

Reverse-Engineering zur Verbesserung der Zirkularität und Werterhaltung entlang des (Produkt-) Lebenszyklus unter ökologischen und ökonomischen Aspekten

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

Dissertation

von

M. Sc. Sebastian Zürn

Tag der mündlichen Prüfung:	14. Juli 2026
Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Frank Henning
Korreferenten:	Prof. Dr. rer. pol. Tobias Viere

Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation entwickelt eine vierphasige Methode, welche auf die Schließung technischer Kreisläufe zielt und folglich zur Transformation des linearen Wirtschaftssystems hin zur Kreislaufwirtschaft dient. Auf Produktebene fehlt es an integrierten Methoden, die Kreislaufhemmnisse systematisch identifizieren, quantitativ bewerten und konstruktiv überwinden. Bestehende Methoden – präskriptive, evaluierende und kreative – ermöglichen dies nur unvollständig. Zugleich fehlt bislang eine systematische Methode, um Reverse-Engineering, als gezieltes Lernen von bestehenden Konstruktionen, zur Steigerung der Kreislauffähigkeit einzusetzen

Die entwickelte Methode verbindet die präskriptiven Design-for-X-Strategien mit dem evaluierenden Life Cycle Assessment, dem Life Cycle Costing und der Life Cycle Gap Analyse zu einem präskriptiv-bewertenden Rahmenwerk. Nach Dokumentation des Ist-Zustands (Phase 1) und Definition eines höherwertigen End-of-Life-Pfades (Phase 2) werden in Phase 3 entlang des Lebenszyklus eingebrachte Veränderungen systematisch auf ihre Vereinbarkeit mit der angestrebten Kreislaufführung geprüft und Reverse-Merkmale abgeleitet. Phase 4 quantifiziert den Erfolg unter der Bedingung, dass, durch die Steigerung der Kreislauffähigkeit, keine Problemverlagerung zulasten der Gesamtbilanz eingegangen wird.

Die Validierung erfolgt an drei Fallbeispielen: einem Einwegbecher, einem Fahrradhelm sowie einer Roboter-Tragstruktur. Die qualitativen und quantitativen Ergebnisse sind der nachfolgenden Tabelle 1.1 dargestellt und zeigen, dass die Reverse-Engineering-Methode Kreislaufhemmnisse systematisch identifiziert und quantifizierbare Verbesserungen ableitet.

Tabelle 1.1: Ergebnisse der RE-Methode aller Anwendungsbeispiele qualitativ und quantitativ.

	Einweggetränkebecher	Fahrradhelm	Roboter-Tragstruktur
Abbildung des neuen Produktsystems			
identifizierte Füge Technologien und Materialauswahlstrategie	-	stoffschlüssiges Urformen bedingt durch Umspritzen Monomaterialstrategie	Urformen mit duromerer Epoxidharz-Matrix im integralen CF-Verbund teilw. Materialsubstitution
identifizierte, werkstoffliche Veränderung	prozessinduzierte Anisotropie durch Thermoformen	molekulare Bindung der multiplen Fügepartner	kovalente Netzwerke ohne Kettenmobilität
Auswirkung auf die Kreislauffähigkeit	verringerte Effizienz beim Schreddern und Compoundieren	thermische Verwertung aufgrund der unlösbaren Verbindung	irreversibler Verbund wird mech. recycelbar
Reverse-Merkmal	Rückabwicklung Werkstoffzustand (therm. Relaxation)	vollständige Materialsubstitution (8 Werkstoffe → PLA)	selektive Matrixsubstitution (Epoxid → PA6)
EoL: vorher → nachher	R8 → R8	R9 → R8	R9 → R8
quantitative Ergebnisse			
$\Delta E(I)_{\text{total}}$	- 61,0 %	- 54,0 %	- 0,70 %
$\Delta E(I)_{\%L_{CG}}$	- 63,0 %	- 27,0 %	- 13,0 %
$\Delta E(C)_{\%L_{CG}}$	- 79,0 %	- 32,0 %	- 25,0 %
$\Delta E(C)_{\text{total}}$	- 71,9 %	- 30,3 %	- 0,7 %

Abstract

This dissertation develops a four-phase method aimed at closing technical loops and, consequently, facilitating the transformation of the linear economic system towards a circular economy. At the product level, there is a lack of integrated methods that systematically identify circular economy barriers, quantitatively assess them, and constructively overcome them. Existing methods, whether prescriptive, evaluative, or creative, achieve this only incompletely. Moreover, no systematic method has yet been established to employ reverse engineering, understood as the structured analysis of existing designs, for enhancing product circularity.

The developed method combines prescriptive Design-for-X strategies with evaluative Life Cycle Assessment, Life Cycle Costing, and Life Cycle Gap Analysis into a prescriptive-evaluative framework. Following documentation of the status quo (Phase 1) and definition of a higher-value End-of-Life pathway (Phase 2), Phase 3 systematically evaluates changes introduced along the product life cycle for their compatibility with the targeted circular pathway and derives reverse features. Phase 4 quantifies the outcome, subject to the condition that improving circularity does not result in burden shifting at the expense of the overall life cycle balance.

