelle 4-1, Tabelle 4-2, Tabelle 4-3).

**Tabelle 7-3: Bewertung des PIPE-Modells anhand der Kriterien der Bewertung des Forschungsstands**

Kapitel	Ansatz	Kriterien		Art der Aktivität		Nachhaltigkeitsfokus				Lebenszyklusbetrachtung	Systembetrachtung	Komplexität	Einsetzbarkeit im PEP				Kompensation & PI	
		Analyse	Synthese	ökologisch	sozial	ökonomisch	Kreislauffähigkeit	Phase 1	Phase 2				Phase 3	Phase 4				
5	PIPE-Modell	●	●	●	●	◐	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	◐

● voll erfüllt / hoch    ◐ größtenteils erfüllt    ◑ teilweise erfüllt    ◒ wenig erfüllt    ○ nicht erfüllt / niedrig

In der Bewertung wird deutlich, dass das PIPE-Modell nahezu alle Kriterien voll erfüllt. Aufgrund der fehlenden klaren Zielsetzung für ein ökonomisch nachhaltiges Produktsystem konnte PIPE dieses Kriterium nur im Rahmen des derzeitigen Verständnisses erfüllen. Zudem wird die Komplexität von PIPE als äußerst hoch eingeschätzt. Die Fallstudien der Validierung haben gezeigt, dass eine vollständige Umsetzung des Modells einen hohen Aufwand erfordert. Die erläuterten Limitationen im Bereich der Kompensationsmaßnahmen führen dazu, dass das Kriterium der Kompensationsmaßnahmen und positiven Wirkungen aktuell auch nur größtenteils erfüllt werden kann. Die übrigen Kriterien werden durch die systematische Entwicklung des PIPE-Modells anhand der abgeleiteten Anforderungen im präsentierten Stand des Modells vollständig berücksichtigt.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Das abschließende Kapitel bietet eine Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse dieser Dissertation und einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen des vorgestellten Modells. Unterkapitel 8.1 liefert einen kompakten Überblick über die wichtigsten Erkenntnisse und Ergebnisse der Arbeit. In Kapitel 8.2 werden Perspektiven für die Weiterentwicklung des Modells sowie Ansätze für zukünftige Forschungsarbeiten und die praktische Umsetzung aufgezeigt.

### 8.1 Zusammenfassung der Arbeit

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit der Entwicklung eines umfassenden Modells im Forschungsfeld der *Nachhaltigen Produktentstehung*, dem sogenannten **PIPE-Modell**. Ziel dieses Modells ist es, **Produktsysteme** zu gestalten, die **netto-positive Nachhaltigkeitswirkungen** aufweisen, indem negative Auswirkungen minimiert und positive Effekte in ökologischer, sozialer und ökonomischer Hinsicht aktiv erzeugt werden. Ausgangspunkt der Arbeit war die Identifikation **methodischer und systemischer Defizite in bestehenden Ansätzen der Nachhaltigen Produktentstehung**, insbesondere in Bezug auf die Integration positiver Nachhaltigkeitswirkungen. Die Dissertation verfolgt das Ziel, diese Lücken durch die Entwicklung eines holistischen Modells zu schließen, das sowohl eine fundierte **theoretische Basis als auch eine klare visionäre Ausrichtung** auf positive Beiträge zur Nachhaltigkeit vereint.

Zu Beginn der Arbeit (Kapitel 1) werden die **Ausgangssituation sowie die zentralen Problemstellungen** dargelegt. Es wird verdeutlicht, dass globale Herausforderungen wie das Überschreiten der planetaren Grenzen und eine zunehmende soziale Ungleichheit eine tiefgreifende Transformation unserer Wertschöpfungssysteme erfordern. Die Zielsetzung der Arbeit, des darin präsentierten Modells sowie der damit entwickelten Produktsysteme besteht übergreifend darin, einen **Beitrag zu dieser Transformation und zur nachhaltigen Entwicklung** insgesamt zu leisten. Konkret bedeutet das, ein Produktentstehungsmodell für Produktsysteme mit netto-positiver Nachhaltigkeitswirkung auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft zu entwickeln. Gleichzeitig erfolgt eine inhaltliche Abgrenzung, um den Schwerpunkt der Arbeit auf die **Entwicklung technischer Produkte bzw. Systeme** zu lenken. Ergänzend dazu werden die Forschungsfragen sowie die methodische Vorgehensweise nach DRM näher beschrieben.

In Kapitel 2 werden die **theoretischen Grundlagen** präsentiert, die das Fundament der Arbeit bilden. Zunächst erfolgt eine präzise Definition zentraler Begriffe und Konzepte, getrennt nach den Bereichen Nachhaltigkeit und Produktentstehung. Abschließend werden die wesentlichen Grundlagen im Schnittfeld beider Themengebiete der *Nachhaltigen Produktentstehung* erläutert. Diese Definitionen dienen als einheitlicher Begriffsrahmen für den weiteren Verlauf der Arbeit. Kapitel 3 widmet sich einer umfassenden **Untersuchung des aktuellen Forschungsstands**. Zunächst wird die **historische Entwicklung** des Forschungsgebiets der *Nachhaltigen Produktentstehung* in den vergangenen 65 Jahren aufgearbeitet. Darauf aufbauend werden bestehende **Analysemethoden, Synthesemethoden** sowie Konzepte zur Erzeugung und Bewertung **positiver**

**Nachhaltigkeitswirkungen** vorgestellt. Dies erfolgt jeweils mit Fokus auf die ökologischen, sozialen und ökonomischen Aspekte sowie auf die der Kreislaufwirtschaft. Zudem werden in jedem Bereich des Forschungsstands ganzheitliche Ansätze erläutert, die die zuvor genannten vier Aspekte integriert berücksichtigen.

Das vierte Kapitel **bewertet die bestehenden Ansätze** des vorgestellten Forschungsstands und **identifiziert die Defizite** in den Bereichen Analyse, Synthese und positive Nachhaltigkeitswirkungen. Die Bewertung zeigt, dass trotz zahlreicher bestehender Ansätze oftmals ein ganzheitlicher und integrierender Blickwinkel fehlt, um die komplexen Anforderungen der *Nachhaltigen Produktentstehung* umfassend zu adressieren. Zudem wird festgestellt, dass die Berücksichtigung der Entstehung von (netto-)positiven Wirkungen in den jeweiligen Wirkungskategorien der drei Nachhaltigkeitsdimensionen bislang nur unzureichend erfolgt. Auf Grundlage dieser und weiterer Defizite wird ein entsprechender **Handlungsbedarf** abgeleitet. Hierfür werden konkrete **Anforderungen** definiert, die als Grundlage für die Entwicklung des PIPE-Produktentstehungsmodells dienen.

In Kapitel 5 wird folglich das zentrale **Produktentstehungsmodell** dieser Arbeit vorgestellt. Nach der Einordnung des Modells und der Erläuterung der systematischen Vorgehensweise bei dessen Herleitung, erfolgt ein Überblick über den Aufbau und die Bestandteile des Produktentstehungsmodells. Die **drei zentralen Elemente** des Modells sind **das PIPS, der PIPE-PEP und der PIOL**, die jeweils einzeln vorgestellt werden. Das **PIPS** definiert das Entwicklungsziel der Produktentstehung in Form eines Produktsystems mit netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen, die zum einen durch inhärente positive Effekte des Produktsystems selbst oder durch zusätzliche Kompensationsmaßnahmen realisiert werden können. Der **PIPE-PEP** ist ein neuartiger Entstehungsprozess, der, unterteilt in vier Phasen systematisch bei der Generierung eines PIPS unterstützen soll. Innerhalb dieses Prozesses wird der **PIOL** eingesetzt, um die verschiedenen Analyse- und Synthesemethoden iterativ zu kombinieren. Durch die Anwendung von Analysemethoden erfolgt die Untersuchung der ökologischen, sozialen, ökonomischen und Kreislauffähigkeitsaspekte des Produktsystems. Die Methoden werden nicht nur isoliert verwendet, sondern sind im PIPE-PEP so integriert, dass die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Dimensionen der Nachhaltigkeit berücksichtigt werden. Durch die wiederholte Anwendung gemeinsam mit Synthesemethoden wird eine schrittweise Verbesserung der Nachhaltigkeitswirkungen angestrebt, wobei kontinuierlich Rückkopplungsschleifen zur konstruktiven Produktentstehung im Rahmen der Basisaktivitäten des PEP genutzt werden.

Kapitel 6 widmet sich der **Validierung** des PIPE-Modells anhand zweier Fallstudien: der Entwicklung eines **PI-Kinderlaufrades** und eines **PI-e-Bikes**. Diese beispielhaften Anwendungen liefern wertvolle Erkenntnisse zur Anwendbarkeit und Weiterentwicklung des Modells. Die Fallstudie zum PI-Kinderlaufrad demonstriert die erfolgreiche Anwendung des PIPE-Modells für die Entwicklung eines technischen Produktsystems. Dabei erzielt die iterative Kombination von Analyse- und Synthesemethoden innerhalb des PIPE-PEP systematisch die geforderten Ergebnisse und erfüllt die methodischen Anforderungen an den PEP weitgehend. Die vollständige Realisierung

eines netto-positiven Produktsystems bleibt jedoch im Rahmen der theoretischen Fallstudie aus. **Einschränkungen** ergeben sich zum einen aus der modellhaften Abschätzung der Nachhaltigkeitswirkungen, da keine Daten eines realen Produktsystems vorliegen. Zum anderen lassen sich nicht alle negativen Auswirkungen, für die keine Möglichkeit zur Kompensation besteht, vollständig vermeiden. Dennoch bietet die Fallstudie die Möglichkeit, **notwendige technologische Entwicklungen** zu identifizieren, die zukünftig eine vollständige Vermeidung negativer Auswirkungen ermöglichen könnten. Trotz dieser Limitationen validiert die Fallstudie das PIPE-Modell als **vielversprechende Grundlage für die Entwicklung netto-positiver Produktsysteme**. Die Fallstudie zum PI-e-Bike verdeutlicht die **Grenzen des PIPE-Modells bei komplexen technischen Systemen**. Herausforderungen wie intransparente Lieferketten mit sozialen Risiken, der Einsatz kritischer Rohstoffe und die hohe Energieintensität verhindern die vollständige Entwicklung eines netto-positiven Produktsystems. Positiv hervorzuheben ist, dass potenziell nicht kompensierbare negative Auswirkungen bereits in der ersten Phase des PEP identifiziert werden, was eine frühzeitige Beendigung des Entwicklungsprozesses ermöglicht und damit Ressourcen schont. Die Erkenntnisse aus den Fallstudien bilden eine essenzielle Basis für die Diskussion und Weiterentwicklung des Modells.

Die **Diskussion und kritische Reflexion** des Modells und seiner Anwendung in den Fallstudien erfolgen in Kapitel 7. Hier wird dargelegt, inwiefern das PIPE-Modell die im Handlungsbedarf formulierten **Anforderungen erfüllt** und welchen Mehrwert es für die *Nachhaltige Produktentstehung* bietet. Gleichzeitig werden **bestehende Limitationen und notwendige Weiterentwicklungen** identifiziert, die sowohl das Modell selbst als auch die erforderlichen Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Umsetzung betreffen. Zu diesen Rahmenbedingungen zählen unter anderem der Ausbau der Kreislaufwirtschaft oder nachhaltiger Energieformen. Abschließend werden die Forschungsfragen beantwortet, um das Forschungsvorhaben zu evaluieren und die wesentlichen Ergebnisse zusammenzufassen.

Insgesamt leistet die Arbeit einen Beitrag zur *Nachhaltigen Produktentstehung*, indem sie ein ganzheitliches Modell präsentiert, das über bestehende Ansätze hinausgeht und diese gleichzeitig systematisch integriert. Das PIPE-Modell bietet durch die systematische Berücksichtigung positiver Nachhaltigkeitswirkungen sowie die Integration iterativer Optimierungsschleifen einen innovativen Ansatz für die Gestaltung nachhaltiger Produkte. Es bildet somit eine wertvolle Grundlage für die Transformation hin zu nachhaltigen Wertschöpfungssystemen und zeigt gleichzeitig noch Entwicklungspotenziale auf, die im abschließenden Ausblick (Kapitel 8.2) behandelt werden.

## 8.2 Ausblick

Der finale Abschnitt dieser Arbeit soll einen **Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen** bieten. Durch die Entwicklung des Modells mittels Backcasting als eine erstrebenswerte zukünftige Form der *Nachhaltigen Produktentstehung*, bestehen vielseitige Anknüpfungspunkte zur weiteren Evolution des präsentierten Ansatzes. Zur besseren Übersicht werden diese nach notwendigen

**systemischen Transformationen, modellbezogenen Weiterentwicklungen und nach Möglichkeiten zur vereinfachten Anwendung des Modells** unterschieden.

Die notwendigen **systemischen Entwicklungen** zur Schaffung der essenziellen Voraussetzungen und Rahmenbedingungen für die erfolgreiche Anwendung und Realisierung des PIPE-Modells wurden bereits in Kapitel 7.2 im Rahmen der Diskussion thematisiert. Der überwiegende Teil dieser Entwicklungen trägt über den positiven Effekt auf die Umsetzbarkeit des PIPE-Modells hinaus zur nachhaltigen Entwicklung bei und unterstützt somit das Erreichen der 17 Nachhaltigkeitsziele (Abbildung 1-2). Dazu gehören unter anderem der umfassende Ausbau einer **Kreislaufwirtschaft** oder die Entwicklung innovativer, **nachhaltiger Technologien** in Schlüsselbereichen wie der Energieversorgung oder der industriellen Produktion. Bis die Transformation auf nachhaltige Technologien erfolgt, kann die Weiterentwicklung und der Ausbau von effektiven und wirkungsgerechten **Kompensationsmaßnahmen** (vgl. Tabelle 5-2) dabei unterstützen, unvermeidbaren negativen Auswirkungen entgegenzuwirken. Der Ausbau dieser Maßnahmen ist insbesondere für das Erreichen einer netto-positiven Wirkungsbilanz in PIPE essenziell. Die systemischen Entwicklungen stellen, unabhängig vom PIPE-Modell, komplexe Herausforderungen auf allen Ebenen dar, die nur durch koordinierte Anstrengungen auf globaler Ebene bewältigt werden können. Eine effektive Bewältigung erfordert die Zusammenarbeit und den aktiven Beitrag aller relevanten Akteure aus Politik, Forschung, Wirtschaft und Gesellschaft.

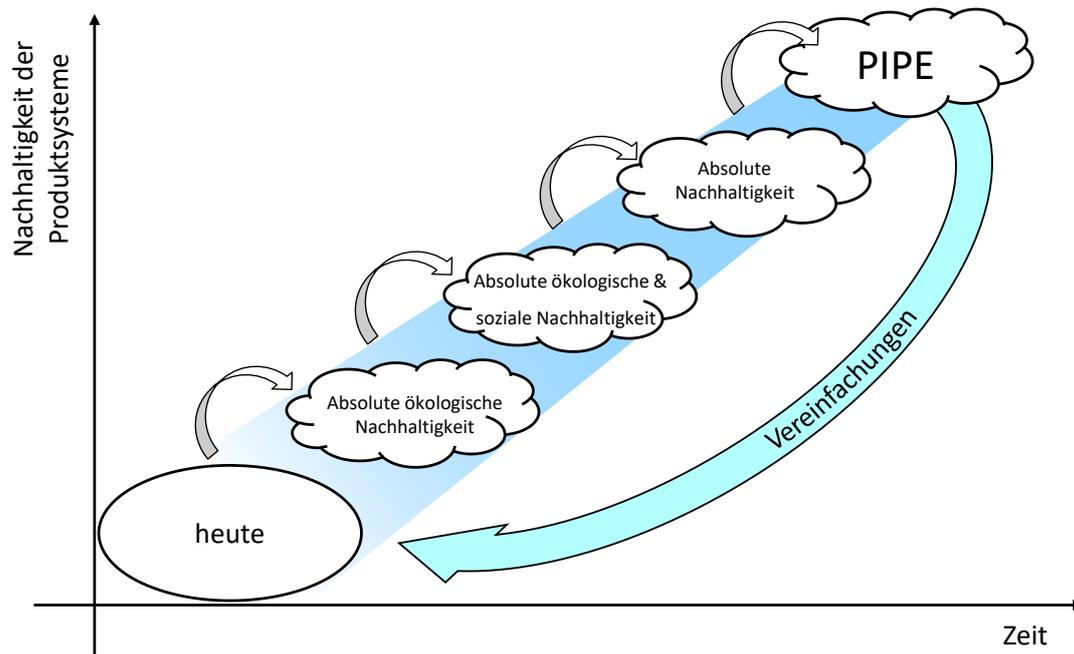
Neben den erforderlichen systemischen Entwicklungen bietet das präsentierte PIPE-Modell selbst ebenfalls vielseitige **Anknüpfungspunkte für eine Weiterentwicklung**. Zunächst bietet der Ausgangspunkt des PIPE-PEP, also die Entwicklungsaufgabe bzw. die Problemstellung, einen möglichen Bereich zur Erweiterung des Modells. Um sich von bestehenden, nicht nachhaltigen Lösungen und Technologien loslösen zu können, ist es sinnvoll, eine Abstraktion vorzunehmen und die **zugrunde liegenden Probleme und Aufgaben gezielt zu hinterfragen**, wie unter anderem von Mohnke et al. [MoMV24] vorgeschlagen. Besonders relevant erscheint in diesem Zusammenhang die **Integration der Kundensicht**, um die tatsächlichen und grundlegenden Bedürfnisse präzise identifizieren zu können. Ein bedeutendes Potenzial zur Reduzierung negativer Nachhaltigkeitswirkungen könnte darin liegen, Produkte im Sinne der **Suffizienz** so zu gestalten, dass sie vorrangig die **grundlegenden Bedürfnisse** decken, anstatt komplexe Lösungen zu entwickeln, die künstlich geschaffene Bedürfnisse mit einem hohen Ressourceneinsatz befriedigen. Eine weitere Möglichkeit liegt in der **Erweiterung und Spezialisierung der Methodensammlung**. Durch die Entwicklung des PIPE-Modells, in das zahlreiche bestehende Methoden integriert wurden, konnte bereits ein wesentlicher Teil der in Kapitel 4.1 identifizierten Defizite durch die neuartige Vorgehensweise und die Kombination aus Synthese und Analyse adressiert werden. Dennoch ergibt sich insbesondere durch die Anpassung der Methoden an den Einsatz im PIOL zusätzlicher Handlungsbedarf hinsichtlich der Methoden selbst. Deren Anpassung könnte die Präzision und Anwendbarkeit des Modells in unterschiedlichen Kontexten weiter verbessern. Ein Potenzial zur **Verbesserung der Datenqualität** besteht insbesondere bei den Analysemethoden, wenn in Produktsystemen gezielt nachhaltige Technologien eingesetzt werden. In solchen Fällen treten in

der Regel deutlich geringere negative Wirkungen auf, was dazu führt, dass die Modellierung auf Basis nationaler oder regionaler Durchschnittswerte häufig erhebliche Abweichungen von den tatsächlich auftretenden Werten aufweist. Um die Aussagekraft und Präzision der Analysen zu erhöhen, ist daher eine stärkere Berücksichtigung spezifischer Daten der nachhaltigen Technologien erforderlich. Der **Aufbau einer PIPE-Datenbank**, die Materialien, Fertigungs-, Recycling- und Transportprozesse sowie Kompensationsmaßnahmen umfasst, die den Anforderungen des PIPE-Modells entsprechen, könnte ebenfalls eine potenzielle Erweiterung darstellen. Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Weiterentwicklung des PIPE-Modells ist die **Förderung der interdisziplinären Zusammenarbeit**. Dies könnte durch die Einbindung von Experten aus verschiedenen Fachbereichen sowie durch weiterführende Forschung zu den Schnittfeldern zwischen *Nachhaltiger Produktentstehung* und anderen Disziplinen wie Biologie, Geologie oder Medizin erreicht werden. Diese Erweiterung würde das Modell auf eine breitere Wissensbasis stützen und damit neue Perspektiven für fundiertere Entscheidungen erschließen. Zusätzlich wäre eine **Vereinfachung der Entscheidungsfindung** von Vorteil, beispielsweise durch das Erkennen von Wechselwirkungen zwischen Nachhaltigkeitsaspekten und konstruktiven Entscheidungen, zum Beispiel mithilfe von Graph-Datenbanken, wie von Schweitzer et al. [SMBV22] vorgestellt. Solche Technologien könnten helfen, komplexe Zusammenhänge visuell darzustellen und die Entscheidungsprozesse im PIPE-PEP einfacher und nachvollziehbarer zu gestalten. Außerdem könnte das PIPE-Modell um ein **Phasenmodell zur zeitlichen Ablaufplanung** erweitert werden, wodurch die einzelnen Schritte der Produktentstehung noch effizienter geplant werden könnten. Eine solche Erweiterung würde nicht nur die praktische Planung und Anwendung des Modells erleichtern, sondern auch eine präzisere Strukturierung der verschiedenen Entwicklungsphasen sowie der interdisziplinären Zusammenarbeit ermöglichen, insbesondere im komplexen Kontext industrieller Anwendungen.

Übergreifend ist die **Erweiterung durch weitere Fallstudien** und das **Aufzeigen guter Praxis** anhand von Produktbeispielen von zentraler Bedeutung, um die Anwendung des Modells in unterschiedlichen Kontexten zu veranschaulichen und seine Praxistauglichkeit weiter zu verbessern. Zudem könnte die **Übertragbarkeit des Modells auf andere Branchen**, wie die Textilindustrie oder den Gebäudesektor, untersucht werden, um Erkenntnisse über seine Anpassungsfähigkeit zu gewinnen und den visionären Ansatz auch in diesen Bereichen nutzbar zu machen.

Die Fallstudien haben gezeigt, dass die vollständige Umsetzung der ambitionierten Zielsetzung, ein netto-positives Produktsystem zu entwickeln, welche aus der Herleitung von PIPE mittels Backcasting (siehe Kapitel 5.1) entstanden ist, unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen nicht einfach realisierbar ist. Um dennoch weitere Fallstudien mit dem PIPE-Modell durchführen zu können, bieten sich verschiedene **Vereinfachungen des Modells** oder der Anforderungen daran an. Diese Simplifizierungen des anspruchsvollen Produktentstehungsmodells ermöglichen es, PIPE in einer reduzierten Form zeitnah anzuwenden. Wie in Abbildung 8-1 dargestellt, können diese Vereinfachungen im Rahmen der zukünftigen Weiterentwicklung des Modells schrittweise

zurückgenommen werden, wodurch langfristig eine vollständige Umsetzbarkeit des PIPE-Modells erreicht werden könnte.



**Abbildung 8-1: Vereinfachungsansätze und Möglichkeiten zur schrittweisen Umsetzung der Backcasting-Vision von PIPE**

Die Anknüpfungspunkte für Vereinfachungen sind bei einem umfassenden Produktentstehungsmodell wie PIPE äußerst vielseitig, führen jedoch zunächst zu einer geringeren Nachhaltigkeit der auf diese Weise realisierten Produktsysteme. Eine naheliegende Herangehensweise wäre, PIPE gezielt für die **Entwicklung technisch einfacher Produkte** einzusetzen, die nur aus einem oder wenigen Materialien bestehen und wenige Prozessschritte erfordern. Dadurch würde die Komplexität des entsprechenden Produktsystems reduziert, wodurch negative Auswirkungen leichter erfasst und gezielt kompensiert werden könnten, was die Erreichbarkeit einer Netto-Positivität erleichtert.