The validation is conducted using three case studies: a disposable cup, a bicycle helmet, and a robotic load-bearing structure. The qualitative and quantitative results, presented in Tabelle 1.2 below, demonstrate that the reverse engineering method systematically identifies circularity barriers and derives quantifiable improvements

Tabelle 1.2: Results of the RE method for all application examples, both qualitative and quantitative.

	Single-Use Beverage Cup	Bicycle Helmet	Robot-Load-Bearing-Structure
illustration of the new product system			
identified joining technologies	-	bonded primary shaping due to overmolding	primary shaping with thermoset Epoxy resin-matrix in integral CF-Composite
and material selection		mono-material strategy	part. material substitution
identified, material-based change	process-induced anisotropy	molecular bonding of multiple joining partners	covalent networks without chain mobility
impact on circularity	reduced efficiency in shredding and compounding	thermal recycling due to the inseparable bond	thermal recycling due to covalent cross-linking
Reverse-Characteristic	reversal of material state (thermal relaxation)	complete material substitution (8 materials → PLA)	selective matrix substitution (Epoxy → PA6)
EoL: before → after	R8 → R8	R9 → R8	R9 → R8
quantitative results			
$\Delta E(I)_{\text{total}}$	- 61,0 %	- 54,0 %	- 0,70 %
$\Delta E(I)_{\% \text{LCG}}$	- 63,0 %	- 27,0 %	- 13,0 %
$\Delta E(C)_{\% \text{LCG}}$	- 79,0 %	- 32,0 %	- 25,0 %
$\Delta E(C)_{\text{total}}$	- 71,9 %	- 30,3 %	- 0,7 %

Veröffentlichungen und studentische Abschlussarbeiten

Nachstehende Veröffentlichungen sind im Rahmen meiner Tätigkeit beim Fraunhofer ICT entstanden und stehen in direktem Zusammenhang mit dieser Arbeit:

- Zürn, S., Dieterle, M. (2024). Reverse-engineering for improved end-of-life and circularity of PLA beverage cups. In: Procedia CIRP Volume 122, 7-11. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.002>.
- Bittencourt More, F., Zürn, S., Ometto, A., Henning, F. und Nioac de Salles, A. C. (2024). Assessing PET-containing waste recycling in Brazil. Value Retention via LCA and Reverse Engineering. Presentation, 4th Life Cycle Innovation Conference (LCIC), 3.–5. Juli 2024, Berlin. DOI: <https://doi.org/10.24406/publica-3653>.
- Zürn, S., Haas, J., Müller, T. und Henning, F. (2025). Treibhausgasminimierendes und kreislauffähiges Produktdesign durch Reverse Engineering: Betrachtung einer modularen Rahmenstruktur für Robotergreifer. Vortrag, DGM Fachausschuss Polymerwerkstoffe „Leichtbau und Nachhaltigkeit“, 27. März 2025, Halle (Saale). DOI: <https://doi.org/10.24406/publica-4465>.
- Krüger, A., Kilian, S., Albrecht, J.-C. und Zürn, S. (2025). Kreislauffähige und biobasierte Materialien für die Sportindustrie. In: AVK Composites Report, Ausgabe 11, April 2025, S. 4–5. Frankfurt am Main: AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V.
- Zürn, S., Müller, T. und Henning, F. (2026). Reverse Engineering Approach for Enhancing Product Circularity Under Consideration of Ecological and Economic Aspects. In: Journal of Circular Economy, Vol. 4, Nr. 1. DOI: <https://doi.org/10.55845/joce-2026-41192>.

Zürn, S., Haas, J. & Henning, F. Ensuring low carbon-emission and circular product design through reverse engineering: consideration of a robot gripper frame. *Res Eng Design* 37, 16 (2026).
<https://doi.org/10.1007/s00163-026-00480-6>.

Zürn, S., Albrecht, J.-C., Haas, J. und Henning, F. Closing Material Cycles through Reverse Engineering Approach – Monomaterial Helmet made from PLA. In: *SCI Sustainability*. Wiley (in Publikation, DOI: 10.1002/sst2.70019).

Weitere Veröffentlichungen wurden eingereicht und befinden sich derzeit im Begutachtungsverfahren (under review):

Zürn, S.: Konstruktion, Gestaltung, Design, Simulation, Berechnung. In: *Polymer Engineering* 3. Aufl. Band 3, Springer Verlag, (erscheint 2026), ISBN 978-3-662-59836-8.

Albrecht, J.-C., Zürn, S.: Anwendungsbeispiel zu Umweltgerechtem Polymer Engineering – vom Multimaterial zum Monomaterial am Beispiel Fahrradhelm. In: *Polymer Engineering* 3. Aufl. Band 3, Springer Verlag, (erscheint 2026), ISBN 978-3-662-59836-8.