Eine weitere Möglichkeit bestünde darin, den ganzheitlichen **Nachhaltigkeitsfokus des Modells zu reduzieren** und die Anforderung der Netto-Positivität zunächst nur auf eine einzelne Nachhaltigkeitsdimension zu beschränken. Innerhalb dieser Dimension könnte der Fokus weiter eingegrenzt werden, indem nur spezifische Aspekte oder Wirkungskategorien betrachtet werden. Anschließend könnte der Fokus, angelehnt an den „Tiered approach“ von Neugebauer et al. [Neug16, NMSF15], sukzessive erweitert werden, um schrittweise eine ganzheitlichere Perspektive einzunehmen.

Eine der zentralen Anforderungen innerhalb des PIPE-Modells, die dessen Umsetzbarkeit derzeit einschränken, ist die **strikte Vermeidung nicht kompensierbarer negativer Auswirkungen**. Eine Lockerung dieser ambitionierten Vorgabe könnte die Anwendung des Modells erheblich vereinfachen. Ein vielversprechender Ansatz in diesem Zusammenhang ist das **Konzept der absoluten Nachhaltigkeit** (siehe Kapitel 2.3.2). Statt die ambitionierte Zielsetzung netto-positiver

Wirkungen ganzheitlich zu verfolgen, zielt beispielsweise die absolute ökologische Nachhaltigkeit darauf ab die negativen Umweltauswirkungen innerhalb eines Rahmens zu halten, der die planetaren Grenzen respektiert und die Regenerationsfähigkeit unseres Planeten nicht übersteigt. Wie in Abbildung 8-1 dargestellt, könnte die Umsetzung des PIPE-Modells mit der vereinfachten Zielsetzung, die **ökologischen Auswirkungen innerhalb dieser planetaren Grenzen** zu halten, einen sinnvollen ersten Schritt darstellen. Aufbauend darauf könnte die soziale Dimension sukzessive integriert werden, um schließlich eine ganzheitliche Perspektive der absoluten Nachhaltigkeit von Produktsystemen einzunehmen. Der letzte Schritt besteht in der Erreichung von Produktsystemen mit netto-positiven Nachhaltigkeitswirkungen, die sogar bestehende Schäden mildern, und damit aktiv zur nachhaltigen Entwicklung in den Bereichen Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft beitragen.



**Literaturverzeichnis**

- [AABR08] ABELE, E. ; ANDERL, R. ; BIRKHOFFER, H. ; RÜTTINGER, B. (Hrsg.): EcoDesign: von der Theorie in die Praxis. Berlin : Springer, 2008 — ISBN 978-3-540-75437-4
- [ABVV21] ASHBY, MIKE ; BRECHBÜHL, ELIANE ; VAKHITOVA, TATIANA ; VALLEJO, ALICIA: Granta EduPack White Paper Social Life-Cycle Assessment and Social Impact Audit Tool : ANSYS, Inc., 2021
- [Acke18] ACKERMANN, LAURA: Design for Product Care: Enhancing Consumers' Repair and Maintenance Activities. In: The Design Journal Bd. 21, Nr. 4, S. 543–551, 2018
- [AFLS21] ALBRECHT, S. ; FISCHER, M. ; LEISTNER, P. ; SCHEBEK, L. (Hrsg.): Progress in Life Cycle Assessment 2019, Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management. Cham : Springer International Publishing, 2021 — ISBN 978-3-030-50518-9
- [Ahre16] AHREND, KLAUS-MICHAEL: Geschäftsmodell Nachhaltigkeit : Springer Berlin Heidelberg, 2016 — ISBN 978-3-662-52879-2
- [AHTS20] ALVARENGA, R.A.F. ; HUYSVELD, S. ; TAELEMAN, S.E. ; SFEZ, S. ; PRÉAT, N. ; COOREMAN-ALGOED, M. ; SANJUAN-DELMÁS, D. ; DEWULF, J.: A framework for using the handprint concept in attributional life cycle (sustainability) assessment. In: Journal of Cleaner Production Bd. 265, S. 121743, 2020
- [AHWB18] ALBERS, ALBERT ; HEIMICKE, JONAS ; WALTER, BENJAMIN ; BASEDOW, GUSTAV NILS ; REIB, NICOLAS ; HEITGER, NICOLAS ; OTT, SASCHA ; BURSAC, NIKOLA: Product Profiles: Modelling customer benefits as a foundation to bring inventions to innovations. In: Procedia CIRP Bd. 70, S. 253–258, 2018
- [AHWG24] ALI, ABDUR-RAHMAN ; HAUPT, JOHANNA ; WERRA, MARVIN ; GERNUKS, STELLA ; WIEGEL, MARCEL ; RUEGGEBERG, MARC ; CERDAS, FELIPE ; HERRMANN, CHRISTOPH: Life cycle assessment of carbon dioxide removal and utilisation strategies: Comparative analysis across Europe. In: Resources, Conservation and Recycling Bd. 211, S. 107837, 2024
- [AiLB15] AIAMA D., EDWARDS S., BOS G., EKSTROM J., KRUEGER ; L., QUÉTIER F., SAVY C., SEMROC B., SNEARY M. AND ; BENNUN L.: No Net Loss and Net Positive Impact Approaches for Biodiversity: exploring the potential application of these approaches in the commercial agriculture and forestry sectors. Gland, Switzerland: IUCN. XX pp, 2015 — ISBN 978-2-8317-1718-0
- [Akao04] AKAO, YOJI: Quality function deployment: integrating customer requirements into product design. Cambridge, Mass : Productivity Press, 2004 — ISBN 978-1-56327-313-1
- [AKSB20] ALAMEREW, YOHANNES A. ; KAMBANOU, MARIANNA LENA ; SAKAO, TOMOHIKO ; BRISSAUD, DANIEL: A Multi-Criteria Evaluation Method of Product-Level Circularity Strategies. In: Sustainability Bd. 12, Nr. 12, S. 5129, 2020
- [Akti24] AKTION MENSCH: Förderprojekte - Stark für Inklusion. URL <https://www.aktion-mensch.de/dafuer-stehen-wir/das-bewirken-wir/foerderprojekte>. - abgerufen am 31.07.2024 — <https://www.aktion-mensch.de/>
- [Albe19] ALBERT, MARTIN: Sustainable frugal innovation - The connection between frugal innovation and sustainability. In: Journal of Cleaner Production Bd. 237, S. 117747, 2019
- [AlJø93] ALTING, D. LEO ; JØRGENSEN, D. JØRGEN: The Life Cycle Concept as a Basis for Sustainable Industrial Production. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology Bd. 42, Nr. 1, S. 163–167, 1993
- [Alli19] ALLIANCE FOR WATER STEWARDSHIP: INTERNATIONAL WATER STEWARDSHIP STANDARD - VERSION 2.0. URL [https://a4ws.org/wp-content/uploads/2019/03/AWS\\_Standard\\_2.0\\_2019\\_Final.pdf](https://a4ws.org/wp-content/uploads/2019/03/AWS_Standard_2.0_2019_Final.pdf). - abgerufen am 29.07.2024

- [AIMB21] ALEJANDRINO, CLARISA ; MERCANTE, IRMA ; BOVEA, MARÍA D.: Life cycle sustainability assessment: Lessons learned from case studies. In: Environmental Impact Assessment Review Bd. 87, S. 106517, 2021
- [ALSK19] ANDES, LISA ; LÜTZKENDORF, THOMAS ; STRÖBELE, BENJAMIN ; KOPFMÜLLER, JÜRGEN ; RÖSCH, CHRISTINE: Methodensammlung zur Nachhaltigkeitsbewertung. Karlsruhe : Karlsruher Institut für Technologie - KIT, 2019
- [Alti95] ALTING, LEO: Life Cycle Engineering and Design, 1995
- [Andr21] ANDRES, TOBIAS: Übersicht über Cradle to Cradle (C2C) und Marktrecherche als Vorbereitung auf die Entwicklung eines nachhaltigen C2C-Kinderlaufrades (Masterseminar). Saarbrücken : Universität des Saarlandes, 2021
- [Andr22] ANDRES, TOBIAS: Konstruktion eines Positive-Impact-Kinderlaufrades (Masterarbeit). Saarbrücken : Universität des Saarlandes, 2022
- [ANNJ14] A ALBERS ; N REIß ; N BURSAC ; J URBANEC ; R LÜDCKE: Situation-appropriate method selection in product development process – empirical study of method application. In: NordDesign, 2014
- [Ansy20] ANSYS, INC.: Ansys GRANTA EduPack software.
- [ARBR16] ALBERS, ALBERT ; REISS, NICOLAS ; BURSAC, NIKOLA ; RICHTER, THILO: iPeM – Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering. In: Procedia CIRP Bd. 50, S. 100–105, 2016
- [Arce24] ARCELORMITTAL CONSTRUCTION DEUTSCHLAND: XCarb (R) - Auf dem Weg zum klimaneutralen Stahl. URL <https://constructalia.arcelormittal.com/de/themen/xcarb>. - abgerufen am 31.10.2024
- [Ärzt24] ÄRZTE OHNE GRENZEN E.V.: Ärzte ohne Grenzen | Internationale Hilfsorganisation. URL <https://www.aerzte-ohne-grenzen.de/>. - abgerufen am 31.07.2024
- [Atti16] ATTIA, SHADY: Towards regenerative and positive impact architecture: A comparison of two net zero energy buildings. In: Sustainable Cities and Society Bd. 26, S. 393–406, 2016
- [AWTW18] AHMAD, SHAMRAIZ ; WONG, KUAN YEW ; TSENG, MING LANG ; WONG, WAI PENG: Sustainable product design and development: A review of tools, applications and research prospects. In: Resources, Conservation and Recycling Bd. 132, S. 49–61, 2018
- [BaBS13] BASU, RADHA ; BANERJEE, PREETA ; SWEENEY, ELIZABETH: Frugal Innovation: Core Competencies to Address Global Sustainability. In: Journal of Management for Global Sustainability Bd. 1, Nr. 2, S. 63–82, 2013
- [Bach13] BACHMANN, TILL M.: Towards life cycle sustainability assessment: drawing on the NEEDS project's total cost and multi-criteria decision analysis ranking methods. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 18, Nr. 9, S. 1698–1709, 2013
- [BaHH09] BAYON, RICARDO ; HAWN, AMANDA ; HAMILTON, KATHERINE: Voluntary carbon markets: an international business guide to what they are and how they work. 2. ed. London : Earthscan, 2009 — ISBN 9786612170720
- [BaKL24] BARTELS, LARA ; KESTERNICH, MARTIN ; LÖSCHEL, ANDREAS: The Demand for Voluntary Carbon Dioxide Removal: Experimental Evidence from an Afforestation Project in Germany. In: Land Economics, S. 070523-0060R1, 2024
- [Baye21] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT: Infoblatt Ozon - Lufthygienisches Landesüberwachungssystem Bayern (LÜB). URL <https://www.lfu.bayern.de/luft/doc/ozoninfo.pdf>. - abgerufen am 26.07.2024. — LfU, Referat 24
- [BBCF23] BALMFORD, ANDREW ; BRANCALION, PEDRO H. S. ; COOMES, DAVID ; FILEWOD, BEN ; GROOM, BEN ; GUIZAR-COUTIÑO, ALEJANDRO ; JONES, JULIA P. G. ; KESHAV, SRINIVASAN ; U. A.: Credit credibility threatens forests. In: Science Bd. 380, Nr. 6644, S. 466–467, 2023

- [BBKD23] BOCKEN, NANCY ; BALDASSARRE, BRIAN ; KESKIN, DUYGU ; DIEHL, JAN CAREL: Design Thinking Tools to Catalyse Sustainable Circular Innovation. In: LEHTIMÄKI, H. ; AARIKKA-STENROOS, L. ; JOKINEN, A. ; JOKINEN, P.: The Routledge Handbook of Catalysts for a Sustainable Circular Economy. 1. Aufl. London : Routledge, 2023 — ISBN 978-1-00-326749-2, S. 359–387
- [BDBV16] BOCKEN, NANCY M. P. ; DE PAUW, INGRID ; BAKKER, CONNY ; VAN DER GRINTEN, BRAM: Product design and business model strategies for a circular economy. In: Journal of Industrial and Production Engineering Bd. 33, Nr. 5, S. 308–320, 2016
- [BDOV15] BJØRN, ANDERS ; DIAMOND, MIRIAM ; OWSIANIAK, MIKOŁAJ ; VERZAT, BENOÎT ; HAUSCHILD, MICHAEL ZWICKY: Strengthening the Link between Life Cycle Assessment and Indicators for Absolute Sustainability To Support Development within Planetary Boundaries. In: Environmental Science & Technology Bd. 49, Nr. 11, S. 6370–6371, 2015
- [BeBW20] BEEMSTERBOER, SJOUBE ; BAUMANN, HENRIKKE ; WALLBAUM, HOLGER: Ways to get work done: a review and systematisation of simplification practices in the LCA literature. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 25, Nr. 11, S. 2154–2168, 2020
- [BEEG19] BECKMANN, JANPETER ; EBERLE, ULRIKE ; EISENHAEUER, PATRICK ; GEßNER, CHRISTIAN ; HAHN, RÜDIGER ; HERMANN, CHRISTOPH ; KÜHNEN, MICHAEL ; SCHALTEGGER, STEFAN ; U. A.: Der Handabdruck: ein komplementäres Maß positiver Nachhaltigkeitswirkung von Produkten - Inhaltlicher Abschlussbericht, 2019
- [BEEH17] BECKMANN, JANPETER ; EBERLE, ULRIKE ; EISENHAEUER, PATRICK ; HAHN, RÜDIGER ; HERMANN, CHRISTOPH ; KÜHNEN, MICHAEL ; SCHALTEGGER, STEFAN ; SCHMID, MARIANNE ; U. A.: Der Handabdruck: Ein Ansatz zur Messung positiver Nachhaltigkeitswirkungen von Produkten. Stand und Ausblick. – Arbeitspapier Nr. 2 im Rahmen des Projekts „Der Handabdruck: Ein komplementäres Maß positiver Nachhaltigkeitswirkung von Produkten“ : Lüneburg: Verein CSM e.V., 2017
- [BeGe21] BENDER, B. ; GERICKE, K. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2021 — ISBN 978-3-662-57302-0
- [BeGK18] BEHRENDT, SIEGFRIED ; GÖLL, EDGAR ; KORTE, FRIEDERIKE: Effizienz, Konsistenz, Suffizienz: strategieanalytische Betrachtung für eine Green Economy, IZT-Text. Berlin : IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH, 2018 — ISBN 978-3-941374-35-5
- [BFHH22] BADGLEY, GRAYSON ; FREEMAN, JEREMY ; HAMMAN, JOSEPH J. ; HAYA, BARBARA ; TRUGMAN, ANNA T. ; ANDEREGG, WILLIAM R. L. ; CULLENWARD, DANNY: Systematic over-crediting in California’s forest carbon offsets program. In: Global Change Biology Bd. 28, Nr. 4, S. 1433–1445, 2022
- [BFMK17] BERGER, MARKUS ; FINKBEINER, MATTHIAS ; MARKARD, CHRISTIANE ; KIRSCHBAUM, BERND ; ANGRICK, MICHAEL ; BUSSE, LILIAN ; LANGNER, MARCEL ; MÜSCHEN, KLAUS ; U. A.: Vereinfachte Umweltbewertung des Umweltbundesamtes (VERUM 2.0), S. 101, 2017
- [BFSV23] BIANCHI, IACOPO ; FORCELLESE, ARCHIMEDE ; SIMONCINI, MICHELA ; VITA, ALESSIO: Mechanical characterization and sustainability assessment of recycled EVA for footwears. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Bd. 126, Nr. 7–8, S. 3149–3160, 2023
- [BFTB24] BORCHERS, MALGORZATA ; FÖRSTER, JOHANNES ; THRÄN, DANIELA ; BECK, SILKE ; THONI, TERESE ; KORTE, KLAAS ; GAWEL, ERIK ; MARKUS, TILL ; U. A.: A Comprehensive Assessment of Carbon Dioxide Removal Options for Germany. In: Earth’s Future Bd. 12, Nr. 5, S. e2023EF003986, 2024

- [BGFH24] BORGMANN, MIRIAM ; GIERDS, JÖRN ; FISCHEDICK, MANFRED ; HENNING, HANS-MARTIN ; MATTHIES, ELLEN ; PITTEL, KAREN ; RENN, JÜRGEN ; SAUER, DIRK UWE ; U. A.: What Is the Voluntary Carbon Market – and What Contribution Does It Make to Climate Action? Discussion Paper of the Academies’ Project “Energy Systems of the Future” : Series on “Energy Systems of the Future” (ESYS), 2024
- [BHBL17] BUCHERT, TOM ; HALSTENBERG, FRIEDRICH A. ; BONVOISIN, JÉRÉMY ; LINDOW, KAI ; STARK, RAINER: Target-driven selection and scheduling of methods for sustainable product development. In: Journal of Cleaner Production Bd. 161, S. 403–421, 2017
- [BhHM03] BHANDER, GURBAKHASH SINGH ; HAUSCHILD, MICHAEL ; MCALOONE, TIM: Implementing life cycle assessment in product development. In: Environmental Progress Bd. 22, Nr. 4, S. 255–267, 2003
- [BHHZ15] BAKKER, CONNY ; HOLLANDER, MARCEL DEN ; HINTE, ED VAN ; ZIJLSTRA, YVO: Products that last: product design for circular business models. 2nd edition. Delft : TU Delft Library, 2015 — ISBN 978-94-6186-386-7
- [BhLo08] BHAMRA, TRACY ; LOFTHOUSE, VICKY: Design for sustainability: a practical approach, Design for social responsibility series. Repr. Aldershot : Gower, 2008 — ISBN 978-0-566-08704-2
- [BhLT11] BHAMRA, TRACY ; LILLEY, DEBRA ; TANG, TANG: Design for Sustainable Behaviour: Using Products to Change Consumer Behaviour. In: The Design Journal Bd. 14, Nr. 4, S. 427–445, 2011
- [BiDB13] BIEMER, JON ; DIXON, WILLOW ; BLACKBURN, NATALIA: Our environmental handprint: The good we do. In: 2013 1st IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech). Portland, OR, USA : IEEE, 2013 — ISBN 978-1-4673-4630-6, S. 146–153
- [BiKn16] BIRKELAND, JANIS ; KNIGHT-LENIHAN, STEPHEN: Biodiversity offsetting and net positive design. In: Journal of Urban Design Bd. 21, Nr. 1, S. 50–66, 2016
- [Bioö24] BIOÖKONOMIE REVIER: Hybride Flächennutzung. URL [https://www.biooekonomierevier.de/lw\\_resource/datapool/systemfiles/elements/files/1286203a-df05-11eb-9b9d-dead53a91d31/live/document/Hybride\\_Fl%C3%A4chennutzung.pdf](https://www.biooekonomierevier.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/1286203a-df05-11eb-9b9d-dead53a91d31/live/document/Hybride_Fl%C3%A4chennutzung.pdf). - abgerufen am 29.07.2024 — Flächennutzung und Bioökonomie
- [Birk02] BIRKELAND, JANIS: Design for sustainability: a sourcebook of integrated eco-logical solutions. Repr. London : Earthscan, 2002 — ISBN 978-1-85383-897-2
- [Birk08] BIRKELAND, JANIS: Positive development: from vicious circles to virtuous cycles through built environment design. London : Earthscan, 2008 — ISBN 978-1-84407-579-9
- [Birk18] BIRKELAND, JANIS: Eco-positive design: Moving beyond ecological restoration : research-features.com, 2018
- [Birk20] BIRKELAND, JANIS: Net-Positive Design and Sustainable Urban Development. 1. Aufl. : Routledge, 2020 — ISBN 978-0-429-29021-3
- [Birk22] BIRKELAND, JANIS: Nature Positive: Interrogating Sustainable Design Frameworks for Their Potential to Deliver Eco-Positive Outcomes. In: Urban Science Bd. 6, Nr. 2, S. 35, 2022
- [BKHL14] BUCHERT, TOM ; KALUZA, ALEXANDER ; HALSTENBERG, FRIEDRICH A. ; LINDOW, KAI ; HAYKA, HAYGAZUN ; STARK, RAINER: Enabling Product Development Engineers to Select and Combine Methods for Sustainable Design. In: Procedia CIRP Bd. 15, S. 413–418, 2014
- [BICH09] BLESSING, LUCIENNE T.M. ; CHAKRABARTI, AMARESH: DRM, a Design Research Methodology. London : Springer London, 2009 — ISBN 978-1-84882-586-4
- [BIFa06] BLANCHARD, BENJAMIN S. ; FABRYCKY, WOLTER J.: Systems engineering and analysis, Prentice-Hall international series in industrial and systems engineering. 4. ed. Upper Saddle River, NJ : Pearson Prentice Hall, 2006 — ISBN 978-0-13-186977-6

- [Bmzb23] BMZ - BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT UND ENTWICKLUNG: Nachhaltigkeit (nachhaltige Entwicklung). URL <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/nachhaltigkeit-nachhaltige-entwicklung-14700>. - abgerufen am 15.06.2023 — Lexikon der Entwicklungspolitik
- [BNAP19] BENOIT NORRIS, CATHERINE ; NORRIS, GREGORY A. ; AZUERO, LINA ; PFLUEGER, JOHN: Creating Social Handprints: Method and Case Study in the Electronic Computer Manufacturing Industry. In: Resources Bd. 8, Nr. 4, S. 176, 2019
- [BNSL15] BUCHERT, TOM ; NEUGEBAUER, SABRINA ; SCHENKER, SEBASTIAN ; LINDOW, KAI ; STARK, RAINER: Multi-criteria Decision Making as a Tool for Sustainable Product Development – Benefits and Obstacles. In: Procedia CIRP Bd. 26, S. 70–75, 2015
- [BoMH13] BOND, A. J. ; MORRISON-SAUNDERS, ANGUS ; HOWITT, RICHARD: Sustainability assessment: pluralism, practice and progress, The natural and built environment series. New York : Routledge, 2013 — ISBN 978-0-415-59848-4
- [BoPé18] BOVEA, MARÍA D. ; PÉREZ-BELIS, VICTORIA: Identifying design guidelines to meet the circular economy principles: A case study on electric and electronic equipment. In: Journal of Environmental Management Bd. 228, S. 483–494, 2018
- [Boul66] BOULDING, KENNETH E.: The Economics of the Coming Spaceship Earth. In: , Sixth Resources for the Future Forum on Environmental Quality in a Growing Economy. Washington D.C., 1966
- [Bras24] BRASKEM: I'm green™ bio-based EVA - Biobasiertes Ethylvinylacetat (EVA). URL <https://fkur.com/biokunststoffe/im-green-eva/>. - abgerufen am 20.11.2024
- [BrDS01] BREZET, H. ; DIEHL, J.C. ; SILVESTER, S.: From ecodesign of products to sustainable systems design: delft's experiences. In: Proceedings Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. Tokyo, Japan : IEEE Comput. Soc, 2001 — ISBN 978-0-7695-1266-2, S. 605–612
- [BrMa14] BRAMSTON, DAVID ; MAYCROFT, NEIL: Designing with Waste. In: Materials Experience : Elsevier, 2014 — ISBN 978-0-08-099359-1, S. 123–133
- [BrMB07] BRAUNGART, MICHAEL ; McDONOUGH, WILLIAM ; BOLLINGER, ANDREW: Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design. In: Journal of Cleaner Production Bd. 15, Nr. 13–14, S. 1337–1348, 2007
- [BrPf17] BRENNER, THOMAS ; PFLITSCH, GESA: The raise of publications on sustainability—a case study in Germany. In: Review of Regional Research Bd. 37, Nr. 2, S. 189–225, 2017
- [BrSi04] BREZET, HAN ; SILVESTER, SACHA: Design for sustainability (D4S): Towards advanced product concepts. In: Environmental Engineering and Management Journal Bd. 3, Nr. 4, S. 591–602, 2004
- [Brun07] BRUNS, ELKE: Bewertungs- und Bilanzierungsmethoden in der Eingriffsregelung. Analyse und Systematisierung von Verfahren und Vorgehensweisen des Bundes und der Länder, Technische Universität Berlin, 2007
- [BrVa97] BREZET, HAN ; VAN HEMEL, CAROLIEN: Ecodesign : a promising approach to sustainable production and consumption, 1997 — ISBN 92-807-1631-X
- [BrWo14] BREM, ALEXANDER ; WOLFRAM, PIERRE: Research and development from the bottom up - introduction of terminologies for new product development in emerging markets. In: Journal of Innovation and Entrepreneurship Bd. 3, Nr. 1, S. 9, 2014
- [BSI08] BSI - BRITISH STANDARDS INSTITUTION: PAS 2050:2008: specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services, 2008
- [BSI14] BSI - BRITISH STANDARDS INSTITUTION: PAS 2060:2014 - Specification for the demonstration of carbon neutrality, 2014

- [BSRE14] BOCKEN, N.M.P. ; SHORT, S.W. ; RANA, P. ; EVANS, S.: A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. In: Journal of Cleaner Production Bd. 65, S. 42–56, 2014
- [BuBu20] BUNDESANZEIGER ; BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ: Bekanntmachung der Bewertungsgrundlage für metallene Werkstoffe im Kontakt mit Trinkwasser (Metall-Bewertungsgrundlage) – Neufassung – Vom 14. Mai 2020.
- [Bühr15] BÜHRING, PETRA: Psychische Erkrankungen - Die Diagnosen nehmen zu. In: Deutsches Ärzteblatt Bd. PP 14, Nr. Ausgabe August 2015
- [Bund02] BUNDESREGIERUNG: Perspektiven für Deutschland - Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung, 2002
- [Bund17] BUNDESRAT DER SCHWEIZ: Optionen zur Kompensation der Versauerung von Waldböden und zur Verbesserung der Nährstoffsituation von Wäldern - Darstellung und Bewertung, 2017
- [Bund18] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF): Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft - Forschungskonzept für eine kreislaufoptimierte Wirtschaftsweise. Bonn, 2018
- [Bund24] BUNDESMINISTERIUM FÜR GESUNDHEIT: Betriebliche Gesundheitsförderung. URL <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/themen/praevention/betriebliche-gesundheitsfoerderung>. - abgerufen am 31.07.2024 — BMG
- [Bund94] BUNDESGESETZBLATT: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG), 1994
- [Bura91] BURALL, PAUL: Green Design, Issues in design. London : Design Council, 1991 — ISBN 978-0-85072-284-0
- [CaFB23] CARES, ROCÍO A. ; FRANCO, ALDINA M.A. ; BOND, ALAN: Investigating the implementation of the mitigation hierarchy approach in environmental impact assessment in relation to biodiversity impacts. In: Environmental Impact Assessment Review Bd. 102, S. 107214, 2023
- [CaHG12] CARLOWITZ, HANS CARL VON ; HUSS, JÜRGEN ; GADOW, FRIEDRIKE VON: Sylvicultura oeconomica: hausswirthliche Nachricht und naturmäßige Anweisung zur wilden Baum-Zucht. Faksimile der Erstaufl. Leipzig 1713. Remagen-Oberwinter: Kessel, 2012 — ISBN 978-3-941300-56-9
- [CaJH12] CASTILLO, LEONARDO GOMEZ ; JAN CAREL DIEHL ; HAN BREZET: Design Considerations for Base of the Pyramid (BoP) Projects., S. 16, 2012
- [Carl13] CARLOWITZ, HANS CARL VON: Sylvicultura oeconomica. Leipzig, 1713
- [CCJZ13] CINELLI, MARCO ; COLES, STUART R. ; JØRGENSEN, ANDREAS ; ZAMAGNI, ALESSANDRA ; FERNANDO, CHALAKA ; KIRWAN, KERRY: Workshop on life cycle sustainability assessment: the state of the art and research needs. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 18, Nr. 7, S. 1421–1424, 2013
- [CeGa16] CESCHIN, FABRIZIO ; GAZIULUSOY, IDIL: Evolution of design for sustainability: From product design to design for system innovations and transitions. In: Design Studies Bd. 47, S. 118–163, 2016
- [Cent07] CENTRE FOR ENVIRONMENT EDUCATION (CEE): The 4th International Conference on Environment Education. Ahmedabad, India: Centre for Environment Education, India 24-28 November. In: , 2007
- [CFBL98] CASPERS-MERK, MARION ; FRITZ, ERICH G ; BLANK, RENATE ; LAUFS, PAUL ; REICHARD, CHRISTA ; DREYLING, MINISTERIALRAT FRIEDHELM ; BAUMERT, MARTIN ; BERNHARDT, DÖRTE ; U. A.:

- Zusammensetzung der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“. Bonn, 1998
- [CGMR89] CALKINS, DALE E. ; GAEVERT, RICHARD S. ; MICHEL, FREDERICK J. ; RICHTER, KAREN J.: Aerospace System Unified Life Cycle Engineering Producibility Measurement Issues: Fort Belvoir, VA : Defense Technical Information Center, 1989
- [Chap09] CHAPMAN, JONATHAN: Design for (Emotional) Durability. In: Design Issues Bd. 25, Nr. 4, S. 29–35, 2009
- [Chap12] CHAPMAN, J.: Emotionally durable design: Objects, experiences and empathy. In: Emotionally Durable Design: Objects, Experiences and Empathy, S. 1–211, 2012
- [ChCh12] CHIU, MING-CHUAN ; CHU, CHIH-HSING: Review of sustainable product design from life cycle perspectives. In: International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Bd. 13, Nr. 7, S. 1259–1272, 2012
- [CHKS11] CIROTH, ANDREAS ; HUNKELER, DAVID ; KLÖPFFER, WALTER ; SWARR, TOM: Life Cycle Costing – a Code of Practice. Key messages and critical evaluation, 2011
- [ChTi01] CHARTER, M. ; TISCHNER, U. (Hrsg.): Sustainable Solutions: Developing Products and Services for the Future. 1. Aufl. : Routledge, 2001 — ISBN 978-1-351-28248-2
- [CKHC09] CLARK, GARRETTE ; KOSORIS, JUSTIN ; HONG, LONG ; CRUL, MARCEL: Design for Sustainability: Current Trends in Sustainable Product Design and Development. In: Sustainability Bd. 1, Nr. 3, S. 409–424, 2009
- [CIDr16] CLIFT, R. ; DRUCKMAN, A. (Hrsg.): Taking Stock of Industrial Ecology. Cham : Springer International Publishing, 2016 — ISBN 978-3-319-20570-0
- [CLWS21] CHEBAEVA, NATALIA ; LETTNER, MIRIAM ; WENGER, JULIA ; SCHÖGGL, JOSEF-PETER ; HESSER, FRANZISKA ; HOLZER, DANIEL ; STERN, TOBIAS: Dealing with the eco-design paradox in research and development projects: The concept of sustainability assessment levels. In: Journal of Cleaner Production Bd. 281, S. 125232, 2021
- [CoJF73] COLE, H. S. D. ; JAHODA, M. ; FREEMAN, C. (Hrsg.): Models of doom: a critique of the limits to growth ; [with a reply by the authors of „The limits to growth“]. New York, NY : Universe Books, 1973 — ISBN 978-0-87663-905-4
- [Cole15] COLE, RAYMOND J.: Net-zero and net-positive design: a question of value. In: Building Research & Information Bd. 43, Nr. 1, S. 1–6, 2015
- [Coll24] COLLABORATING CENTRE ON SUSTAINABLE CONSUMPTION AND PRODUCTION GMBH: Handabdruck: ein komplementäres Mass positiver Nachhaltigkeitswirkung von Produkten. URL <http://www.handabdruck.org/index.php>. - abgerufen am 13.08.2024
- [Comm11] COMMISSION OF THE EUROPEAN UNION. JOINT RESEARCH CENTRE. INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY.: International reference life cycle data system (ILCD) handbook: general guide for life cycle assessment: provisions and action steps. LU : Publications Office, 2011
- [Comm72] COMMONER, B.: The environmental cost of economic growth., Ridker, R.G. (ed.) Population, Resources and the Environment, ( Nr. 339–63). Washington, DC. : U.S. Government Printing Office, 1972
- [CoMo21] CORSINI, LUCIA ; MOULTRIE, JAMES: What Is Design for Social Sustainability? A Systematic Literature Review for Designers of Product-Service Systems. In: Sustainability Bd. 13, Nr. 11, S. 5963, 2021
- [Coop16] COOPER, T. (Hrsg.): Longer Lasting Products : Routledge, 2016 — ISBN 978-1-317-10354-7
- [CoQD19] COSTA, D. ; QUINTEIRO, P. ; DIAS, A.C.: A systematic review of life cycle sustainability assessment: Current state, methodological challenges, and implementation issues. In: Science of The Total Environment Bd. 686, S. 774–787, 2019

- [CoSI97] COOPER, ROBIN ; SLAGMULDER, REGINE: Target costing and value engineering, Strategies in confrontational cost management series. Portland, Or. : Montvale, N.J : Productivity Press ; IMA Foundation for Applied Research, 1997 — ISBN 978-1-56327-172-4
- [Coun01] COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION: Regulation (EC) No 761/2001 of the European Parliament and of the Council of 19 March 2001 allowing voluntary participation by organisations in a Community eco-management and audit scheme (EMAS), 2001
- [Coun09] COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION: Regulation (EC) No 1221/2009 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2009 on the voluntary participation by organisations in a Community eco-management and audit scheme (EMAS), repealing Regulation (EC) No 761/2001 and Commission Decisions 2001/681/EC and 2006/193/EC, 2009
- [Coun92] COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION: Council Directive 92/42/EEC of 21 May 1992 on efficiency requirements for new hot-water boilers fired with liquid or gaseous fuels, 1992
- [Coun93] COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION: Council Regulation (EEC) No 1836/93 of 29 June 1993 allowing voluntary participation by companies in the industrial sector in a Community eco-management and audit scheme, 1993
- [CrDR09] CRUL, MARCEL ; DIEHL, JAN CAREL ; RYAN, CHRIS ; UNEP (Hrsg.): Design for Sustainability: A Step-by-Step Approach : United Nations Environmental Program, 2009 — ISBN 92-807-2711-7
- [CrFe01] CROW, D. ; FEINBERG, A. (Hrsg.): Design for reliability, Electronics handbook series. Boca Raton, Fla : CRC Press, 2001 — ISBN 978-0-8493-1111-6
- [CrSc19] CRUTZEN, PAUL J. ; SCHELLNHUBER, HANS-JOACHIM ; MÜLLER, M. (Hrsg.): Das Anthropozän: Schlüsseltexte des Nobelpreisträgers für das neue Erdzeitalter, Bibliothek der Nachhaltigkeit. München : Oekom Verlag, 2019 — ISBN 978-3-96238-137-0
- [CrVe20] CROES, PIM R. ; VERMEULEN, WALTER J.V.: The assessment of positive impacts in LCA of products. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, 2020
- [Cucu16] CUCUZZELLA, CARMELA: Creativity, sustainable design and risk management. In: Journal of Cleaner Production Bd. 135, S. 1548–1558, 2016
- [Curr93] CURRAN, MARY ANN: Broad-based environmental life cycle assessment. In: Environmental Science & Technology Bd. 27, Nr. 3, S. 430–436, 1993
- [Dala14] DALAL-CLAYTON, D. BARRY: Sustainability appraisal: a sourcebook and reference guide to international experience. New York : Routledge, 2014 — ISBN 978-0-415-69616-6
- [Daly90] DALY, HERMAN E.: Toward some operational principles of sustainable development. In: Ecological Economics Bd. 2, Nr. 1, S. 1–6, 1990
- [DBFB21] DE FAZIO, FRANCESCO ; BAKKER, CONNY ; FLIPSEN, BAS ; BALKENENDE, RUUD: The Disassembly Map: A new method to enhance design for product repairability. In: Journal of Cleaner Production Bd. 320, S. 128552, 2021
- [DCGS95] D’ANJOU, LOUIS O. ; CHOI, JAE H. ; GLANTSCHNIG, WERNER J. ; STEFANACCI, EMIL F.: Designing with Plastics: Considering Part Recyclability and the Use of Recycled Materials. In: AT&T Technical Journal Bd. 74, Nr. 6, S. 54–60, 1995
- [DeBH17] DEN HOLLANDER, MARCEL C. ; BAKKER, CONNY A. ; HULTINK, ERIK JAN: Product Design in a Circular Economy: Development of a Typology of Key Concepts and Terms: Key Concepts and Terms for Circular Product Design. In: Journal of Industrial Ecology Bd. 21, Nr. 3, S. 517–525, 2017
- [DeDS21] DE OLIVEIRA, CARLA TOGNATO ; DANTAS, THALES EDUARDO TAVARES ; SOARES, SEBASTIÃO ROBERTO: Nano and micro level circular economy indicators: Assisting decision-makers in circularity assessments. In: Sustainable Production and Consumption Bd. 26, S. 455–468, 2021

- [DeOs23] DEIVANAYAGAM, THILAGAWATHI ABI ; OSBORNE, RHIANNON ELIZABETH: Breaking free from tunnel vision for climate change and health. In: PAI, M. (Hrsg.) PLOS Global Public Health Bd. 3, Nr. 3, S. e0001684, 2023
- [Depa16] DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL AFFAIRS - SOUTH AFRICA: Air Quality Offsets Guideline, 2016
- [Dewb96] DEWBERRY, EMMA: Ecodesign, The Open University, 1996
- [DIN05a] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN ISO 9000:2005 - Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe, 2005
- [DIN05b] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 60300-3-3:2005 - Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden - Lebenszykluskosten (IEC 60300-3-3:2004); Deutsche Fassung EN 60300-3-3:2004, 2005
- [DIN11] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN ISO 14051:2011 - Umweltmanagement – Materialflusskostenrechnung – Allgemeine Rahmenbedingungen (ISO 14051:2011); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14051:2011, 2011
- [DIN12] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN ISO 14045:2012 - Umweltmanagement – Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen – Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien, 2012
- [DIN13] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN SPEC 77234:2013-09 - Leitlinien für die Bewertung von Lebenszykluskosten in Produkt-Dienstleistungssystemen - Guideline to evaluate lifecycle costs in product-service systems, 2013
- [DIN15] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN ISO 14001:2015-11, Umweltmanagementsysteme\_ - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung, 2015
- [DIN16] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN ISO 14046:2016 - Umweltmanagement – Wasser-Fußabdruck – Grundsätze, Anforderungen und Leitlinien (ISO 14046:2014); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14046:2016, 2016
- [DIN18] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 71-1 Sicherheit von Spielzeug - Teil 1: Mechanische und physikalische Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 71-1:2014+A1:2018, 2018
- [DIN19a] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN ISO 14064-1:2019 - Treibhausgase – Teil 1: Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen und Entzug von Treibhausgasen auf Organisationsebene (ISO 14064-1:2018), 2018
- [DIN19b] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 45558:2019 - Allgemeines Verfahren zur Deklaration der Verwendung kritischer Rohstoffe in energieverbrauchsrelevanten Produkten; Deutsche Fassung EN 45558:2019, 2019
- [DIN19c] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 45559:2019 - Verfahren zur Bereitstellung von Informationen über Materialeffizienz Aspekte energieverbrauchsrelevanter Produkte; Deutsche Fassung EN 45559:2019, 2019
- [DIN19d] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 17161:2019 - Design für alle – Barrierefreiheit von Produkten, Waren und Dienstleistungen nach einem „Design für alle“-Ansatz – Erweitern des Benutzerkreises; Deutsche Fassung EN 17161:2019 Design for All – Accessibility following a Design for All approach in products, goods and services – Extending the range of users; German version EN 17161:2019, 2019
- [DIN20a] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN ISO 14064-2:2020 - Treibhausgase – Teil 2: Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung, Überwachung und Berichterstattung von Reduktionen der Treibhausgasemissionen oder Steigerungen des Entzugs von Treibhausgasen auf Projektebene (ISO 14064-2:2019); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14064-2:2019, 2020

- [DIN20b] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN ISO 14064-3:2020 - Treibhausgase – Teil 3: Spezifikation mit Anleitung zur Validierung und Verifizierung von Erklärungen über Treibhausgase (ISO 14064-3:2019); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14064-3:2019, 2020
- [DIN20c] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 45552:2020 - Allgemeines Verfahren zur Bewertung der Funktionsbeständigkeit energieverbrauchsrelevanter Produkte; Deutsche Fassung EN 45552:2020, 2020
- [DIN20d] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 45553:2020 - Allgemeines Verfahren zur Bewertung der Wiederaufarbeitbarkeit energieverbrauchsrelevanter Produkte; Deutsche Fassung EN 45553:2020, 2020
- [DIN20e] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 45554:2020 - Allgemeine Verfahren zur Bewertung der Reparier-, Wiederverwend- und Upgradebarkeit energieverbrauchsrelevanter Produkte; Deutsche Fassung EN 45554:2020, 2020
- [DIN20f] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 45555:2020 - Allgemeines Verfahren zur Bewertung der Recyclingfähigkeit und Verwertbarkeit energieverbrauchsrelevanter Produkte; Deutsche Fassung EN 45555:2019, 2020
- [DIN20g] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 45556:2020 - Allgemeines Verfahren zur Bewertung des Anteils an wiederverwendeten Komponenten in energieverbrauchsrelevanten Produkten; Deutsche Fassung EN 45556:2019, 2020
- [DIN20h] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 45557:2020 - Allgemeines Verfahren zur Bewertung des Anteils an recyceltem Material von energieverbrauchsrelevanten Produkten; Deutsche Fassung EN 45557:2020, 2020
- [DIN21a] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN ISO 14040:2021 - Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020, 2021
- [DIN21b] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN CLC/TR 45550:2021-04, Definitionen zur Materialeffizienz; Deutsche Fassung CLC/TR\_45550:2020, 2021
- [DIN21c] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN ISO 14044:2021 - Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020, 2021
- [DIN21d] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 71-2 Sicherheit von Spielzeug - Teil 2: Entflammbarkeit; Deutsche Fassung EN 71-2:2020, 2021
- [DIN21e] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 71-3 Sicherheit von Spielzeug - Teil 3: Migration bestimmter Elemente; Deutsche Fassung EN 71-3:2019+A1:2021, 2021
- [DIN22] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN ISO 14015:2022 - Umweltmanagement – Umweltbezogene Due-Diligence-Bewertung (ISO 14015:2022); Deutsche Fassung EN ISO 14015:2022, 2022
- [DIN23a] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN/TS 35205:2023-02 - Entwurf - Leitfaden zur Wiederverwendung und Vorbereitung zur Wiederverwendung - Empfehlungen für Aufbau, Durchführung und Optimierung entsprechender Geschäftsmodelle - Guide to re-use and preparing for re-use - Recommendations for setting up, implementing and optimizing corresponding business models, 2023
- [DIN23b] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 45560:2023 - ENTWURF - Methode zur Gestaltung von zirkulären Produkten; Deutsche und Englische Fassung prEN 45560:2023, 2023
- [DIN99] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN IEC 60300-3-3:1999-03 Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3: Anwendungsleitfaden - Hauptabschnitt 3: Betrachtung der Lebenszykluskosten, 1999

- [DiRB22] DIAZ, ANNA ; REYES, TATIANA ; BAUMGARTNER, RUPERT J.: Implementing circular economy strategies during product development. In: Resources, Conservation and Recycling Bd. 184, S. 106344, 2022
- [DiSB22] DIJKSTRA-SILVA, SAMANTHI ; SCHALTEGGER, STEFAN ; BESKE-JANSSEN, PHILIP: Understanding positive contributions to sustainability. A systematic review. In: Journal of Environmental Management Bd. 320, S. 115802, 2022
- [DLKW24] DELACOTE, PHILIPPE ; L'HORTY, TARA ; KONTOLEON, ANDREAS ; WEST, THALES A. P. ; CRETU, ANNA ; FILEWOD, BEN ; LEVELLY, GWENOLE ; GUIZAR-COUTIÑO, ALEJANDRO ; U. A.: Strong transparency required for carbon credit mechanisms. In: Nature Sustainability Bd. 7, Nr. 6, S. 706–713, 2024
- [DMAF24] DREYFUS, GABRIELLE B. ; MONTZKA, STEPHEN A. ; ANDERSEN, STEPHEN O. ; FERRIS, RICHARD: Technical note: A method for calculating offsets to ozone depletion and climate impacts of ozone-depleting substances. In: Atmospheric Chemistry and Physics Bd. 24, Nr. 3, S. 2023–2032, 2024
- [DMBB16] DOUALLE, B. ; MEDINI, K. ; BOUCHER, X. ; BRISSAUD, D. ; LAFOREST, V.: Design of Sustainable Product-service Systems (PSS): Towards an Incremental Stepwise Assessment Method. In: Procedia CIRP Bd. 48, S. 152–157, 2016
- [DMNA24] DORMEIER, CHRISTOPHER ; MINDT, NADJA ; NIEMEYER, JAN FELIX ; ASGHARI, REZA ; MENNENGA, MARK: Review and framework for the engineering of Business Models for Sustainability: A System of Systems perspective. In: Sustainable Production and Consumption Bd. 51, S. 1–22, 2024
- [DrHS06] DREYER, LOUISE ; HAUSCHILD, MICHAEL ; SCHIERBECK, JENS: A Framework for Social Life Cycle Impact Assessment. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 11, Nr. 2, S. 88–97, 2006
- [DSRB21] DIAZ, ANNA ; SCHÖGGL, JOSEF-PETER ; REYES, TATIANA ; BAUMGARTNER, RUPERT J.: Sustainable product development in a circular economy: Implications for products, actors, decision-making support and lifecycle information management. In: Sustainable Production and Consumption Bd. 26, S. 1031–1045, 2021
- [DSSP18] DI CESARE, SILVIA ; SILVERI, FEDERICA ; SALA, SERENELLA ; PETTI, LUIGIA: Positive impacts in social life cycle assessment: state of the art and the way forward. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 23, Nr. 3, S. 406–421, 2018
- [DuBi15] DUDENREDAKTION ; BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT GMBH (Hrsg.): Duden - Deutsches Universalwörterbuch. 8., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin : Dudenverlag, 2015 — ISBN 978-3-411-05508-1
- [Dura02] DURAIRAJ, S: Evaluation of Life Cycle Cost Analysis Methodologies. In: Corporate Environmental Strategy Bd. 9, Nr. 1, S. 30–39, 2002
- [East74] EASTERLIN, RICHARD A.: Does Economic Growth Improve the Human Lot? In: Paul A. David & Melvin W. Reder (Hrsg.): Nations and Households in Economic Growth: Essays in Honor of Moses Abramovitz. Academic Press, 1974
- [EBWV22] ERMAKOVA, DINARA ; BAE, JIN WHAN ; WAINWRIGHT, HARUKO ; VUJIC, JASMINA: Remining and Restoring Abandoned US Mining Sites: The Case for Materials Needed for Zero-Carbon Transition ( Nr. ORNL/TM-2022/2591, 1888913), 2022
- [Ecoi24] ECOINVENT, ASSOCIATION: ecoinvent - Data with purpose. Version 3.10. URL <https://ecoinvent.org/>. - abgerufen am 23.11.2024 — ecoinvent
- [EDBB17] EUROPEAN COMMISSION. DIRECTORATE GENERAL FOR INTERNAL MARKET, INDUSTRY, ENTREPRENEURSHIP AND SMES. ; DELOITTE SUSTAINABILITY. ; BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. ; BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES. ; TOEGEPAST NATUURWETENSCHAPPELIJK ONDERZOEK.: Study on

- the review of the list of critical raw materials: critical raw materials factsheets. LU : Publications Office, 2017
- [EhHo71] EHRlich, PAUL R. ; HOLDREN, JOHN P.: Impact of population growth. In: Obstetrical & Gynecological Survey Bd. 26, Nr. 11, S. 769–771, 1971
- [EhLK13] EHRENSPIEL, KLAUS ; LINDEMANN, UDO ; KIEWERT, ALFONS: Kostengünstig entwickeln und konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung ; mit 143 Tabellen, VDI. 6., überarb. und korr. Aufl., Softcover. Berlin Heidelberg : Springer, 2013 — ISBN 978-3-540-74222-7
- [EhMe13] EHRENSPIEL, KLAUS ; MEERKAMM, HARALD: Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5., überarb. und erw. Aufl. München : Hanser, 2013 — ISBN 978-3-446-43548-3
- [EhrI95] EHRENSPIEL, KLAUS: Integrierte Produktentwicklung: Methoden für Prozeßorganisation, Produkterstellung und Konstruktion. München Wien : Hanser, 1995 — ISBN 978-3-446-15706-4
- [EiAS12] EIGNER, MARTIN ; ANDERL, REINER ; STARK, RAINER: Interdisziplinäre Produktentstehung. In: ANDERL, R. ; EIGNER, M. ; SENDLER, U. ; STARK, R. (Hrsg.) ; ACATECH - DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN, 2012 (Hrsg.): Smart Engineering, acatech DISKUSSION. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012 — ISBN 978-3-642-29371-9, S. 7–16
- [EKHG18] EKENER, ELISABETH ; HANSSON, JULIA ; GUSTAVSSON, MATHIAS: Addressing positive impacts in social LCA—discussing current and new approaches exemplified by the case of vehicle fuels. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 23, Nr. 3, S. 556–568, 2018
- [EKLM14] EHRENSPIEL, KLAUS ; KIEWERT, ALFONS ; LINDEMANN, UDO ; MÖRTL, MARKUS: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014 — ISBN 978-3-642-41958-4
- [ElGr15] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION ; GRANTA DESIGN: Circularity Indicators - An Approach to Measuring Circularity, 2015
- [Elle12] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION: Towards the circular economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition, 2012
- [Elle20a] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION: Circulytics: Weighting and scoring approach, 2020
- [Elle20b] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION: Circulytics: Indicators, 2020
- [EMSS10] EASTERLIN, R. A. ; MCVEY, L. A. ; SWITEK, M. ; SAWANGFA, O. ; ZWEIG, J. S.: The happiness-income paradox revisited. In: Proceedings of the National Academy of Sciences Bd. 107, Nr. 52, S. 22463–22468, 2010
- [EmWe02] EMPACHER, CLAUDIA ; WEHLING, PETER: Soziale Dimensionen der Nachhaltigkeit - Theoretische Grundlagen und Indikatoren. In: ISOE-Studientexte Bd. Nr. 11, 2002
- [EmWe99] EMPACHER, CLAUDIA ; WEHLING, PETER: Indikatoren sozialer Nachhaltigkeit - Grundlagen und Konkretisierungen. In: ISOE-Diskussionspapiere Bd. Nr. 13, 1999
- [Epea24] EPEA GMBH – PART OF DREES & SOMMER: Cradle to Cradle \_Mindset. URL <https://www.epea.com/ueber-uns/cradle-to-cradle>. - abgerufen am 04.07.2024
- [ErKS22] ERCHINGER, REBEKKA ; KOCH, ROSEMARIE ; SCHLEMMINGER, RALF B.: ESG(E)-Kriterien - die Schlüssel zum Aufbau einer nachhaltigen Unternehmensführung: Eine Eignungsanalyse ausgewählter Standardkriterien, essentials. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022 — ISBN 978-3-658-37876-9
- [Esko21] ESKOM: Eskom Air Quality Offset Implementation Plan for Lethabo Power Station. URL <https://www.eskom.co.za/wp-content/uploads/2021/08/AQoffsetplanFebileDabiMarch2021update.pdf>. - abgerufen am 25.07.2024

- [Euro00] EUROPEAN COMMISSION: Directive 2000/55/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on energy efficiency requirements for ballasts for fluorescent lighting. Bd. 2000/55/EC, 2000
- [Euro03] EUROPEAN COMMISSION: Integrated Product Policy - Building on Environmental Life-Cycle Thinking ( Nr. COM/2003/0302 final). Brussels, 2003
- [Euro05] EUROPEAN COMMISSION: Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council of 6 July 2005 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-using products and amending Council Directive 92/42/EEC and Directives 96/57/EC and 2000/55/EC of the European Parliament and of the Council, 2005
- [Euro06] EUROPEAN COMMISSION: REGULATION (EC) No 1907/2006 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), 2006
- [Euro09] EUROPEAN COMMISSION: Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products, 2009
- [Euro14] EUROPEAN PARLIAMENT, COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION: Directive 2014/95/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 amending Directive 2013/34/EU as regards disclosure of non-financial and diversity information by certain large undertakings and groups Text with EEA relevance, 2014
- [Euro15] EUROPÄISCHE KOMMISSION: Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft, 2015
- [Euro16] EUROPEAN TOPIC CENTRE ON INLAND, COASTAL AND MARINE WATERS: European assessment of eutrophication abatement measures across land-based sources, inland, coastal and marine waters ( Nr. ETC/ICM Technical Report 2/2016), 2016
- [Euro17] EUROPEAN COMMISSION. JOINT RESEARCH CENTRE.: Critical raw materials and the circular economy: background report. LU : Publications Office, 2017
- [Euro19] EUROPEAN COMMISSION: The European Green Deal - Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, 2019
- [Euro20a] EUROPÄISCHE KOMMISSION: Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa, 2020
- [Euro20b] EUROPEAN COMMISSION: A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe, 2020
- [Euro21] EUROPEAN COMMISSION: Commission Recommendation (EU) 2021/2279 of 15 December 2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations, 2021
- [Euro22] EUROPEAN COMMISSION: Directive 2022/2464 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 amending Regulation (EU) No 537/2014, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Directive 2013/34/EU, as regards corporate sustainability reporting, 2022
- [Euro23a] EUROPEAN COMMISSION: Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2772 of 31 July 2023 supplementing Directive 2013/34/EU of the European Parliament and of the Council as regards sustainability reporting standards (ESRS), 2023
- [Euro23b] EUROPEAN PARLIAMENT, COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION: Regulation 2023/1542/EC (EU) 2023 of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, 2023

- [Euro24a] EUROPEAN PARLIAMENT, COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION: Directive (EU) 2024/1760 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 on corporate sustainability due diligence and amending Directive (EU) 2019/1937 and Regulation (EU) 2023/2859 (Text with EEA relevance=, 2024
- [Euro24b] EUROPEAN PARLIAMENT, COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION: Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC (Text with EEA relevance), 2024
- [Euro24c] EUROPEAN COMMISSION - DIRECTORATE: INTERNAL MARKET, INDUSTRY, ENTREPRENEURSHIP AND SMEs: Bio-based products - European Commission. URL [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/biotechnology/bio-based-products\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/biotechnology/bio-based-products_en). - abgerufen am 29.07.2024
- [Euro96] EUROPEAN COMMISSION: Directive 96/57/EC of the European Parliament and of the Council of 3 September 1996 on energy efficiency requirements for household electric refrigerators, freezers and combinations thereof, 1996
- [EWSD20] EISENHARD, JULIE L. ; WALLACE, DAVID R. ; SOUSA, INES ; DE SCHEPPER, MIEKE S. ; ROMBOUTS, JEROEN P.: Approximate Life-Cycle Assessment in Conceptual Product Design. In: Volume 3: 5th Design for Manufacturing Conference. Baltimore, Maryland, USA : American Society of Mechanical Engineers, 2020 — ISBN 978-0-7918-3513-5, S. 177–185
- [Fair24] FAIRTRADE INTERNATIONAL: Fairtrade International Projects. URL <https://www.fairtrade.net/about/projects>. - abgerufen am 31.07.2024 — Fairtrade International
- [FaLo18] FAUST, MAXIMILIAN ; LOTTER, DENNIS: Mit dem Sustainable Business Model Canvas Geschäftsmodelle nachhaltig gestalten. In: BUNGARD, P. (Hrsg.): CSR und Geschäftsmodelle, Management-Reihe Corporate Social Responsibility. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2018 — ISBN 978-3-662-52881-5, S. 433–444
- [FeGr13] FELDHOUSEN, J. ; GROTE, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013 — ISBN 978-3-642-29568-3
- [FGAH21] FRACCASCIA, LUCA ; GIANNOCARO, ILARIA ; AGARWAL, ABHISHEK ; HANSEN, ERIK G.: Business models for the circular economy: Empirical advances and future directions. In: Business Strategy and the Environment Bd. 30, Nr. 6, S. 2741–2744, 2021
- [Fiks12] FIKSEL, JOSEPH: Design for environment: a guide to sustainable product development. 2. ed. New York : McGraw-Hill, 2012 — ISBN 978-0-07-177622-6
- [Fink13] FINKBEINER, MATTHIAS: From the 40s to the 70s—the future of LCA in the ISO 14000 family. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 18, Nr. 1, S. 1–4, 2013
- [Fink16] FINKBEINER, M. (Hrsg.): Special Types of Life Cycle Assessment, LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment. Dordrecht : Springer Netherlands, 2016 — ISBN 978-94-017-7608-0
- [Frie13] FRIEDRICH, H. E. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013 — ISBN 978-3-8348-1467-8
- [FrSa07] FRAHM, JAN-PETER ; SABOVLJEVIC, MARKO: Feinstaubreduzierung durch Moose. In: Immissionsschutz, Nr. 4, S. 3, 2007
- [FSLT10] FINKBEINER, MATTHIAS ; SCHAU, ERWIN M. ; LEHMANN, ANNEKATRIN ; TRAVERSO, MARZIA: Towards Life Cycle Sustainability Assessment. In: Sustainability Bd. 2, Nr. 10, S. 3309–3322, 2010

- [FTTB18] FONTES, JOÃO ; TARNE, PETER ; TRAVERSO, MARZIA ; BERNSTEIN, PAULA: Product social impact assessment. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* Bd. 23, Nr. 3, S. 547–555, 2018
- [Fvaf13] FVA - FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG: Merkblatt 54/2013 - Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung. URL [https://www.fva-bw.de/fileadmin/publikationen/merkblatt/mb\\_54.pdf](https://www.fva-bw.de/fileadmin/publikationen/merkblatt/mb_54.pdf). - abgerufen am 26.07.2024
- [Gagn13] Intégration des principes du développement durable à la conception en ingénierie: la conception durable appliquée aux systèmes municipaux d'assainissement des eaux usées. Ottawa : Library and Archives Canada = Bibliothèque et Archives Canada, 2013 — ISBN 978-0-494-89693-8
- [GaLS09] GAGNON, BRUNO ; LEDUC, ROLAND ; SAVARD, LUC: Sustainable Development in Engineering: A Review of Principles and Definition of a Conceptual Framework. In: *Environmental Engineering Science* Bd. 26, Nr. 10, S. 1459–1472, 2009
- [GaLS12] GAGNON, BRUNO ; LEDUC, ROLAND ; SAVARD, LUC: From a conventional to a sustainable engineering design process: different shades of sustainability. In: *Journal of Engineering Design* Bd. 23, Nr. 1, S. 49–74, 2012
- [GBGH07] GRIEBHAMMER, DR RAINER ; BUCHERT, MATTHIAS ; GENSCHE, CARL-OTTO ; HOCHFELD, CHRISTIAN ; MANHART, ANDREAS ; RÜDENAUER, INA: PROSA – Product Sustainability Assessment, S. 222, 2007
- [Geb122] GEBLER, MALTE: Planung und Gestaltung einer Positivfabrik als Beitrag für eine absolute Nachhaltigkeit. S.l. : Springer Vieweg, 2022 — ISBN 978-3-658-38977-2
- [GeVE18] GEISSDOERFER, MARTIN ; VLADIMIROVA, DOROTEYA ; EVANS, STEVE: Sustainable business model innovation: A review. In: *Journal of Cleaner Production* Bd. 198, S. 401–416, 2018
- [Gibs17] GIBSON, R. B. (Hrsg.): Sustainability assessment: applications and opportunities. London : Routledge, 2017 — ISBN 978-1-138-80275-9
- [GIKH24] GILL-WIEHL, ANNE LISE ; KAMMEN, DANIEL M. ; HAYA, BARBARA K.: Pervasive over-crediting from cookstove offset methodologies. In: *Nature Sustainability* Bd. 7, Nr. 2, S. 191–202, 2024
- [GJTC22] GEBLER, MALTE ; JURASCHEK, MAX ; THIEDE, SEBASTIAN ; CERDAS, FELIPE ; HERRMANN, CHRISTOPH: Defining the “Positive Impact” of socio-technical systems for absolute sustainability: a literature review based on the identification of system design principles and management functions. In: *Sustainability Science* Bd. 17, Nr. 6, S. 2597–2613, 2022
- [Glob24] GLOBAL NATURE FUND: GNF - Trinkwasser-Projekte in Afrika. URL <https://www.globalnature.org/de/helfen---spenden/spende/trinkwasser-afrika>. - abgerufen am 29.07.2024
- [GISY21] GLOGIC, EDIS ; SONNEMANN, GUIDO ; YOUNG, STEVEN B.: Environmental Trade-Offs of Downcycling in Circular Economy: Combining Life Cycle Assessment and Material Circularity Indicator to Inform Circularity Strategies for Alkaline Batteries. In: *Sustainability* Bd. 13, Nr. 3, S. 1040, 2021
- [GMDE18] GEISSDOERFER, MARTIN ; MORIOKA, SANDRA NAOMI ; DE CARVALHO, MARLY MONTEIRO ; EVANS, STEVE: Business models and supply chains for the circular economy. In: *Journal of Cleaner Production* Bd. 190, S. 712–721, 2018
- [GMPT19] GODDIN, JAMES ; MARSHALL, KIM ; PEREIRA, ANA ; TUPPEN, CHRIS ; HERRMANN, SVEN ; JONES, SAM ; KRIEGER, TODD ; LENGES, CHRISTIAN ; U. A.: Circularity Indicators: An Approach to Measuring Circularity, Methodology (Revision 2019). In: ELLEN MACARTHUR FOUNDATION ; ANSYS GRANTA (Hrsg.), 2019

- [GMWT25] GONG, YONGYUE ; MA, FENGMEI ; WANG, HEMING ; TZACHOR, ASAF ; SUN, WENJU ; ZHU, JUNMING ; LIU, GANG ; SCHANDL, HEINZ: The evolution of research at the intersection of industrial ecology and artificial intelligence. In: *Journal of Industrial Ecology*, S. jiec.13612, 2025
- [GoAU20] GOEDKOOP, M.J.; DE BEER, I.M; HARMENS, R.; PETER SALING; DAVE MORRIS; ALEXANDRA FLOREA; ; ANNE LAURE HETTINGER; DIANA INDRANE; DIANA VISSER; ANA MORAO; ELIZABETH MUSOKE-FLORES; CARMEN ALVARADO; IPSHITA RAWAT; ; URS SCHENKER; MEGANN HEAD; MASSIMO COLLOTTA; THOMAS ANDRO; JEAN-FRANÇOIS VIOT; ALAIN WHATELET; *Product Social Impact Assessment Handbook - 2020*.
- [Godd24] GODDIN, JIM: *MCI Calculator thinkstep-anz 2024 V1.0*, THINKSTEP LTD (Hrsg.), 2024
- [GoHR24] GONÇALVES, AFONSO ; HENRIQUES, ELSA ; RIBEIRO, INÊS: Towards plastics circular economy: sustainability assessment of mono-material design for recycling. In: *Procedia CIRP Bd. 122*, S. 401–406, 2024
- [Gome23] GOMEZ GONZALEZ, ELISA: *Climate Change and Carbon Markets*. S.l. : Delve Publishing, 2023 — ISBN 978-1-77469-574-6
- [Good20] GOODYEAR GERMANY GMBH: Der Goodyear reCharge. URL <https://news.goodyear.eu/download/836371/de-pmgenf2020goodyear-recharge.pdf>. - abgerufen am 06.12.2024 — Pressemitteilung
- [Göpe16] GÖPEL, MAJA: *The Great Mindshift, The Anthropocene: Politik—Economics—Society—Science*. Bd. 2. Cham : Springer International Publishing, 2016 — ISBN 978-3-319-43765-1
- [GPPS20] GEISSDOERFER, MARTIN ; PIERONI, MARINA P.P. ; PIGOSSO, DANIELA C.A. ; SOUFANI, KHALED: Circular business models: A review. In: *Journal of Cleaner Production Bd. 277*, S. 123741, 2020
- [Gree20] GREEN CITY SOLUTIONS GMBH: FRISCHLUFTKONZEPT. URL <https://greencitysolutions.de/frischluftkonzept/>. - abgerufen am 25.07.2024 — Green City Solutions
- [Gree24] GREENDELTA GMBH: Psilca.net - Product Social Impact Life Cycle Assessment (PSILCA). URL <https://psilca.net/>. - abgerufen am 17.04.2024
- [GrEJ97] GREN, ING-MARIE ; ELOFSSON, KATARINA ; JANNKE, PAUL: Cost-effective Nutrient Reductions to the Baltic Sea. In: *Managing a Sea*. 1. Aufl. : Routledge, 1997, S. 43–56
- [GrHi20] GRATZEL, DIRK C. ; HIRSCHHAUSEN, ECKART VON: *Projekt Greenzero: können wir klimaneutral leben?: mein konsequenter Weg zu einer ausgeglichenen Ökobilanz*. Originalausgabe. München : Ludwig, 2020 — ISBN 978-3-453-28129-5
- [GrLL09] GREN, ING-MARIE ; LINDAHL, ODD ; LINDQVIST, MARTIN: Values of mussel farming for combating eutrophication: An application to the Baltic Sea. In: *Ecological Engineering Bd. 35*, Nr. 5, S. 935–945, 2009
- [GrQu11] GRÖGER, JENS ; QUACK, DIETLINDE: Product Sustainability Assessment (PROSA) as a tool to develop awarding criteria for eco- label. In: *Towards Life Cycle Sustainability Management*. Berlin, 2011, S. 7
- [GrSW97] GREN, ING-MARIE ; SÖDERQVIST, TORE ; WULFF, FREDRIK: Nutrient Reductions to the Baltic Sea: Ecology, Costs and Benefits. In: *Journal of Environmental Management Bd. 51*, Nr. 2, S. 123–143, 1997
- [GSBH17] GEISSDOERFER, MARTIN ; SAVAGET, PAULO ; BOCKEN, NANCY M.P. ; HULTINK, ERIK JAN: The Circular Economy – A new sustainability paradigm? In: *Journal of Cleaner Production Bd. 143*, S. 757–768, 2017
- [GuDi21] GULLO, L. J. ; DIXON, J. (Hrsg.): *Design for maintainability*, Wiley series in quality & reliability engineering. Hoboken : Wiley, 2021 — ISBN 978-1-119-57851-2
- [Gumb23] GUMBER, SUGANDHA: Minimalism in Design: A Trend of Simplicity in Complexity. In: *ShodhKosh: Journal of Visual and Performing Arts Bd. 4*, Nr. 2, 2023

- [HAAB23] HAYA, BARBARA K ; ALFORD-JONES, KELSEY ; ANDEREGG, WILLIAM R L ; BEYMER-FARRIS, BETSY ; BLANCHARD, LIBBY ; BOMFIM, BARBARA ; CHIN, DYLAN ; EVANS, SAMUEL ; U. A.: Quality Assessment of REDD+ Carbon Credit Projects. In: Berkeley Carbon Trading, 2023
- [HaHK17] HAUSCHILD, MICHAEL Z. ; HERRMANN, CHRISTOPH ; KARA, SAMI: An Integrated Framework for Life Cycle Engineering. In: Procedia CIRP Bd. 61, S. 2–9, 2017
- [Hahn12] HAHN, RÜDIGER: Standardizing Social Responsibility? New Perspectives on Guidance Documents and Management System Standards for Sustainable Development. In: IEEE Transactions on Engineering Management Bd. 59, Nr. 4, S. 717–727, 2012
- [HaKI09] HAUFF, MICHAEL VON ; KLEINE, ALEXANDRO: Nachhaltige Entwicklung: Grundlagen und Umsetzung. München : Oldenbourg, 2009 — ISBN 978-3-486-59071-5
- [HaKR20] HAUSCHILD, MICHAEL Z. ; KARA, SAMI ; RØPKE, INGE: Absolute sustainability: Challenges to life cycle engineering. In: CIRP Annals Bd. 69, Nr. 2, S. 533–553, 2020
- [Hans65] HANSEN FRIEDRICH: Konstruktionssystematik - Grundlagen für eine allgemeine Konstruktionslehre. 2. Auflage. Berlin (Ost) : Verlag Technik, 1965
- [Hans74] HANSEN, FRIEDRICH: Konstruktionswissenschaft: Grundlagen und Methoden, Studienbücher der technischen Wissenschaften. München : Hanser, 1974 — ISBN 978-3-446-11957-4
- [Hauf21] HAUFF, MICHAEL: Nachhaltige Entwicklung: Grundlagen und Umsetzung : De Gruyter, 2021 — ISBN 978-3-11-072253-6
- [Haus15] HAUSCHILD, MICHAEL Z.: Better – But is it Good Enough? On the Need to Consider Both Eco-efficiency and Eco-effectiveness to Gauge Industrial Sustainability. In: Procedia CIRP Bd. 29, S. 1–7, 2015
- [HaVo10] HAMMER, ERWIN ; VORBACH, STEFAN: Voluntary Carbon Offsets – Eine Bewertung europäischer Retailer von Zertifikaten zum Ausgleich von Treibhausgasemissionen. In: uwf UmweltWirtschaftsForum Bd. 18, Nr. 1, S. 71–77, 2010
- [Haya10] HAYA, BARBARA K.: Carbon Offsetting: An Efficient Way to Reduce Emissions or to Avoid Reducing Emissions? An Investigation and Analysis of Offsetting Design and Practice in India and China, University of California, Berkeley, 2010
- [Haya19] HAYA, BARBARA K.: POLICY BRIEF: The California Air Resources Board’s U.S. Forest offset protocol underestimates leakage. Berkeley, 2019
- [HBKS15] HERRMANN, CHRISTOPH ; BLUME, STEFAN ; KURLE, DENIS ; SCHMIDT, CHRISTOPHER ; THIEDE, SEBASTIAN: The Positive Impact Factory—Transition from Eco-efficiency to Eco-effectiveness Strategies in Manufacturing. In: Procedia CIRP Bd. 29, S. 19–27, 2015
- [HBTH07] HERRMANN, CHRISTOPH ; BERGMANN, LARS ; THIEDE, SEBASTIAN ; HALUBEK, PHILIPP: Total Life Cycle Management - An Integrated Approach Towards Sustainability, 2007
- [HCLM18] HAINES-GADD, MERRYLN ; CHAPMAN, JONATHAN ; LLOYD, PETER ; MASON, JON ; ALIAKSEYEU, DZMITRY: Emotional Durability Design Nine—A Tool for Product Longevity. In: Sustainability Bd. 10, Nr. 6, S. 1948, 2018
- [HCSG20] HAYA, BARBARA ; CULLENWARD, DANNY ; STRONG, AARON L. ; GRUBERT, EMILY ; HEILMAYR, ROBERT ; SIVAS, DEBORAH A. ; WARA, MICHAEL: Managing uncertainty in carbon offsets: insights from California’s standardized approach. In: Climate Policy Bd. 20, Nr. 9, S. 1112–1126, 2020
- [HDFV19] HABERFELLNER, REINHARD ; DE WECK, OLIVIER ; FRICKE, ERNST ; VÖSSNER, SIEGFRIED: Systems Engineering: Fundamentals and Applications. Cham : Springer International Publishing, 2019 — ISBN 978-3-030-13430-3
- [HEBB23] HAYA, BARBARA K. ; EVANS, SAMUEL ; BROWN, LETTY ; BUKOSKI, JACOB ; BUTSIC, VAN ; CABIYO, BODIE ; JACOBSON, RORY ; KERR, AMBER ; U. A.: Comprehensive review of carbon

- quantification by improved forest management offset protocols. In: *Frontiers in Forests and Global Change* Bd. 6, S. 958879, 2023
- [HeBu19] HEINRICH-BÖLL-STIFTUNG ; BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND (Hrsg.): *Plastikatlas: Daten und Fakten über eine Welt voller Kunststoff*. 3. Auflage. Berlin : Heinrich-Böll-Stiftung, 2019 — ISBN 978-3-86928-200-8
- [HeMG20] HERNANDEZ, RICARDO J ; MIRANDA, CONSTANZA ; GOÑI, JULIAN: Empowering Sustainable Consumption by Giving Back to Consumers the ‘Right to Repair’. In: *Sustainability* Bd. 12, Nr. 3, S. 850, 2020
- [HeMo11] HENNING, F. ; MOELLER, E. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. München Wien : Hanser, 2011 — ISBN 978-3-446-42891-1
- [Herr03] HERRMANN, CHRISTOPH: *Unterstützung der Entwicklung recyclinggerechter Produkte*, Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig. Essen : Vulkan-Verl, 2003 — ISBN 978-3-8027-8672-3
- [Herr10] HERRMANN, CHRISTOPH: *Ganzheitliches Life Cycle Management*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2010 — ISBN 978-3-642-01420-8
- [Hert05] HERTWICH, EDGAR G.: Consumption and the Rebound Effect: An Industrial Ecology Perspective. In: *Journal of Industrial Ecology* Bd. 9, Nr. 1–2, S. 85–98, 2005
- [HeVG09] HELMS, MICHAEL ; VATTAM, SWAROOP S. ; GOEL, ASHOK K.: Biologically inspired design: process and products. In: *Design Studies* Bd. 30, Nr. 5, S. 606–622, 2009
- [HFBB13] HEYEN, DIRK ARNE ; FISCHER, CORINNA ; BARTH, REGINE ; BRUNN, CHRISTOPH ; GRIEBHAMMER, RAINER ; KEIMEYER, FRIEDHELM ; WOLFF, FRANZISKA: *Mehr als nur weniger - Suffizienz: Notwendigkeit und Optionen politischer Gestaltung*, 2013
- [HFBL95] HUBER, J. ; FRITZ, P. ; BUSCH-LÜTY, C. ; LEVI, H. W. ; KARL-HEINZ-BECKURTS-STIFTUNG ; MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT HALLE-WITTENBERG (Hrsg.): *Nachhaltige Entwicklung durch Suffizienz, Effizienz und Konsistenz - Nachhaltigkeit in naturwissenschaftlicher und sozialwissenschaftlicher Perspektive: eine Publikation der Karl-Heinz-Beckurts-Stiftung: [aus einem interdisziplinären Gespräch]*, Edition universitas. Stuttgart : Wiss. Verlagsgesellschaft, 1995 — ISBN 978-3-8047-1393-2
- [HGHZ18] HAFFMANS, SIEM ; GELDER, MARJOLEIN VAN ; HINTE, ED VAN ; ZIJLSTRA, YVO: *Products that flow: circular business models and design strategies for fast-moving consumer goods*. Amsterdam : BIS Publishers, 2018 — ISBN 978-90-6369-498-2
- [HHAW21] HESSE, DAVID ; HAMATSCHEK, CHRISTOPHER ; AUGSBURG, KLAUS ; WEIGELT, THOMAS ; PRAHST, ALEXANDER ; GRAMSTAT, SEBASTIAN: Testing of Alternative Disc Brakes and Friction Materials Regarding Brake Wear Particle Emissions and Temperature Behavior. In: *Atmosphere* Bd. 12, Nr. 4, S. 436, 2021
- [HLAO21] HJALSTED, ANJILA WEGGE ; LAURENT, ALEXIS ; ANDERSEN, MARTIN MARCHMAN ; OLSEN, KAREN HOLM ; RYBERG, MORTEN ; HAUSCHILD, MICHAEL: Sharing the safe operating space: Exploring ethical allocation principles to operationalize the planetary boundaries and assess absolute sustainability at individual and industrial sector levels. In: *Journal of Industrial Ecology* Bd. 25, Nr. 1, S. 6–19, 2021
- [HMMM16] HASSAN, MOHD FAHRUL ; MAT SAMAN, MUHAMAD ZAMERI ; MAHMOOD, SALWA ; MUHD NOR, NIK HISYAMUDIN ; ABDOL RAHMAN, MOHD NASRULL: Sustainability assessment methodology in product design: A review and directions for future research. In: *Jurnal Teknologi* Bd. 79, Nr. 1, 2016
- [HMTT24] HACKENHAAR, ISADORA C. ; MORAGA, GUSTAVO ; THOMASSEN, GWENNY ; Taelman, SUE ELLEN ; DEWULF, JO ; BACHMANN, TILL M.: A comprehensive framework covering Life Cycle Sustainability Assessment, resource circularity and criticality. In: *Sustainable Production and Consumption* Bd. 45, S. 509–524, 2024

- [HoJa95] HOPFENBECK, WALDEMAR ; JASCH, CHRISTINE: Öko-Design umweltorientierte Produktpolitik. Landsberg/Lech : Moderne Industrie, 1995 — ISBN 978-3-478-23660-7
- [Holm98] HOLMBERG, JERRY: Backcasting: a natural step in operationalising sustainable development. In: . Bd. Greener Management International 23: 30– 51., 1998
- [Howa15] HOWARTH, RICHARD B: Sustainability, Well- Being, and Economic Growth, 2015
- [HSCH80] HAMEL, P.G. ; SHEVELL, R.S ; CHISHOLM, R.H. ; HOUTS, R.E. ; LEWIS, R.B.: Design to Cost and Life Cycle Cost. In: Flight Mechanics Panel Symposium, 1980
- [HSES16] HUIJBREGTS, M A J ; STEINMANN, Z J N ; ELSHOUT, P M F ; STAM, G ; VERONES, F ; VIEIRA, M D M ; HOLLANDER, A ; ZIJP, M ; U. A.: ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization, 2016
- [HSES17] HUIJBREGTS, MARK A. J. ; STEINMANN, ZORAN J. N. ; ELSHOUT, PIETER M. F. ; STAM, GEA ; VERONES, FRANCESCA ; VIEIRA, MARISA ; ZIJP, MICHEL ; HOLLANDER, ANNE ; U. A.: ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 22, Nr. 2, S. 138–147, 2017
- [HuFH96] HUNT, ROBERT G. ; FRANKLIN, WILLIAM E. ; HUNT, R. G.: LCA — How it came about: — Personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 1, Nr. 1, S. 4–7, 1996
- [HuRe03] HUNKELER, DAVID ; REBITZER, GERALD: Life Cycle costing — paving the road to sustainable development? In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 8, Nr. 2, S. 109, 2003
- [HuRe05] HUNKELER, DAVID ; REBITZER, GERALD: The Future of Life Cycle Assessment. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 10, Nr. 5, S. 305–308, 2005
- [HWFL21] HANSEN, ERIK G. ; WIEDEMANN, PATRICK ; FICHTER, KLAUS ; LÜDEKE-FREUND, FLORIAN ; JAEGER-ERBEN, MELANIE ; SCHOMERUS, THOMAS ; ALCAYAGA, ANDRES ; BLOMSMA, FENNA ; U. A.: Zirkuläre Geschäftsmodelle: Barrieren überwinden, Potenziale freisetzen. In: ACATECH/CIRCULAR ECONOMY INITIATIVE DEUTSCHLAND/SYSTEMIQ (Hrsg.) , acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2021
- [Igu23] IGUS, GMBH: Gleitlager iglidur® N94 - Factsheet. URL [https://igus.widen.net/s/z7cjb5t6g/de\\_factsheet\\_news\\_2023-igl-03\\_iglidur\\_n94](https://igus.widen.net/s/z7cjb5t6g/de_factsheet_news_2023-igl-03_iglidur_n94). - abgerufen am 21.11.2024
- [Igu24] IGUS, GMBH: Gleitlager aus nachwachsenden Rohstoffen. URL <https://www.igus.de/gleitlager/news/gleitlager-aus-nachwachsenden-rohstoffen>. - abgerufen am 21.11.2024
- [Inte18] THE INTERNATIONAL LIVING FUTURE INSTITUTE: Living Product Challenge Standard 2.0 - A Visionary Path to a Regenerative Future, 2018
- [Inte21] INTERNATIONALE VEREINIGUNG FÜR SOZIALE SICHERHEIT: Ausweitung und Erhalt der Sozialversicherungsdeckung – Afrika. URL <https://www.issa.int/de/analysis/extending-and-maintaining-social-security-coverage-africa>. - abgerufen am 31.07.2024 — IVSS
- [Inte22] INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION (ILO): ILO Declaration on Fundamental Principles and Rights at Work and its Follow-up. . - abgerufen am 27.10.2022
- [Inte24a] INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION (ILO): ILOSTAT. URL <https://ilostat.ilo.org/>. - abgerufen am 17.04.2024 — ILOSTAT
- [Inte24b] INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION (ILO): Vision Zero Fund – Every worker, everywhere, deserves a safe & healthy workplace. URL <https://vzf.ilo.org/>. - abgerufen am 31.07.2024
- [Inte24c] THE INTERNATIONAL LIVING FUTURE INSTITUTE: Living Product Challenge v2.0 - Handbook, 2024

- [Inte24d] THE INTERNATIONAL LIVING FUTURE INSTITUTE: Living Product Challenge Archives. URL <https://living-future.org/program/lpc/>. - abgerufen am 13.08.2024 — International Living Future Institute
- [Isoc09] ISO CENTRAL SECRETARIAT: Environmental management - The ISO 14000 family of International Standards. Genf, 2009 — ISBN 978-92-67-10500-0
- [Isoi15] ISO/IEC JTC 1/SC 7 SOFTWARE AND SYSTEMS ENGINEERING: ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Systems and software engineering — System life cycle processes : Beuth Verlag, Berlin, 2015
- [ISO00a] ISO/TC 207: DIN EN ISO 14042:2000-07 Umweltmanagement - Ökobilanz - Wirkungsabschätzung | Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle impact assessment (ISO 14042:2000), 2000
- [ISO00b] ISO/TC 207: DIN EN ISO 14043:2000-07 Umweltmanagement - Ökobilanz - Auswertung | Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle interpretation (ISO 14043:2000) , 2000
- [ISO01] ISO/TC 207: DIN EN ISO 14020 - Umweltkennzeichnungen und -deklarationen Allgemeine Grundsätze (ISO 14020:2000) - Deutsche Fassung ENISO14020:2001, 2001
- [ISO02] ISO/TC 207: ISO/TR 14062:2002 Environmental management - Integrating environmental aspects into product design and development, 2002
- [ISO06a] ISO/TC 207: DIN EN ISO 14044:2006 - Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, 2006
- [ISO06b] ISO/TC 207: DIN EN ISO 14040:2006 -Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen - Environmental management Life cycle assessment Principles and framework, 2006
- [ISO10] ISO/TMBG: ISO 26000:2010 Guidance on social responsibility - Leitfaden zur gesellschaftlichen Verantwortung, 2010
- [ISO11] ISO/TC 207/SC1: ISO 14006:2011 - Umweltmanagementsysteme - Leitlinien zur Berücksichtigung umweltverträglicher Produktgestaltung - Environmental management systems Guidelines for incorporating ecodesign, 2011
- [ISO12] ISO/TC 207: ISO/TR 14047:2012-06 Umweltmanagement - Ökobilanz - Beispiele zur Anwendung von ISO 14044 zur Wirkungsabschätzung Environmental management - Life cycle assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations, 2012
- [ISO18] ISO/TC 207/SC 7: ISO 14080:2018 - Management von Treibhausgasen und zugehörige Tätigkeiten - Grundsätze und Prinzipien für Entwickler von Methoden hinsichtlich klimarelevanter Maßnahmen - Greenhouse gas management and related activities - Framework and principles for methodologies on climate actions, 2018
- [ISO19] ISO/TC 207: DIN EN ISO 14067:2019 - Treibhausgase- Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (ISO\_14067:2018); Deutsche und Englische Fassung EN\_ISO\_14067:2018, 2019
- [ISO20] ISO/TC 207/SC1: ISO 14009:2020 - Umweltmanagementsysteme - Leitlinien zur Einbeziehung der Kreislaufführung von Materialien bei Design und Entwicklung - Environmental management systems — Guidelines for incorporating material circulation in design and development, 2020
- [ISO23] ISO/TC 207/SC 7: ISO 14068-1:2023 - Management des Klimawandels - Übergang zu Netto-Null - Teil 1: Treibhausgasneutralität - Climate change management - Transition to net zero - Part 1: Carbon neutrality, 2023
- [ISO24a] ISO/TC 323: ISO 59004:2024 - Circular economy — Vocabulary, principles and guidance for implementation, 2024

- [ISO24b] ISO/TC 323: ISO 59020:2024 - Circular Economy - Measuring and assessing circularity performance, 2024
- [ISO24c] ISO/TC 207/SC 5: ISO/DIS 14075 - Environmental management - Principles and framework for social life cycle assessment, 2024
- [ISO24d] ISO/TC 323: ISO 59010:2024 - Circular economy — Guidance on the transition of business models and value networks, 2024
- [ISO96] ISO/TC 207: DIN EN ISO 14001:1996-10 Umweltmanagementsysteme - Spezifikationen mit Anleitung zur Anwendung | Environmental management systems - Specifications with guidance for use (ISO 14001:1996), 1996
- [ISO97] ISO/TC 207: DIN EN ISO 14040:1997-08 Umweltmanagement - Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen | Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:1997), 1997
- [ISO98] ISO/TC 207: DIN EN ISO 14041:1998-11 Umweltmanagement - Ökobilanz - Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz | Environmental management - Life cycle assessment - Goal and scope definition and life cycle inventory analysis (ISO 14041:1998), 1998
- [JaLK13] JAGTAP, SANTOSH ; LARSSON, ANDREAS ; KANDACHAR, PRABHU: Design and development of products and services at the Base of the Pyramid: a review of issues and solutions. In: International Journal of Sustainable Society Bd. 5, Nr. 3, S. 207, 2013
- [Janc07] JAN CAREL DIEHL, HENRI CHRISTIAANS: Developing Products and Services for the Base of the Pyramid. In: . Cape Town, 2007
- [Jesw03] JESWIET, J.: A definition for life cycle engineering. In: 36th CIRP international seminar on manufacturing systems. Saarbrücken, 2003, S. 17–22
- [JHTL23] JI, XUZHENG ; HUANG, JIANYING ; TENG, LIN ; LI, SHUHUI ; LI, XIAO ; CAI, WEILONG ; CHEN, ZHONG ; LAI, YUEKUN: Advances in particulate matter filtration: Materials, performance, and application. In: Green Energy & Environment Bd. 8, Nr. 3, S. 673–697, 2023
- [Join15] JOINT RESEARCH CENTRE - EUROPEAN COMMISSION: European Platform on LCA - List of tools. URL [/http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ResourceDirectory/toolList.vm](http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ResourceDirectory/toolList.vm). - abgerufen am 09.01.2015
- [JoKB21] JORGENSEN, BETHANY ; KRASNY, MARIANNE ; BAZTAN, JUAN: Volunteer beach cleanups: civic environmental stewardship combating global plastic pollution. In: Sustainability Science Bd. 16, Nr. 1, S. 153–167, 2021
- [Jona04] JONATHAN M. WOODHAM: A Dictionary of Modern Design. 1. Aufl. : Oxford University Press, 2004 — ISBN 978-0-19-280097-8
- [JoPa16] JOYCE, ALEXANDRE ; PAQUIN, RAYMOND L.: The triple layered business model canvas: A tool to design more sustainable business models. In: Journal of Cleaner Production Bd. 135, S. 1474–1486, 2016
- [Jord79] JORDAN, W., WEEGE, R.D: Recycling beginnt in der Konstruktion Bd. Konstruktion: Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe, Nr. 31, 1979
- [Jung22] JUNGFLAISCH, FELIX: Entwicklung eines Wasserfilters mittels Positive Impact Product Engineering (Masterarbeit). Saarbrücken : Universität des Saarlandes, 2022
- [KaHH23] KARA, SAMI ; HERRMANN, CHRISTOPH ; HAUSCHILD, MICHAEL: Operationalization of life cycle engineering. In: Resources, Conservation and Recycling Bd. 190, S. 106836, 2023
- [Kajo16] KAJO GMBH: Produktinformation Nr. 63226000 KAJO-BIO-Wälzlagerfett GE 2. URL <https://shop.schusterundsohn.de/wp-content/uploads/2021/02/PDB-BIO-Waelzla-gerfett-GE-2.pdf>. - abgerufen am 22.11.2024
- [Kajo24] KAJO GMBH: Produktinformation Nr. 66260000 KAJO®-BIO-Grease LZR 2. URL <https://eshop.diermeier->

- energie.de/media/92/1c/91/1713778856/1962\_PDB\_1962.pdf?1713778856. - abgerufen am 22.11.2024
- [KAPS17] KÜCKENS, MATHIS ; ALBRECHT, SILKE ; PARTL, ALEXANDER ; SEIGE, CAROLINE ; ASMUTH, TOBIAS: Die Große Beschleunigung - Arbeitsblatt zur politischen Bildung, 2017
- [KeMe93] KEOLEIAN, GREGORY A ; MENEREY, DAN: Life Cycle Design Guidance Manual, 1993
- [Keys88] KEYS, L.K.: Design for manufacture; design for the life-cycle; systems life-cycle engineering. In: Fifth IEEE/CHMT International Electronic Manufacturing Technology Symposium, 1988, 'Design-to-Manufacturing Transfer Cycle. Lake Buena Vista, FL, USA : IEEE, 1988, S. 62–72
- [KHSS17] KÜHNEN, MICHAEL ; HAHN, RÜDIGER ; SILVA, SAMANTHI ; SCHALTEGGER, STEFAN: Verständnis und Messung sozialer und positiver Nachhaltigkeitswirkungen: Erkenntnisse aus Literatur, Praxis und Delphi Studien - Arbeitspapier Nr. 1 im Rahmen des Projekts „Der Handabdruck: Ein komplementäres Maß positiver Nachhaltigkeitswirkung von Produkten“ (in Zusammenarbeit mit Eberle, U., Schmid, M., Beckmann, J., Eisenhauer, P. & Hermann, C.) : Lüneburg: Verein CSM e.V., 2017
- [Klei09] KLEINE, ALEXANDRO: Operationalisierung einer Nachhaltigkeitsstrategie. Wiesbaden : Gabler, 2009 — ISBN 978-3-8349-1552-8
- [Klöp03] KLÖPFER, WALTER: Life-Cycle based methods for sustainable product development. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 8, Nr. 3, S. 157–159, 2003
- [Klöp08] KLÖPFER, WALTER: Life cycle sustainability assessment of products: (with Comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95). In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 13, Nr. 2, S. 89–95, 2008
- [Klöp12] KLÖPFER, DR WALTER: Von den frühen Ökobilanzen zu ISO 14040ff - mit einigen neueren Trends, 2012
- [Klöp91] KLÖPFER, WALTER: Produktlinienanalyse und Okobilanz, 1991
- [KoFM23] KOCH, DANIEL ; FRIEDL, ANTON ; MIHALYI, BETTINA: Influence of different LCIA methods on an exemplary scenario analysis from a process development LCA case study. In: Environment, Development and Sustainability Bd. 25, Nr. 7, S. 6269–6293, 2023
- [Köll17] KÖLLNER, CHRISTIANE: Fahrwerk | Michelin zeigt Reifen mit biologisch abbaubarer Lauf-  
fläche |. URL <https://www.springerprofessional.de/fahrwerk/car-to-x/michelin-zeigt-reifen-mit-biologisch-abbaubarer-laufflaeche/12458556>. - abgerufen am 06.12.2024 — springerprofessional.de
- [Koll79] KOLLER, RUDOLF: Konstruktionsmethode für den Maschinen-, Geräte- und Apparatebau, Hochschultext. Berichtigter Nachdr. der 1. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer, 1979 — ISBN 978-3-540-07444-1
- [Koll98] KOLLER, RUDOLF: Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. 4., neubearb. und erw. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer, 1998 — ISBN 978-3-642-80418-2
- [Koni22] KONIETZKO, JAN: Moving beyond carbon tunnel vision with a sustainability data strategy. URL <https://www.forbes.com/sites/cognizant/2022/04/07/moving-beyond-carbon-tunnel-vision-with-a-sustainability-data-strategy/>. - abgerufen am 24.07.2024
- [KöVi24] KÖNIG, KRISTIAN ; VIELHABER, MICHAEL: Rethinking customer satisfaction towards more sustainable products – Sufficiency within the extended Kano Model. In: NordDesign , 2024
- [Krem07] KREMIN-BUCH, BEATE: Strategisches Kostenmanagement: Grundlagen und moderne Instrumente; mit Fallstudien, Lehrbuch. 4., überarb. Aufl. Wiesbaden : Gabler, 2007 — ISBN 978-3-8349-0329-7

- [KRUD03] KEATING, CHARLES ; ROGERS, RALPH ; UNAL, RESIT ; DRYER, DAVID ; SOUSA-POZA, ANDRES ; SAFFORD, ROBERT ; PETERSON, WILLIAM ; RABADI, GHAITH: System of Systems Engineering. In: Engineering Management Journal Bd. 15, Nr. 3, S. 36–45, 2003
- [KSBE19] KÜHNEN, MICHAEL ; SILVA, SAMANTHI ; BECKMANN, JANPETER ; EBERLE, ULRIKE ; HAHN, RÜDIGER ; HERMANN, CHRISTOPH ; SCHALTEGGER, STEFAN ; SCHMID, MARIANNE: Contributions to the sustainable development goals in life cycle sustainability assessment: Insights from the Handprint research project. In: NachhaltigkeitsManagementForum | Sustainability Management Forum Bd. 27, Nr. 1, S. 65–82, 2019
- [KSHW17] KAMMERL, DANIEL ; SCHOCKENHOFF, DAMIAN ; HOLLAUER, CHRISTOPH ; WEIDMANN, DOMINIK ; LINDEMANN, UDO: A Framework for Sustainable Product Development. In: Sustainability Through Innovation in Product Life Cycle Design. Singapore, 2017 — ISBN 978-981-10-0469-8, S. 21–32
- [KüHa19] KÜHNEN, MICHAEL ; HAHN, RÜDIGER: From SLCA to Positive Sustainability Performance Measurement: A Two-Tier Delphi Study. In: Journal of Industrial Ecology Bd. 23, Nr. 3, S. 615–634, 2019
- [KuPi05] KUN-MO LEE ; PIL-JU PARK ; COMMITTEE ON TRADE AND INVESTMENT (Hrsg.): ECODESIGN Best Practice of ISO/TR 14062. Ajou University, Korea, 2005
- [KüSH22] KÜHNEN, MICHAEL ; SILVA, SAMANTHI ; HAHN, RÜDIGER: From negative to positive sustainability performance measurement and assessment? A qualitative inquiry drawing on framing effects theory. In: Business Strategy and the Environment Bd. 31, Nr. 5, S. 1985–2001, 2022
- [LABK16] Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: LINDEMANN, U. ; ALBERS, A. ; BEHRENDT, M. ; KLINGER, S. ; MATROS, K.: Handbuch Produktentwicklung. München : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016 — ISBN 978-3-446-44518-5
- [Lang18] LANGE, STEFFEN: Macroeconomics without growth: sustainable economies in neoclassical, keynesian and marxian theories, Wirtschaftswissenschaftliche Nachhaltigkeitsforschung. Marburg : Metropolis-Verlag, 2018 — ISBN 978-3-7316-1298-8
- [LBGJ23] LU, JING ; BURTON, JOANNE ; GARZON-GARCIA, ALEXANDRA ; JACKSON, CAMERON ; NEWHAM, MICHAEL ; BLOESCH, PHILIP ; RAMSAY, IAN ; ROGERS, JENNY ; U. A.: Scientific challenges and biophysical knowledge gaps for implementing nutrient offset projects. In: Journal of Environmental Management Bd. 339, S. 117902, 2023
- [LeLL18] LEWRICK, MICHAEL ; LINK, PATRICK ; LEIFER, LARRY: The Design Thinking Playbook: : mindful digital transformation of teams, products, services, businesses and ecosystems. Hoboken, New Jersey : Wiley, 2018 — ISBN 978-1-119-46747-2
- [LFRD15] LOPES, DIANA ; FERREIRA, MARIA J. ; RUSSO, RUI ; DIAS, JOANA M.: Natural and synthetic rubber/waste – Ethylene-Vinyl Acetate composites for sustainable application in the footwear industry. In: Journal of Cleaner Production Bd. 92, S. 230–236, 2015
- [LiBB15] LIEDTKE, CHRISTA ; BUHL, JOHANNES ; BORGMANN, ALICA: Nachhaltiges Design und Suffizienz – ressourcenleicht durchs Leben. In: uwf UmweltWirtschaftsForum Bd. 23, Nr. 1–2, S. 11–14, 2015
- [Life24] LIFE CYCLE INITIATIVE: GLAD - Global LCA Data Access network. URL <https://www.globallcadataaccess.org/>. - abgerufen am 21.01.2025
- [LinZ04] LINZ, MANFRED: Weder Mangel noch Übermaß - Über Suffizienz und Suffizienzforschung : oekom verlag, 2004 — ISBN 978-3-86581-526-2
- [LiSV17] LINDER, MARCUS ; SARASINI, STEVEN ; VAN LOON, PATRICIA: A Metric for Quantifying Product-Level Circularity. In: Journal of Industrial Ecology Bd. 21, Nr. 3, S. 545–558, 2017

- [Livi14] LIVING FUTURE INSTITUTE OF AUSTRALIA, LFIA: Living Product Challenge. URL <https://living-future.org.au/living-product-challenge/>. - abgerufen am 22.08.2024 — Living Future Institute of Australia
- [Ljun07] LJUNGBERG, LENNART Y.: Materials selection and design for development of sustainable products. In: *Materials & Design* Bd. 28, Nr. 2, S. 466–479, 2007
- [LöAM24] LÖSCHKE, SINA ; ADOLPH, KARIN ; MAIER, BJÖRN: Kohlendioxidentnahmeverfahren an Land – wie sie funktionieren und warum wir sie brauchen, um unsere Klimaziele zu erreichen, Zenodo, 2024
- [LoMa74] LOVELOCK, JAMES E. ; MARGULIS, LYNN: Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the gaia hypothesis. In: *Tellus* Bd. 26, Nr. 1–2, S. 2–10, 1974
- [LöSH24] LÖVDAHL, JOSEFIN ; SCHULTE, JESKO ; HALLSTEDT, SOPHIE I: A Literature Review of Approaches for Assessing Product Sustainability Performance in Early Phases of the Product Innovation Process. In: *NordDesign*, 2024
- [LPLH23] LEIPOLD, SINA ; PETIT-BOIX, ANNA ; LUO, ANRAN ; HELANDER, HANNA ; SIMOENS, MACHTELD ; ASHTON, WESLYNNE S. ; BABBITT, CALLIE W. ; BALA, ALBA ; U. A.: Lessons, narratives, and research directions for a sustainable circular economy. In: *Journal of Industrial Ecology* Bd. 27, Nr. 1, S. 6–18, 2023
- [LSFH22] LINDNER, CHRISTOPH ; SCHMITT, JAN ; FISCHER, ELENA ; HEIN, JULIA: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen, 2022
- [Lüde10] LÜDEKE-FREUND, FLORIAN: Towards a Conceptual Framework of Business Models for Sustainability, 2010
- [LüGB19] LÜDEKE-FREUND, FLORIAN ; GOLD, STEFAN ; BOCKEN, NANCY M. P.: A Review and Typology of Circular Economy Business Model Patterns. In: *Journal of Industrial Ecology* Bd. 23, Nr. 1, S. 36–61, 2019
- [LuLa06] LUTTROPP, CONRAD ; LAGERSTEDT, JESSICA: EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. In: *Journal of Cleaner Production* Bd. 14, Nr. 15–16, S. 1396–1408, 2006
- [LuTC23] LUTHIN, ANNA ; TRAVERSO, MARZIA ; CRAWFORD, ROBERT H.: Circular life cycle sustainability assessment: An integrated framework. In: *Journal of Industrial Ecology*, S. jiec.13446, 2023
- [LZWX21] LIU, WENGUO ; ZUO, HAIBIN ; WANG, JINGSONG ; XUE, QINGGUO ; REN, BINGLANG ; YANG, FAN: The production and application of hydrogen in steel industry. In: *International Journal of Hydrogen Energy* Bd. 46, Nr. 17, S. 10548–10569, 2021
- [LZXG11] LU, B. ; ZHANG, J. ; XUE, D. ; GU, P.: Systematic Lifecycle Design for Sustainable Product Development. In: *Concurrent Engineering* Bd. 19, Nr. 4, S. 307–324, 2011
- [Mack91] MACKENZIE, DOROTHY: *Green Design: Design for the Environment*. London : King, 1991 — ISBN 978-1-85669-001-0
- [MaCu92] MANZINI, EZIO ; CULLARS, JOHN: Prometheus of the Everyday: The Ecology of the Artificial and the Designer's Responsibility. In: *Design Issues* Bd. 9, Nr. 1, S. 5, 1992
- [Maes23] MAEST, ANN: Remining for Renewable Energy Metals: A Review of Characterization Needs, Resource Estimates, and Potential Environmental Effects. In: *Minerals* Bd. 13, Nr. 11, S. 1454, 2023
- [Manz90] MANZINI, E.: The New Frontiers: Design Must Change and Mature. In: *Design*, Nr. 501, 1990
- [Manz94] MANZINI, EZIO: Design, Environment and Social Quality: From „Existenzminimum“ to „Quality Maximum“. In: *Design Issues*, Nr. Vol 10 No. 1, S. 37–43, 1994
- [MAPS10] MANFREDI, SIMONE ; ALLACKER, KAREN ; PELLETIER, NATHAN ; DE SOUZA, DANIELLE MAIA: Product Environmental Footprint (PEF) Guide. In: *Joint Research Center*, S. 160, 2010

- [Mazz20] MAZZI, ANNA: Introduction. Life cycle thinking. In: Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making : Elsevier, 2020 — ISBN 978-0-12-818355-7, S. 1–19
- [MBDD07] MILÀ I CANALS, LLORENÇ ; BAUER, CHRISTIAN ; DEPESTELE, JOCHEN ; DUBREUIL, ALAIN ; FREIERMUTH KNUCHEL, RUTH ; GAILLARD, GÉRARD ; MICHELSEN, OTTAR ; MÜLLER-WENK, RUEDI ; U. A.: Key Elements in a Framework for Land Use Impact Assessment Within LCA (11 pp). In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 12, Nr. 1, S. 5–15, 2007
- [MBFH23a] MOORE, DANIEL ; BACH, VANESSA ; FINKBEINER, MATTHIAS ; HONKOMP, THERESA ; AHN, HEINZ ; SPRENGER, MADLEN ; FROESE, LINDA ; GRATZEL, DIRK: Offsetting environmental impacts beyond climate change: the Circular Ecosystem Compensation approach. In: Journal of Environmental Management Bd. 329, S. 117068, 2023
- [MBFH23b] MOORE, DANIEL ; BACH, VANESSA ; FINKBEINER, MATTHIAS ; HONKOMP, THERESA ; AHN, HEINZ: „Gemeinsam umweltneutral handeln“-Standard – Mehrdimensionale Analyse, Reduktion und Kompensation von Umweltkosten – Leitfaden Version 1.12, 2023
- [MBLC07] MILLET, D. ; BISTAGNINO, L. ; LANZAVECCHIA, C. ; CAMOUS, R. ; POLDMA, TIJU: Does the potential of the use of LCA match the design team needs? In: Journal of Cleaner Production Bd. 15, Nr. 4, S. 335–346, 2007
- [McBh12] McMAHON, MUIREANN ; BHAMRA, TRACY: ‘Design Beyond Borders’: international collaborative projects as a mechanism to integrate social sustainability into student design practice. In: Journal of Cleaner Production Bd. 23, Nr. 1, S. 86–95, 2012
- [McBr02] McDONOUGH, WILLIAM ; BRAUNGART, MICHAEL: Cradle to cradle: remaking the way we make things. 1st ed. New York : North Point Press, 2002 — ISBN 978-0-86547-587-8
- [MDRC16] MORENO, MARIALE ; DE LOS RIOS, CAROLINA ; ROWE, ZOE ; CHARNLEY, FIONA: A Conceptual Framework for Circular Design. In: Sustainability Bd. 8, Nr. 9, S. 937, 2016
- [MeCl72] MEADOWS, D. H. ; CLUB OF ROME (Hrsg.): The Limits to growth: a report for the Club of Rome’s project on the predicament of mankind. New York : Universe Books, 1972 — ISBN 978-0-87663-165-2
- [MeCo17] MESTRE, ANA ; COOPER, TIM: Circular Product Design. A Multiple Loops Life Cycle Design Approach for the Circular Economy. In: The Design Journal Bd. 20, Nr. sup1, S. S1620–S1635, 2017
- [MeDM11] MELLES, GAVIN ; DE VERE, IAN ; MISIC, VANJA: Socially responsible design: thinking beyond the triple bottom line to socially responsive and sustainable product design. In: CoDesign Bd. 7, Nr. 3–4, S. 143–154, 2011
- [MeUh17] MEIER, H. ; UHLMANN, E. (Hrsg.): Industrielle Produkt-Service Systeme. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2017 — ISBN 978-3-662-48017-5
- [MGAJ22] MESA, JAIME A. ; GONZALEZ-QUIROGA, ARTURO ; AGUIAR, MARINA FERNANDES ; JUGEND, DANIEL: Linking product design and durability: A review and research agenda. In: Heliyon Bd. 8, Nr. 9, S. e10734, 2022
- [MGMG17] MATTHIESEN, SVEN ; GWOSCH, THOMAS ; MANGOLD, SEBASTIAN ; GRAUBERGER, PATRIC ; STECK, MICHAEL ; CERSOWSKY, STEFAN: Frontloading in der Produktentwicklung von Power-Tools durch frühe Validierung mit Hilfe von leistungsskalierten Prototypen, 2017
- [MNMV22] MÖRSDORF, SIMON ; NEUMANN, DOMINIK ; MOHNKE, JONAS ; VIELHABER, MICHAEL: Beyond Sustainable Products – Concept for a Positive Impact Product Engineering (PIPE). In: Procedia CIRP Bd. 105, S. 19–24, 2022
- [MoMV24] MOHNKE, JONAS ; MÖRSDORF, SIMON ; VIELHABER, MICHAEL: X-PEC – A Problem Expanding and Creativity Framework for Generating Effective Ideas to Improve Sustainability in the Early Stages of Product Development, 2024

- [MopB15] MORRISON-SAUNDERS, A. ; POPE, J. ; BOND, A. J. (Hrsg.): Handbook of sustainability assessment, Research handbooks on impact assessment. Cheltenham, UK : Edward Elgar Publishing, 2015 — ISBN 978-1-78347-136-2
- [MöVi23] MÖRSDORF, SIMON ; VIELHABER, MICHAEL: Positive Impact Product Engineering (PIPE) Model - The way to net-positive sustainable products. In: Procedia CIRP, 2023
- [MSGH17] MENDOZA, JOAN MANUEL F. ; SHARMINA, MARIA ; GALLEGO-SCHMID, ALEJANDRO ; HEYES, GRAEME ; AZAPAGIC, ADISA: Integrating Backcasting and Eco-Design for the Circular Economy: The BECE Framework. In: Journal of Industrial Ecology Bd. 21, Nr. 3, S. 526–544, 2017
- [MSSS19] MORRISON, EVAN ; SHIPMAN, ALEXANDRA ; SHRESTHA, SHRADHA ; SQUIER, EVAN ; STACK WHITNEY, KAITLIN: Evaluating The Ocean Cleanup, a Marine Debris Removal Project in the North Pacific Gyre, Using SWOT Analysis. In: Case Studies in the Environment Bd. 3, Nr. 1, S. 1–6, 2019
- [Müll78] MÜLLER-WENK, RUEDI: Die ökologische Buchhaltung: ein Informations- und Steuerungsinstrument für umweltkonforme Unternehmenspolitik. Frankfurt a. M. : Campus-Verlag, 1978 — ISBN 978-3-593-32250-6
- [Muth21] MUTHU, S. S. (Hrsg.): Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA), Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes. Singapore : Springer Singapore, 2021 — ISBN 9789811645617
- [Nabu07] NABU RHEINLAND-PFALZ: Die Umsetzung von Kompensationsmaßnahmen im Rahmen der Bauleitplanung in Rheinland-Pfalz. URL [https://rlp.nabu.de/imperia/md/content/rlp/die\\_umsetzung\\_von\\_kompensationsma\\_\\_nahmen\\_im\\_rahmen\\_der\\_bauleitplanung\\_in\\_rheinland-pfalz.pdf](https://rlp.nabu.de/imperia/md/content/rlp/die_umsetzung_von_kompensationsma__nahmen_im_rahmen_der_bauleitplanung_in_rheinland-pfalz.pdf). - abgerufen am 29.07.2024
- [NaLu16] NAEFE, PAUL ; LUDERICH, JÖRG: Konstruktionsmethodik für die Praxis. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016 — ISBN 978-3-658-13870-7
- [Navr23] NAVRUD, STÅLE: Environmental Unit Cost Lists. In: UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.), 2023
- [NBMK21] NORRIS, GREGORY A. ; BUREK, JASMINA ; MOORE, ELIZABETH A. ; KIRCHAIN, RANDOLPH E. ; GREGORY, JEREMY: Sustainability Health Initiative for NetPositive Enterprise handprint methodological framework. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 26, Nr. 3, S. 528–542, 2021
- [Neug16] NEUGEBAUER, SABRINA: Enhancing Life Cycle Sustainability Assessment - Tiered Approach and new Characterization Models for Social Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing, S. 228, 2016
- [NMSF15] NEUGEBAUER, SABRINA ; MARTINEZ-BLANCO, JULIA ; SCHEUMANN, RENÉ ; FINKBEINER, MATTHIAS: Enhancing the practical implementation of life cycle sustainability assessment – proposal of a Tiered approach. In: Journal of Cleaner Production Bd. 102, S. 165–176, 2015
- [NoPh15] NORRIS, GREGORY ; PHANSEY, ASHEEN: Handprints of Product Innovation: A Case Study of Computer-aided Design in the Automotive Sector, 2015
- [Norr01] NORRIS, GREGORY A.: Integrating life cycle cost analysis and LCA. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 6, Nr. 2, S. 118–120, 2001
- [Norr13] NORRIS, GREGORY: The New Requirement for Social Leadership: Healing - An Introduction to Handprints and Handprinting. In: GRÖSCHL, S.: Uncertainty, Diversity and The Common Good. London : Gower Publishing, 2013 — ISBN 978-1-315-54938-5
- [Norr15] NORRIS, GREGORY: Handprint-Based NetPositive Assessment, 2015
- [Norr17] NORRIS, GREGORY: A Framework for Comparing and Understanding Net Positive Goals, 2017

- [ObDC96] O'BRIEN, MARTIN ; DOIG, ALISON ; CLIFT, ROLAND: Social and environmental life cycle assessment (SELCA): Approach and methodological development. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 1, Nr. 4, S. 231–237, 1996
- [Ocea24a] THE OCEAN CLEANUP: What types of plastic are in the ocean? URL <https://theoceancleanup.com/faq/what-types-of-plastic-do-you-find-in-the-middle-of-the-ocean/>. - abgerufen am 30.10.2024 — The Ocean Cleanup
- [Ocea24b] OCEANWORKS INC.: Post-Consumer Recycled HDPE. URL <https://oceanworks.co/pages/hdpe>. - abgerufen am 21.11.2024 — Oceanworks
- [Ocea24c] THE OCEAN CLEANUP: About Us. URL <https://theoceancleanup.com/about/>. - abgerufen am 21.11.2024 — The Ocean Cleanup
- [Ocea24d] OCEAN MATERIAL: Recyceltes HDPE Granulat (Pellets) Schwarz | Ocean Material® Shop. URL <https://de.oceanmaterial.com/our-products/maritimes-plastik/hdpe/hdpe-pellet-black/>. - abgerufen am 27.11.2024 — Ocean Material
- [Ocea24e] OCEANWORKS INC.: IMPAC+. URL <https://oceanworks.co/pages/impact>. - abgerufen am 21.11.2024 — Oceanworks
- [OCFH23] OGLE, STEPHEN M. ; CONANT, RICHARD T. ; FISCHER, BART ; HAYA, BARBARA K. ; MANNING, DALE T. ; MCCARL, BRUCE A. ; ZELIKOVA, TAMARA JANE: Policy challenges to enhance soil carbon sinks: the dirty part of making contributions to the Paris agreement by the United States. In: Carbon Management Bd. 14, Nr. 1, S. 2268071, 2023
- [OdOL21] ODUQUE DE JESUS, JOSÉ ; OLIVEIRA-ESQUERRE, KARLA ; LIMA MEDEIROS, DIEGO: Integration of Artificial Intelligence and Life Cycle Assessment Methods. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Bd. 1196, Nr. 1, S. 012028, 2021
- [Oecd16] OECD: Biodiversity Offsets: Effective Design and Implementation : OECD, 2016 — ISBN 978-92-64-22245-8
- [OKHC17] ONAT, NURI ; KUCUKVAR, MURAT ; HALOG, ANTHONY ; CLOUTIER, SCOTT: Systems Thinking for Life Cycle Sustainability Assessment: A Review of Recent Developments, Applications, and Future Perspectives. In: Sustainability Bd. 9, Nr. 5, S. 706, 2017
- [Ökoi87] ÖKO-INSTITUT (Hrsg.): Produktlinienanalyse: Bedürfnisse, Produkte und ihre Folgen; [ein Diskussionsbeitrag aus dem Öko-Institut], Wege aus der Krise. Köln : Kölner Volksblatt-Verl, 1987 — ISBN 978-3-923243-27-3
- [OKTZ16] ONAT, NURI CIHAT ; KUCUKVAR, MURAT ; TATARI, OMER ; ZHENG, QIPENG PHIL: Combined application of multi-criteria optimization and life-cycle sustainability assessment for optimal distribution of alternative passenger cars in U.S. In: Journal of Cleaner Production Bd. 112, S. 291–307, 2016
- [OnKT14] ONAT, NURI ; KUCUKVAR, MURAT ; TATARI, OMER: Towards Life Cycle Sustainability Assessment of Alternative Passenger Vehicles. In: Sustainability Bd. 6, Nr. 12, S. 9305–9342, 2014
- [Orga24] ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT: OECD.Stat - OECD Statistics. URL <https://stats.oecd.org/>. - abgerufen am 17.04.2024
- [OsPC10] OSTERWALDER, ALEXANDER ; PIGNEUR, YVES ; CLARK, TIM: Business model generation: a handbook for visionaries, game changers, and challengers. Hoboken, NJ : Wiley, 2010 — ISBN 978-0-470-87641-1
- [PAAV19] PHILIPPOT, MAEVA ; ALVAREZ, GARBIÑE ; AYERBE, ELIXABETE ; VAN MIERLO, JOERI ; MESSAGIE, MAARTEN: Eco-Efficiency of a Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles: Influence of Manufacturing Country and Commodity Prices on GHG Emissions and Costs. In: Batteries Bd. 5, Nr. 1, S. 23, 2019
- [PaBe77] PAHL, GERHARD ; BEITZ, WOLFGANG: Konstruktionslehre: Handbuch für Studium und Praxis. Berlin Heidelberg : Springer, 1977 — ISBN 978-3-540-07879-1

- [Papa72] PAPANEK, VICTOR J.: Design for the real world: human ecology and social change. 1st American ed. New York : Pantheon Books, 1972 — ISBN 978-0-394-47036-8
- [PBF07] PAHL, G. ; BEITZ, W. ; FELDHUSEN, J. ; GROTE, K.-H. ; BEITZ, W. ; FELDHUSEN, J. ; GROTE, K.-H. (Hrsg.): Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung, Springer-Lehrbuch. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007 — ISBN 978-3-540-34060-7
- [PBJV21] PAPAI, SIMON ; DE BRUYN, SANDER ; JUIJN, DAAN ; DE VRIES, JOUKIE: The value of human toxicity - An explorative research for use in environmental prices ( Nr. 21.200390.086) : CE Delft, 2021
- [PCMP12] POUDELET, VICTOR ; CHAYER, JULIE-ANNE ; MARGNI, MANUELE ; PELLERIN, ROBERT ; SAMSON, RÉJEAN: A process-based approach to operationalize life cycle assessment through the development of an eco-design decision-support system. In: Journal of Cleaner Production Bd. 33, S. 192–201, 2012
- [Pehn10] PEHNT, M. (Hrsg.): Energieeffizienz: Ein Lehr- und Handbuch. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2010 — ISBN 978-3-642-14250-5
- [PeTu90] PEARCE, DAVID W. ; TURNER, R. KERRY: Economics of natural resources and the environment. Baltimore : Johns Hopkins University Press, 1990 — ISBN 978-0-8018-3986-3
- [PGHR16] PEÇAS, P. ; GÖTZE, U. ; HENRIQUES, E. ; RIBEIRO, I. ; SCHMIDT, A. ; SYMMANK, C.: Life Cycle Engineering – Taxonomy and State-of-the-Art. In: Procedia CIRP Bd. 48, S. 73–78, 2016
- [Pich20] PICHLER, CORNELIA: Das Leitbild ‚Nachhaltige Entwicklung‘ - eine Einführung. In: Nachhaltige Entwicklung Bd. 46, 2020
- [Plan24a] PLAN INTERNATIONAL E.V.: Für Bildung spenden | Plan International. URL <https://www.plan.de/bildung-und-ausbildung/fuer-bildung-spenden.html>. - abgerufen am 31.07.2024
- [Plan24b] PLAN INTERNATIONAL DEUTSCHLAND, E.V: Hilfe in Afrika: Wir bauen Schulen | Plan International. URL <https://www.plan.de/bildung-und-ausbildung/schulen-in-afrika-bauen.html>. - abgerufen am 31.07.2024
- [PoLo19] POPPE, E. ; LONGMUEß, J. (Hrsg.): Geplante Obsoleszenz: Hinter den Kulissen der Produktentwicklung, Forschung aus der Hans-Böckler-Stiftung. Bd. 194. 1. Aufl. Bielefeld, Germany : transcript Verlag, 2019 — ISBN 978-3-8376-5004-4
- [PoWi21] POLMAN, PAUL ; WINSTON, ANDREW S.: Net positive: how courageous companies thrive by giving more than they take. Boston, MA : Harvard Business Review Press, 2021 — ISBN 978-1-64782-130-2
- [Prés24] PRÉ SUSTAINABILITY B.V.: SimaPro (Release 9.6.0.1), 2024
- [PrHa04] PRAHALAD, COIMBATORE KRISHNARAO ; HART, STUART L.: The Fortune at the Bottom of the Pyramid Bd. 1, Nr. 2, 2004
- [PuMR19] PURVIS, BEN ; MAO, YONG ; ROBINSON, DARREN: Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. In: Sustainability Science Bd. 14, Nr. 3, S. 681–695, 2019
- [PuOM11] PUGLIERI, FABIO NEVES ; OMETTO, ALDO ; MIGUEL, PAULO AUGUSTO CAUCHICK: Eco-design methods for developing new products based on QFD: a literature analysis Bd. 9, S. 7, 2011
- [QKBC23] QUINN, ETHAN C. ; KNAUER, KATRINA M. ; BECKHAM, GREGG T. ; CHEN, EUGENE Y.-X.: Mono-material product design with bio-based, circular, and biodegradable polymers. In: One Earth Bd. 6, Nr. 6, S. 582–586, 2023
- [Radk02] RADKAU, JOACHIM: Natur und Macht: eine Weltgeschichte der Umwelt. Brosch. Sonderausg., 1. Aufl., aktualisierte und erw. Fassung der geb. Aufl. 2000. München : Beck, 2002 — ISBN 978-3-406-48655-5

- [Rawo12] RAWORTH, KATE: A safe and just space for humanity - Can we live within the doughnut? In: , Oxfam Discussion Papers, 2012
- [Rawo18] RAWORTH, KATE ; FREUNDL, H. ; SCHMID, S. (Übers.): Die Donut-Ökonomie: endlich ein Wirtschaftsmodell, das den Planeten nicht zerstört. 1. Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2018 — ISBN 978-3-446-25845-7
- [RBFN20] ROSSI, EFIGÊNIA ; BERTASSINI, ANA CAROLINA ; FERREIRA, CAMILA DOS SANTOS ; NEVES DO AMARAL, WEBER ANTONIO ; OMETTO, ALDO ROBERTO: Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models: Plastic, textile and electro-electronic cases. In: Journal of Cleaner Production Bd. 247, S. 119137, 2020
- [Rebi02] REBITZER, GERALD: Integrating Life Cycle Costing and Life Cycle Assessment for Managing Costs and Environmental Impacts in Supply Chains. In: SEURING, S. ; GOLDBACH, M. (Hrsg.): Cost Management in Supply Chains. Heidelberg : Physica-Verlag HD, 2002 — ISBN 978-3-7908-2515-2, S. 127–146
- [Regu22] REGULATION CONCERNING THE REGISTRATION, EVALUATION, AUTHORISATION AND RESTRICTION OF CHEMICALS: Substances restricted under REACH. URL <https://echa.europa.eu/substances-restricted-under-reach>. - abgerufen am 11.08.2022
- [ReHJ03] REBITZER, GERALD ; HUNKELER, DAVID ; JOLLIET, OLIVIER: LCC-The economic pillar of sustainability: Methodology and application to wastewater treatment: LCC-The Economic Pillar of Sustainability: Methodology and Application to Wastewater Treatment. In: Environmental Progress Bd. 22, Nr. 4, S. 241–249, 2003
- [ReHu03] REBITZER, GERALD ; HUNKELER, DAVID: Life cycle costing in LCM: ambitions, opportunities, and limitations: Discussing a framework. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 8, Nr. 5, S. 253–256, 2003
- [ReVW18] REIKE, DENISE ; VERMEULEN, WALTER J.V. ; WITJES, SJORS: The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. In: Resources, Conservation and Recycling Bd. 135, S. 246–264, 2018
- [RiWP15] RIFAI, SAMI W. ; WEST, THALES A.P. ; PUTZ, FRANCIS E.: “Carbon Cowboys” could inflate REDD+ payments through positive measurement bias. In: Carbon Management Bd. 6, Nr. 3–4, S. 151–158, 2015
- [Robi03] ROBINSON, J.: Future subjunctive: backcasting as social learning. In: Futures Bd. 35, Nr. 8, S. 839–856, 2003
- [Robi90] ROBINSON, JOHN B.: Futures under glass: A Recipe for People Who Hate to Predict. In: Futures Bd. 22, Nr. 8, S. 820–842, 1990
- [Rocc06] ROCCHI, SIMONA: Unlocking new markets Via sustainable innovation and design breakthrough - A few questions for investigation, 2006
- [Röde13] RÖDEL, MICHAEL: Die Invasion der „Nachhaltigkeit“. In: Deutsche Sprache, Nr. 2, S. 3, 2013
- [RoMS17] ROOS, EBERHARD ; MAILE, KARL ; SEIDENFUß, MICHAEL: Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2017 — ISBN 978-3-662-49531-5
- [RRBZ10] RAMANI, KARTHIK ; RAMANUJAN, DEVARAJAN ; BERNSTEIN, WILLIAM Z. ; ZHAO, FU ; SUTHERLAND, JOHN ; HANDWERKER, CAROL ; CHOI, JUN-KI ; KIM, HARRISON ; U. A.: Integrated Sustainable Life Cycle Design: A Review. In: Journal of Mechanical Design Bd. 132, Nr. 9, S. 091004, 2010
- [RSER14] REIF, ALBERT ; SCHULZE, ERNST-DETLEF ; EWALD, JÖRG ; ROTHE, ANDREAS: Waldkalkung – Bodenschutz contra Naturschutz?, 2014

- [RSLB23] RICHARDSON, KATHERINE ; STEFFEN, WILL ; LUCHT, WOLFGANG ; BENDTSEN, JØRGEN ; CORNELL, SARAH E. ; DONGES, JONATHAN F. ; DRÜKE, MARKUS ; FETZER, INGO ; U. A.: Earth beyond six of nine planetary boundaries. In: Science Advances Bd. 9, Nr. 37, S. eadh2458, 2023
- [RSNP09a] ROCKSTRÖM, JOHAN ; STEFFEN, WILL ; NOONE, KEVIN ; PERSSON, ÅSA ; CHAPIN, F. STUART ; LAMBIN, ERIC F. ; LENTON, TIMOTHY M. ; SCHEFFER, MARTEN ; U. A.: A safe operating space for humanity. In: Nature Bd. 461, Nr. 7263, S. 472–475, 2009
- [RSNP09b] ROCKSTRÖM, JOHAN ; STEFFEN, WILL ; NOONE, KEVIN ; PERSSON, ÅSA ; CHAPIN, F. STUART III ; LAMBIN, ERIC ; LENTON, TIMOTHY M. ; SCHEFFER, MARTEN ; U. A.: Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. In: Ecology and Society Bd. 14, Nr. 2, S. art32, 2009
- [Ruck17] RUCKPAUL, ANNE: Synthese-getriebene Analyse technischer Systeme in der Produktentwicklung – Ein Beitrag zum Messen und Verstehen von Analyseprozessen während der Konstruktion unter Einsatz von Eye Tracking. Karlsruhe, KIT, 2017
- [RyJe24] RYBACZEWSKA-BŁĄŻEJOWSKA, MAGDALENA ; JEZERSKI, DOMINIK: Comparison of ReCiPe 2016, ILCD 2011, CML-IA baseline and IMPACT 2002+ LCIA methods: a case study based on the electricity consumption mix in Europe. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 29, Nr. 10, S. 1799–1817, 2024
- [SaPr11] SANTOSH JAGTAP ; PRABHU KANDACHAR: Design for the Base of the Pyramid: Issues and Solutions. In: Research into Design — Supporting Sustainable Product Development, 2011
- [SBFV15] STOFFELS, PASCAL ; BÄHRE, DIRK ; FREY, GEORG ; VIELHABER, MICHAEL: Energy Efficiency Engineering—Towards an Integrated Method Framework for Energy-Oriented Product and Production Development. In: ORAL, A. Y. ; BAHSI ORAL, Z. B. ; OZER, M. (Hrsg.): 2nd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM2014), Springer Proceedings in Energy. Cham : Springer International Publishing, 2015 — ISBN 978-3-319-16900-2, S. 291–297
- [ScAp14] SCHÄFER, PATRICK ; APOSTOLOV, HRISTO: Nachhaltige Produktentwicklung. In: EIGNER, M. ; ROUBANOV, D. ; ZAFIROV, R. (Hrsg.): Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014 — ISBN 978-3-662-43815-2, S. 369–392
- [Scha18] SCHARMER, CLAUS OTTO: The essentials of Theory U: core principles and applications. First edition. Oakland, CA : BK, Berrett-Koehler Publishers, Inc., a BK Business book, 2018 — ISBN 978-1-5230-9440-0
- [Scha24] SCHAEFFLER TECHNOLOGIES AG & Co. KG: 6001-C-2Z>V Rillenkugellager - Datenblatt. URL <https://medias.schaeffler.de/de/produkt/rotary/waelz--und-gleitlager/kugellager/rillenkugellager/6001-c-2z%3ev/p/1847607?text=6001-C-2Z%3EV>. - abgerufen am 22.11.2024
- [Schm94] SCHMIDT-BLEEK, FRIEDRICH: Wie viel Umwelt braucht der Mensch? Basel : Birkhäuser Basel, 1994 — ISBN 978-3-0348-5651-5
- [ScLö20] SCHÄFER, MALTE ; LÖWER, MANUEL: Ecodesign - A Review of Reviews. In: Sustainability Bd. 13, Nr. 1, S. 315, 2020
- [ScTi95] SCHMIDT-BLEEK, FRIEDRICH ; TISCHNER, URSULA: Produktentwicklung: Nutzen gestalten – Natur schonen,, Schriftenreihe des Wirtschaftsförderinstituts ( Nr. 270). Wien, 1995
- [SeSc02] SELL, ROBERT ; SCHIMWEG, RALF: Probleme lösen - In komplexen Zusammenhängen denken, Engineering online library. 6., korrigierte Aufl. Berlin Heidelberg : Springer, 2002 — ISBN 978-3-540-43687-4
- [Seta93] SETAC: Guidelines for Life-Cycle Assessment:: A ‘Code of Practice’ from the workshop held at Sesimbra, Portugal, 31 March – 3 April 1993 Society of Environmental

- Toxicology and Chemistry (SETAC). In: Environmental Science and Pollution Research Bd. 1, Nr. 1, S. 55–55, 1993
- [SGAD15] SONNEMANN, GUIDO; GEMECHU, ESKINDER DEMISSE; ADIBI, NAEEM; DE BRUILLE, VINCENT; BULLE, CÉCILE: From a critical review to a conceptual framework for integrating the criticality of resources into Life Cycle Sustainability Assessment. In: Journal of Cleaner Production Bd. 94, S. 20–34, 2015
- [ShCY15] SHIN, K.L.F. ; COLWILL, J.A. ; YOUNG, R.I.M.: Expanding the Scope of LCA to Include ‘Societal Value’: A Framework and Methodology for Assessing Positive Product Impacts. In: Procedia CIRP Bd. 29, S. 366–371, 2015
- [Shdb24] SHDB - SOCIAL HOTSPOTS DATABASE. URL <http://www.socialhotspot.org/>. - abgerufen am 17.04.2024 — SHDB
- [Shin24] SHINE MIT - MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY: What is SHINE? | shine. URL <https://shine.mit.edu/what-shine>. - abgerufen am 13.08.2024
- [SHKP11] SWARR, THOMAS E. ; HUNKELER, DAVID ; KLÖPPER, WALTER ; PESONEN, HANNA-LEENA ; CIROTH, ANDREAS ; BRENT, ALAN C. ; PAGAN, ROBERT: Environmental life-cycle costing: a code of practice. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 16, Nr. 5, S. 389–391, 2011
- [SiGa02] SIMON, HERMANN ; GATHEN, ANDREAS VON DER: Das große Handbuch der Strategieinstrumente: Werkzeuge für eine erfolgreiche Unternehmensführung. Frankfurt am Main : Campus, 2002 — ISBN 978-3-593-36993-8
- [SKBV18] STOFFELS, PASCAL ; KASPAR, JEROME ; BÄHRE, DIRK ; VIELHABER, MICHAEL: Integrated Product and Production Engineering Approach – A Tool-Based Method for a Holistic Sustainable Design, Process and Material Selection. In: Procedia Manufacturing Bd. 21, S. 790–797, 2018
- [SKMK23] SAINI, AKANKSHA ; KUMAR, ABHISHEK ; MISHRA, SAROJ KUMAR ; KAR, SANJAY KUMAR ; BANSAL, ROHIT: Do environment-friendly toys have a future? An empirical assessment of buyers’ green toys decision-making. In: Environment, Development and Sustainability Bd. 26, Nr. 3, S. 5869–5889, 2023
- [SMBV22] SCHWEITZER, G. M. ; MÖRSDORF, S. ; BITZER, M. ; VIELHABER, M.: Detection of Cause-Effect Relationships in Life Cycle Sustainability Assessment Based on an Engineering Graph. In: Proceedings of the Design Society Bd. 2, S. 1129–1138, 2022
- [SMGD12] SINGH, RAJESH KUMAR ; MURTY, H.R. ; GUPTA, S.K. ; DIKSHIT, A.K.: An overview of sustainability assessment methodologies. In: Ecological Indicators Bd. 15, Nr. 1, S. 281–299, 2012
- [SNPB23] STAPP, JARED ; NOLTE, CHRISTOPH ; POTTS, MATTHEW ; BAUMANN, MATTHIAS ; HAYA, BARBARA K. ; BUTSIC, VAN: Little evidence of management change in California’s forest offset program. In: Communications Earth & Environment Bd. 4, Nr. 1, S. 331, 2023
- [Soci14] SOCIAL ACCOUNTABILITY INTERNATIONAL: Social Accountability 8000 - International Standard, 2014
- [Soci22] SOCIALOFFSET: Social Offset. URL <https://socialoffset.org/>. - abgerufen am 30.07.2024
- [Soci24] SOCIALCARBON: SOCIALCARBON Standard V6.2. URL <https://www.socialcarbon.org>. - abgerufen am 30.05.2024
- [SoEG18] SONEGO, MONIQUE ; ECHEVESTE, MÁRCIA ELISA SOARES ; GALVAN DEBARBA, HENRIQUE: The role of modularity in sustainable design: A systematic review. In: Journal of Cleaner Production Bd. 176, S. 196–209, 2018
- [Sola24] SOLAR LIGHT FOR AFRICA, LTD: Solar Light for Africa Ltd. URL <https://solarlightforafrica.org/>. - abgerufen am 31.07.2024

- [SPBH18] SCHOLZ, ULRICH ; PASTOORS, SVEN ; BECKER, JOACHIM H. ; HOFMANN, DANIELA ; VAN DUN, ROB: Praxishandbuch Nachhaltige Produktentwicklung: Ein Leitfaden mit Tipps zur Entwicklung und Vermarktung nachhaltiger Produkte. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2018 — ISBN 978-3-662-57319-8
- [Spre22] SPREAFICO, CHRISTIAN: An analysis of design strategies for circular economy through life cycle assessment. In: Environmental Monitoring and Assessment Bd. 194, Nr. 3, S. 180, 2022
- [SRRC15] STEFFEN, WILL ; RICHARDSON, KATHERINE ; ROCKSTRÖM, JOHAN ; CORNELL, SARAH E. ; FETZER, INGO ; BENNETT, ELENA M. ; BIGGS, REINETTE ; CARPENTER, STEPHEN R. ; U. A.: Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. In: Science Bd. 347, Nr. 6223, S. 1259855, 2015
- [SSHD09] STASINOPOULOS, PETER ; SMITH, MICHAEL H. ; HANGROVES, KARLSON „CHARLIE“ ; DESHA, CHERYL: Whole system design: an integrated approach to sustainable engineering. London ; Sterling, VA : Earthscan, 2009 — ISBN 978-1-84407-642-0
- [SSML18] SANDER THE BRUYN ; SALIHA AHDOUR ; MARIJN BIJLEVELD ; LONNEKE DE GRAAFF ; ELLEN SCHEP ; ARNO SCHROTEN ; ROBERT VERGEER: Environmental Prices Handbook - EU28 version - Methods and numbers for valuation of environmental impacts. Delft, 2018
- [Stah81] STAHEL, WALTER R: The Product-Life Factor, 1981
- [Step22] STEPANEK, PETER: Sozialwirtschaft nachhaltig managen: Eine Einführung, Basiswissen Sozialwirtschaft und Sozialmanagement. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022 — ISBN 978-3-658-37505-8
- [Stif22] STIFTUNG WARENTEST: Ausgleich für die Klimasünde. In: 11/2022 Finanztest, 2022
- [Su20] SU, D. (Hrsg.): Sustainable Product Development: Tools, Methods and Examples. Cham : Springer International Publishing, 2020 — ISBN 978-3-030-39148-5
- [SYLC19] SAIDANI, MICHAEL ; YANNOU, BERNARD ; LEROY, YANN ; CLUZEL, FRANÇOIS ; KENDALL, ALISSA: A taxonomy of circular economy indicators. In: Journal of Cleaner Production Bd. 207, S. 542–559, 2019
- [TaTF17] TARNE, PETER ; TRAVERSO, MARZIA ; FINKBEINER, MATTHIAS: Review of Life Cycle Sustainability Assessment and Potential for Its Adoption at an Automotive Company. In: Sustainability Bd. 9, Nr. 4, S. 670, 2017
- [Thef24] The Fair Cobalt Alliance. URL <https://www.faircobaltalliance.org/>. - abgerufen am 08.12.2024
- [Thön06] THÖNESSEN, MANFRED: Staubfilterung und immissionshistorische Aspekte am Beispiel fassadenbegrünenden Wilden Weines (*Parthenocissus tricuspidata*), 2006
- [TiFK16] TIWARI, RAJNISH ; FISCHER, LUISE ; KALOGERAKIS, KATHARINA: Frugal Innovation in Scholarly and Social Discourse: An Assessment of Trends and Potential Societal Implications , 2016
- [TiMo23] TISCHNER, URSULA ; MOSER, HEIDRUN: Was ist Ecodesign? Praxishandbuch für Ecodesign inklusive Toolbox. 4. Aufl. Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, 2023
- [Tisc00] TISCHNER, U. (Hrsg.): How to do EcoDesign? A guide for environmentally and economically sound design. Frankfurt am Main, 2000 — ISBN 978-3-89802-025-1
- [Tisc21] TISCHNER, URSULA: Design von Produkt-Dienstleistungssystemen für Kreislaufwirtschaft. In: CEO, ECONCEPT – AGENTUR FÜR NACHHALTIGES DESIGN (Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design 2021 : Prof. Dr.-Ing. habil Ralph H. Stelzer, Prof. Dr.-Ing. Jens Krzywinski, 2021 — ISBN 978-3-95908-450-5, S. 443–460
- [TiVT02] TISCHNER, URSULA ; VERKUJIL, M. ; TUKKER, ARNOLD: First Draft PSS Review. SusProNet Report, draft 15. Pulheim, Germany : TNO-STB, Delft, The Netherlands, 2002

- [TjTh04] TJIPARURO, Z ; THOMPSON, G: Review of maintainability design principles and their application to conceptual design. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering Bd. 218, Nr. 2, S. 103–113, 2004
- [ToHe16] TOMEI, JULIA ; HELLIWELL, RICHARD: Food versus fuel? Going beyond biofuels. In: Land Use Policy Bd. 56, S. 320–326, 2016
- [ToKM15] TOXOPEUS, M.E. ; DE KOEIJER, B.L.A. ; MEIJ, A.G.G.H.: Cradle to Cradle: Effective Vision vs. Efficient Practice? In: Procedia CIRP Bd. 29, S. 384–389, 2015
- [TPGL24] TUPPURA, ANNI ; PALOMÄKI, KATARIINA ; GRÖNMAN, KAISA ; LAKANEN, LAURA ; PÄTÄRI, SATU ; VATANEN, SAIJA ; SOUKKA, RISTO: Communicating positive environmental impacts – User experiences of the carbon handprint approach. In: Journal of Cleaner Production Bd. 434, S. 140292, 2024
- [Trin16] TRINKWASSERWALD E.V.: Erhöhung des Grundwassereintrages durch gezielten Waldumbau. URL <https://trinkwasserwald.de/sites/default/files/files/Erh%C3%B6hung%20des%20Grundwassereintrages%20durch%20Waldumbau.pdf>. - abgerufen am 29.07.2024
- [TSRP00] TISCHNER, URSULA ; SCHMINCKE, EVA ; RUBIK, FRIEDER ; PÖSLER, MARTIN: Was ist EcoDesign? Ein Handbuch für ökologische und ökonomische Gestaltung, Praxis. Frankfurt am Main : Verl. form, 2000 — ISBN 978-3-89802-024-4
- [Tuck22] TUCKER, GRAHAM: Biodiversity offsetting in Germany. In: Institute for European Environmental Policy, 2022
- [TuHH22] TUPALA, ANNA-KAISA ; HUTTUNEN, SUVI ; HALME, PANU: Social impacts of biodiversity offsetting: A review. In: Biological Conservation Bd. 267, S. 109431, 2022
- [Tukk04] TUKKER, ARNOLD: Eight types of product–service system: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet. In: Business Strategy and the Environment Bd. 13, Nr. 4, S. 246–260, 2004
- [TuUn23] TU DELFT ; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM (UNEP): D4S - Design for Sustainability - Manual, Modules, Worksheets. URL <https://d4s-sbs.org/>. - abgerufen am 29.06.2023 — Manual, Modules, Worksheets
- [TzPA20] TZANAKAKIS, VASILEIOS A. ; PARANYCHIANAKIS, NIKOLAOS V. ; ANGELAKIS, ANDREAS N.: Water Supply and Water Scarcity. In: Water Bd. 12, Nr. 9, S. 2347, 2020
- [UBMU09] UNEP/SETAC ; BENOÎT, CATHERINE ; MAZIUN, BERNARD ; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME ; CIRAIG ; INTERUNIVERSITY RESEARCH CENTRE FOR THE LIFE CYCLE OF PRODUCTS, PROCESSES AND SERVICES: Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. Paris, France : United Nations Environment Programme, 2009
- [UBSL20] UNEP ; BENOÎT NORRIS, C., TRAVERSO, M., NEUGEBAUER, S., EKENER, E., ; SCHAUBROECK, T., RUSSO GARRIDO, S., BERGER, M., VALDIVIA, S., ; LEHMANN, A., FINKBEINER, M., ARCESE, G. (EDS.). ; BENOÎT, ÉLISABETH: Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations, 2020
- [Umwe07] UMWELTBUNDESAMT: Maßnahmen zur Reduzierung von Feinstaub und Stickstoffdioxid. URL <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3240.pdf>. - abgerufen am 25.07.2024
- [Umwe10] UMWELTBUNDESAMT: Eutrophierung. URL <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/meere/nutzung-belastungen/eutrophierung>. - abgerufen am 26.07.2024 — Umweltbundesamt
- [Umwe11] UMWELTBUNDESAMT: Ozon. URL <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/ozon>. - abgerufen am 26.07.2024 — Umweltbundesamt

- [Umwe12] UMWELTBUNDESAMT: Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung. URL <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4268.pdf>. - abgerufen am 25.07.2024
- [Umwe13a] UMWELTBUNDESAMT: Überschreitung der Belastungsgrenzen für Versauerung. URL <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/land-oekosysteme/ueberschreitung-der-belastungsgrenzen-fuer>. - abgerufen am 26.07.2024 — Umweltbundesamt
- [Umwe13b] UMWELTBUNDESAMT: Überschreitung der Belastungsgrenzen für Eutrophierung. URL <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/land-oekosysteme/ueberschreitung-der-belastungsgrenzen-fuer-0>. - abgerufen am 26.07.2024 — Umweltbundesamt
- [Umwe13c] UMWELTBUNDESAMT: Nachhaltige Waldwirtschaft. URL <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/nachhaltige-waldwirtschaft>. - abgerufen am 29.07.2024 — Umweltbundesamt
- [Umwe23] UMWELTBUNDESAMT: E-Bikes: Eine umweltfreundliche Alternative zum Pkw. URL <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/nachhaltige-mobilitaet/e-bikes-eine-umweltfreundliche-alternative-pkw>. - abgerufen am 12.08.2024. — Umweltbundesamt
- [UnCD07] UNEP ; CRUL, M.R.M. ; DIEHL, J.C.: Design for Sustainability - A practical Approach for developing economics, 2007
- [Unde15] UN DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS: Sustainable development: The 17 Sustainable Development Goals. URL <https://sdgs.un.org/goals>. - abgerufen am 14.09.2021
- [Unec21] UNECE: UN Regulation No. 154 - Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP) E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.151, 2021
- [Unep15] UNEP/SETAC: Guidance on organizational life cycle assessment, 2015
- [Unep17] UNEP: Guidelines for providing product sustainability information global guidance on making effective environmental, social and economic claims, to empower and enable consumer choice, 2017 — ISBN 978-92-807-3672-4
- [Unep24] UNEP: Summary of the Work of the UNEP Working Group on Nitrogen, 2024
- [Unge00] UN GENERAL ASSEMBLY: United Nations Millennium Declaration (2000). URL <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UN-DOC/GEN/N00/559/51/PDF/N0055951.pdf?OpenElement>. - abgerufen am 05.07.2023
- [Unge15] UN GENERAL ASSEMBLY (Hrsg.): Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. New York, NY, 2015
- [Unic24a] UNICEF: Bildung Spenden: Weltweite Bildungsprojekte für Kinder unterstützen | UNICEF. URL <https://www.unicef.de/informieren/projekte/unicef-ziele-110800/bildung-111238>. - abgerufen am 31.07.2024
- [Unic24b] UNICEF: Hygiene in Krisengebieten: Jetzt spenden & Kindern helfen | UNICEF. URL <https://www.unicef.de/informieren/projekte/unicef-ziele-110800/hygiene-111244>. - abgerufen am 31.07.2024
- [Unic24c] UNICEF: Chancengleichheit Spenden: Kindern Chancen geben | UNICEF. URL <https://www.unicef.de/informieren/projekte/unicef-ziele-110800/chancengleichheit-111240>. - abgerufen am 31.07.2024
- [Unit22] UNITED NATIONS DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, POPULATION DIVISION (2022): World Population Prospects 2022: Summary of Results, UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3., 2022

- [Unit24a] UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION: UNdata - A world of information. URL <http://data.un.org/>. - abgerufen am 17.04.2024
- [Unit24b] UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE: United Nations - Carbon offset platform. URL <https://offset.climateutralnow.org/>. - abgerufen am 23.07.2024
- [Unit87] UNITED NATIONS: Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Geneva, 1987
- [Unit92a] UNITED NATIONS CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (UNCED): Agenda 21 : programme of action for sustainable development. Rio de Janeiro, Brazil, 1992
- [Unit92b] UNITED NATIONS: Rio Declaration on Environment and Development, 1992
- [Unit92c] UNITED NATIONS: United Nations Framework Convention on Climate Change. New York, 1992
- [Unit92d] UNITED NATIONS: Convention on Biological Diversity. Rio de Janeiro, 1992
- [UnLi16] UNEP/SETAC ; LIFE CYCLE INITIATIVE: Global Guidance for life cycle impact assessment indicators - Volume 1, 2016
- [UnLi19] UNEP/SETAC ; LIFE CYCLE INITIATIVE: Global Guidance for life cycle impact assessment indicators - Volume 2, 2019
- [UnVL11] UNEP/SETAC ; VALDIVIA, SONIA ; LIE, CÁSSIA MARIA: Towards A Life Cycle Sustainability Assessment, 2011
- [VaAs20] VAKHITOVA, TATIANA ; ASHBY: Social impact audit tool. In: . Bd. ISSN: 2426-9654. Sweden : S-LCA 2020 Confrence, 2020 — ISBN 978-2-9562141-2-0
- [Vajn14] VAJNA, S. (Hrsg.): Integrated Design Engineering: Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014 — ISBN 978-3-642-41103-8
- [Varb72] VARBLE, DALE L: Social and Environmental Considerations in New Product Development. In: Journal of Marketing, 1972
- [VaSo24] VALDIVIA, S. ; SONNEMANN, G. (Hrsg.): Handbook on Life Cycle Sustainability Assessment : Edward Elgar Publishing, 2024 — ISBN 978-1-80037-865-0
- [VBTS21] VALDIVIA, SONIA ; BACKES, JANA GERTA ; TRAVERSO, MARZIA ; SONNEMANN, GUIDO ; CUCURACHI, STEFANO ; GUINÉE, JEROEN B. ; SCHAUBROECK, THOMAS ; FINKBEINER, MATTHIAS ; U. A.: Principles for the application of life cycle sustainability assessment. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, 2021
- [VDI01] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2343 - Blatt 1 - -Part 1- Recycling elektrischer und elektronischer Geräte Grundlagen und Begriffe Recycling of electrical and electronic products Principles and terminology, 2001
- [VDI02] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2243 - Recyclingorientierte Produktentwicklung - Recycling-oriented product development : Beuth Verlag, Berlin, 2002
- [VDI05] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2884 - Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC), 2005
- [VDI07] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 3330 - Kosten des Materialflusses - Costs of material flow, 2007
- [VDI12a] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 6220 Blatt 1 - Bionik - Konzeption und Strategie - Abgrenzung zwischen bionischen und konventionellen Verfahren/Produkten - Biomimetics Conception and strategy - Differences between biomimetic and conventional methods/products, 2012
- [VDI12b] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 6224 Blatt 1 - Bionische Optimierung - Evolutionäre Algorithmen in der Anwendung - Biomimetic optimization - Application of evolutionary algorithms, 2012

- [VDI12c] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 6225 Blatt 1 - Bionik - Bionische Informationsverarbeitung - Biomimetics - Biomimetic information processing, 2012
- [VDI12d] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 6224 Blatt 2 - Bionische Optimierung - Anwendung biologischer Wachstumsgesetze zur strukturmechanischen Optimierung technischer Bauteile - Biomimetic optimization - Application of biological growth laws for the structuremechanical optimization of technical components, 2012
- [VDI13a] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 6221 Blatt 1 - Bionik - Bionische Oberflächen - Biomimetics - Biomimetic surfaces, 2013
- [VDI13b] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 6223 Blatt 1 - Bionik - Bionische Materialien, Strukturen und Bauteile - Biomimetics - Biomimetic materials, structures and components, 2013
- [VDI14] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 4075 Blatt1 - Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS) - Grundlagen und Anwendungsbereich - Cleaner production (PIUS) Basic principles and area of application, 2014
- [VDI15] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 6226 Blatt 1 - Bionik - Architektur, Ingenieurbau, Industriedesign - Grundlagen - Biomimetics - Architecture, civil engineering, industrial design - Basic principles, 2015
- [VDI16] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 4800-1 - Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien - Resource efficiency - Methodological principles and strategies : Beuth Verlag, Berlin, 2016
- [VDI17a] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 4605 - Nachhaltigkeitsbewertung - Evaluation of sustainability. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2017
- [VDI17b] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 4010 - Zuverlässigkeitsverbesserung in der Produktnutzungsphase - Reliability improvement during the in-service phase, 2017
- [VDI18] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2882 - Obsoleszenzmanagement aus Sicht von Nutzern und Betreibern - Obsolescence management from the perspective of users and operators, 2018
- [VDI19a] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2221 - Blatt 1 - Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung : Beuth Verlag, Berlin, 2019
- [VDI19b] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2221 - Blatt 2 - Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse : Beuth Verlag, Berlin, 2019
- [VDI21] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2206 - Entwicklung mechatronischer und cyberphysischer Systeme : Beuth Verlag, Berlin, 2021
- [VDI86] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2221 - Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte : Beuth Verlag Berlin, 1986
- [VDI87] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2235 - Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren; Methoden und Hilfen - Economical decisions during design engineering process; methods and equipment, 1987
- [VDI90] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2234 - Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur - Basic economical information for design engineers, 1990
- [VDI91] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2243 - Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte - Designing technical products for ease of recycling, 1991
- [VDI97a] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 4600 - Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden | Cumulative energy demand - Terms, definitions, methods of calculation, 1997

- [VDI97b] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2225 Blatt 4 - Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Bemessungslehre - Design engineering methodics - Engineering design at optimum cost - Dimensioning, 1997
- [VDI97c] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2225 Blatt 1 - Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Vereinfachte Kostenermittlung - Design engineering methodics - Engineering design at optimum cost - Simplified calculation of costs, 1997
- [VDI98a] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2225 Blatt 2 - Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Tabellenwerk - Design engineering methodics - Tables for engineering design at optimum cost, 1998
- [VDI98b] VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI 2225 Blatt 3 - Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung - Design engineering methodics - Engineering design at optimum cost - Valuation of costs, 1998
- [Vict12] VICTOR, PETER A.: Growth, degrowth and climate change: A scenario analysis. In: Ecological Economics Bd. 84, S. 206–212, 2012
- [Viva24] VIVA CON AGUA - SANKT PAULI: Wasserprojekte im Überblick. URL <https://www.vivaconagua.org/wasserprojekte/>. - abgerufen am 29.07.2024 — Viva con Agua
- [VTBT20] VISENTIN, CAROLINE ; TRENTIN, ADAN WILLIAM DA SILVA ; BRAUN, ADELI BEATRIZ ; THOMÉ, ANTÔNIO: Life cycle sustainability assessment: A systematic literature review through the application perspective, indicators, and methodologies. In: Journal of Cleaner Production Bd. 270, S. 122509, 2020
- [VVFS24] VALENTE, ANTONIO ; VADENBO, CARL ; FAZIO, SIMONE ; SHOBATAKE, KOICHI ; EDELEN, ASHLEY ; SONDEREGGER, THOMAS ; KARKOUR, SELIM ; KUSCHE, OLIVER ; U. A.: Elementary flow mapping across life cycle inventory data systems: A case study for data interoperability under the Global Life Cycle Assessment Data Access (GLAD) initiative. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 29, Nr. 5, S. 789–802, 2024
- [Waln23] WALDEN, D. D. ; INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (Hrsg.): INCOSE systems engineering handbook. Fifth edition. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons Ltd, 2023 — ISBN 978-1-119-81429-0
- [WBSK20] WEST, THALES A. P. ; BÖRNER, JAN ; SILLS, ERIN O. ; KONTOLEON, ANDREAS: Overstated carbon emission reductions from voluntary REDD+ projects in the Brazilian Amazon. In: Proceedings of the National Academy of Sciences Bd. 117, Nr. 39, S. 24188–24194, 2020
- [WDHA19] WILMSEN, MIRIAM ; DÜHR, KATHARINA ; HEIMICKE, JONAS ; ALBERS, ALBERT: The First Steps Towards Innovation: A Reference Process for Developing Product Profiles. In: Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design Bd. 1, Nr. 1, S. 1673–1682, 2019
- [WeBF19] WEST, THALES A. P. ; BÖRNER, JAN ; FEARNESIDE, PHILIP M.: Climatic Benefits From the 2006–2017 Avoided Deforestation in Amazonian Brazil. In: Frontiers in Forests and Global Change Bd. 2, S. 52, 2019
- [WeBH24] WEST, THALES A.P. ; BOMFIM, BARBARA ; HAYA, BARBARA K.: Methodological issues with deforestation baselines compromise the integrity of carbon offsets from REDD+. In: Global Environmental Change Bd. 87, S. 102863, 2024
- [Weeg81] WEEGE, ROLF-DIETER: Recyclinggerechtes Konstruieren. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1981 — ISBN 978-3-18-400397-5
- [Ween95] VAN WEENEN, J.C.: Towards sustainable product development. In: Journal of Cleaner Production Bd. 3, Nr. 1–2, S. 95–100, 1995

- [Weid06] WEIDEMA, BO P.: The Integration of Economic and Social Aspects in Life Cycle Impact Assessment. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 11, Nr. S1, S. 89–96, 2006
- [Weig22] WEIGERT, KATHARINA: Schlussfolgerungen für das Positive Impact Product Engineering aus bestehenden Methoden der Nachhaltigkeitsanalyse von Produkten (Bachelorarbeit). Saarbrücken : Universität des Saarlandes, 2022
- [West16] WEST, THALES AUGUSTO PUPO: On the Improvement of Tropical Forest-Based Climate Change Mitigation Interventions, University of Florida, 2016
- [Whit93] WHITELEY, NIGEL: Design For Society. Repr. London : Reaktion Books, 1993 — ISBN 978-0-948462-47-4
- [WiTr21] WILKERSON, BROOKE ; TRELLEVIK, LARS-KRISTIAN LUNDE: Sustainability-oriented innovation: Improving problem definition through combined design thinking and systems mapping approaches. In: Thinking Skills and Creativity Bd. 42, S. 100932, 2021
- [Worl22] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO).: Executive Summary. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022 ( Nr. GAW Report No. 278). Geneva : WMO, 2022
- [Worl24a] THE WORLD BANK GROUP: DataBank | The World Bank. URL <https://databank.worldbank.org/home>. - abgerufen am 17.04.2024
- [Worl24b] WORLD BANK: Investing Today in Free School. URL <https://www.worldbank.org/en/news/infographic/2020/06/16/investing-today-in-free-school>. - abgerufen am 31.07.2024 — World Bank
- [Worl24c] WORLD BANK: Development Projects : Burundi Skills for Jobs: Women and Youth Project - P164416. URL <https://projects.worldbank.org/en/projects-operations/project-detail/P164416>. - abgerufen am 31.07.2024 — World Bank
- [Worl24d] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO): Global health initiatives. URL <http://www.emro.who.int/health-topics/global-health-initiative/global-health-initiatives.html>. - abgerufen am 31.07.2024. — World Health Organization - Regional Office for the Eastern Mediterranean
- [WoSG18] WOLTES, STEPHAN ; SCHALLER, STELLA ; GÖTZ, MARKUS ; UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Ratgeber: Freiwillige CO2-Kompensation durch Klimaschutzprojekte, 2018
- [WSMH22] WAFSA, WAFSAURAHMAN ; SHARAAI, AMIR HAMZAH ; MATTHEW, NITANAN KOSHY ; HO, SABRINA ABDULLAH J ; AKHUNDZADA, NOOR AHMAD: Organizational Life Cycle Sustainability Assessment (OLCSA) for a Higher Education Institution as an Organization: A Systematic Review and Bibliometric Analysis. In: Sustainability Bd. 14, Nr. 5, S. 2616, 2022
- [Wwft14] WWF, THE CLIMATE GROUP: Net-Positive - A new way of doing business, 2014
- [WWSB23] WEST, THALES A. P. ; WUNDER, SVEN ; SILLS, ERIN O. ; BÖRNER, JAN ; RIFAI, SAMI W. ; NEIDERMEIER, ALEXANDRA N. ; FREY, GABRIEL P. ; KONTOLEON, ANDREAS: Action needed to make carbon offsets from forest conservation work for climate change mitigation. In: Science Bd. 381, Nr. 6660, S. 873–877, 2023
- [WyCl18] WYNN, DAVID C. ; CLARKSON, P. JOHN: Process models in design and development. In: Research in Engineering Design Bd. 29, Nr. 2, S. 161–202, 2018
- [WyEC19] WYNN, DAVID C. ; ECKERT, CLAUDIA M. ; CLARKSON, P. JOHN: Research into the design and development process: some themes and an overview of the special issue. In: Research in Engineering Design Bd. 30, Nr. 2, S. 157–160, 2019
- [Yami05] YAMIN, F. (Hrsg.): Climate change and carbon markets: a handbook of emission reduction mechanisms. London ; Sterling, VA : Earthscan, 2005 — ISBN 978-1-84407-163-0
- [Zama12] ZAMAGNI, ALESSANDRA: Life cycle sustainability assessment. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 17, Nr. 4, S. 373–376, 2012

- 
- [ZaPS13] ZAMAGNI, ALESSANDRA ; PESONEN, HANNA-LEENA ; SWARR, THOMAS: From LCA to Life Cycle Sustainability Assessment: concept, practice and future directions. In: The International Journal of Life Cycle Assessment Bd. 18, Nr. 9, S. 1637–1641, 2013
- [Ziel15] Ziele für nachhaltige Entwicklung. URL <https://17ziele.de/downloads.html>. - abgerufen am 22.02.2023





**A.2 PI-Kinderlaufrad – Phase 4 – TLBMC**

Finale Version des TLBMC des PI-Kinderlaufrades

Business Model Canvas

<b>Schlüssel-partnerschaften</b> • Zulieferer: • HDPE-Rezyklat • EVA-Rohstoffe • Normteile • Wälzlager • Gleitlager • Schmierfett • Logistikpartner • Kompensations-partner	<b>Schlüssel-aktivitäten</b> • Einkauf • Produktion • Vertrieb • Logistik	<b>Wert-angebote</b> • Kinderlaufrad mit netto-positiver Nachhaltigkeits-wirkung • Ersatzteile • Rücknahme am EoL	<b>Kunden-bezieh-ungen</b> • Direktverkauf • Leasing	<b>Kunden-segmente</b> • Privatkunden • Institutionen und öffentliche Einrichtungen
	<b>Schlüssel-ressourcen</b> • Produktions-technik • Recyclingtechnik		<b>Kanäle</b> • Webseite • Soziale Medien • Fabrikverkauf	
<b>Kostenstruktur</b> • Lohnkosten • Produktionskosten • Einkaufskosten • Verwaltungskosten • Lagerkosten • Vertriebskosten • Kompensationskosten • Kosten durch soziale Projekte			<b>Einnahmequellen</b> • Leasingraten • Einnahmen durch Direktverkauf • Ersatzteilhandel • Ggfs. Verkauf von Rezyklaten	

Environmental Life Cycle BMC

<b>Material-und Pro-duktions-aktivitäten</b> • Externe Produktion: • HDPE-Rezyklat • EVA-Rohstoffe • Normteile • Wälzlager • Gleitlager • Schmierfett	<b>Produktion</b> • Strukturbauteile • Reifen	<b>Funktionaler Wert</b> • Kinderlaufrad	<b>End-of-Life</b> • Rücknahme durch Pfandsystem • Rückversand am Ende des Leasings • Interne Werterhaltung	<b>Nutzungs-phase</b> • Ggfs. Wartung oder Reparatur
	<b>Materialien</b> • Kunststoff-rezyklate • Nachwachsende Rohstoffe • Rezyklierter Stahl		<b>Vertrieb</b> • Nachhaltiges, digitales Marketing	
<b>Negative Umweltauswirkungen</b> • Berechnet durch Ökobilanz • Negative Auswirkungen in roter Kategorie möglichst reduziert		<b>Positive Umweltauswirkungen</b> • Reinigung der Umwelt (durch HDPE-Recycling) • Kompensationsmaßnahmen führen zu netto-positiver Wirkungsbilanz in gelber Kategorie		

Social Stakeholder BMC

<b>Gemein-schaften</b> • Zulieferer • Logistikpartner • Kompensations-partner • Stakeholder, die durch soziale Projekte gefördert werden	<b>Governance</b> • CSR-Richtlinie	<b>Sozialer Wert</b> • Beitrag zu aktiven Leben durch das Kinderlaufrad • Arbeitsplätze im Unternehmen • Arbeitsplätze durch Zukaufteile, Logistik und Kompensations-maßnahmen	<b>Gesell-schaftliche Kultur</b> • Beitrag zum BIP	<b>Endnutzer</b> • Förderung der Gesundheit und Koordination durch Bewegung und eine aktive Lebensweise • Spaß und Freude beim Laufenradfahren • Vorbereitung auf Fahrradfahren
	<b>Mitarbeiter</b> • Einkauf • Produktion • Vertrieb • Lagerhaltung • Verwaltung		<b>Reichweite</b> • Reinigung von Plastikverschmut-zungen weltweit • Vertrieb zunächst nur in Deutschland	
<b>Negative soziale Auswirkungen</b> • Nicht zu erwarten		<b>Positive soziale Auswirkungen</b> • Entwicklungsförderung der nutzenden Kinder • Schaffung von Arbeitsplätzen • Umsetzung eines sozialen Projekts durch Gewinnüberschuss		

### A.3 PI-Kinderlaufrad – Phase 4 – LCA

Modellierung des Produktsystems in Phase 4 für das Szenario „Entsorgung“ in SimaPro