Des Weiteren wurde eine studentische Abschlussarbeit betreut:

Chams De la Hoz, G. A. (2024). Masterarbeit: PLA Recycling and Circularity: Environmental Evaluation and Process Improvement. Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA), Universität Stuttgart / Fraunhofer ICT.

Danksagung

Diese Dissertation ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie im Zeitraum von 2023 bis 2026 entstanden. Während dieser Zeit, als auch auf dem Weg dorthin, haben mich viele Menschen begleitet und unterstützt, bei denen ich mich herzlich bedanken möchte:

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Henning bedanken, welcher großes Interesse am Thema zeigte, stets für offene Gespräche zur Verfügung stand, mir dabei Lösungswege aufzeigte und durch seine Impulse die Arbeit maßgeblich geprägt hat. Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-rer. Pol. Tobias Viere für die Annahme des Korreferats und die wertvollen Anregungen danken. Meinen Kollegen des ICT gilt mein Dank, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Torsten Müller, welcher mich mit fachlicher Expertise und Geduld durch die Arbeit führte und immer ermutigte, sowie Herrn Peter Brantsch, welcher mich bei Fragen und Hilfestellungen stets unterstützte. Herrn Dr.-Ing. Michael Dieterle gilt mein Dank sowohl für seine Unterstützung bei der Eingrenzung des Themas als auch für die gemeinsame Veröffentlichung, sowie meinen Kollegen Herrn Dr.-Ing. Jonathan Haas und Herrn Albrecht für die spannenden gemeinsamen Projekte sowie die daraus resultierenden Publikationen.

Abschließend gilt mein Dank meiner gesamten Familie, meiner Patentante Sabine, meinen Geschwistern Christine, Marc und Robin sowie meiner Freundin Agathe und insbesondere meinen Eltern Alexandra und Michael, für ihr unerschütterliches Vertrauen und die grenzenlose Unterstützung. Sie haben mich nicht nur während der Promotion, sondern auf meinem gesamten bisherigen Lebensweg unendlich unterstützt. Ohne sie wäre weder dieser Weg noch diese Arbeit denkbar gewesen.

Stuttgart, im Februar 2026

Sebastian Zürn

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	i
Abstract.....	iii
Veröffentlichungen und studentische Abschlussarbeiten	v
Danksagung	vii
Abbildungsverzeichnis.....	xi
Tabellenverzeichnis.....	xv
Abkürzungsverzeichnis	xix
Symbolverzeichnis.....	xxi
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung der Arbeit	3
1.2 Forschungsfragen	3
1.3 Aufbau der Arbeit.....	4
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft	5
2.2 Lebenszyklusbewertung	17
2.2.1 Life Cycle Assessment.....	17
2.2.2 Life Cycle Costing	22
2.2.3 Life Cycle Gap Analyse.....	23
2.3 Reverse-Engineering	25
2.4 Rechtlicher Rahmen	27
3 Stand der Forschung.....	33
3.1 Ecodesign-Methoden.....	34
3.1.1 Präskriptive Methoden	35
3.1.2 Evaluierende Methoden	38
3.1.3 Kreative Methoden.....	40
3.2 Reverse-Engineering	42

3.3	Kombination ökologischer und ökonomischer Lebenszyklusbewertung	45
4	Methodischer Reverse-Engineering Ansatz auf Produktebene	49
4.1	Phase 1: Stand der Technik dokumentieren	51
4.2	Phase 2: Zielbild definieren.....	53
4.3	Phase 3: Reverse-Engineering.....	54
4.4	Phase 4: Erfolgskontrolle	59
5	Exemplarische Anwendung des Reverse-Engineering- Ansatzes	61
5.1	Einweggetränkebecher	63
5.1.1	Phase 1: Stand der Technik dokumentieren.....	64
5.1.2	Phase 2: Zielbild definieren	66
5.1.3	Phase 3: Reverse-Engineering	67
5.1.4	Phase 4: Erfolgskontrolle	68
5.2	Fahrradhelm.....	70
5.2.1	Phase 1: Stand der Technik dokumentieren.....	71
5.2.2	Phase 2: Zielbild definieren	74
5.2.3	Phase 3: Reverse-Engineering	75
5.2.4	Phase 4: Erfolgskontrolle	77
5.3	Roboter-Tragstruktur.....	79
5.3.1	Phase 1: Stand der Technik dokumentieren.....	84
5.3.2	Phase 2: Zielbild definieren	85
5.3.3	Phase 3: Reverse-Engineering	86
5.3.4	Phase 4: Erfolgskontrolle	89
5.4	Sensitivitätsanalyse	91
6	Diskussion.....	95
7	Schlussfolgerungen und Ausblick	101
8	Anhang	109
9	Literaturverzeichnis.....	135

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Die 17 Sustainable Development Goals, eigene Darstellung in Anlehnung an [25].	8
Abbildung 2.2:	Kreisläufe einer idealen CE zur Schließung biologischer (links) und technischer (rechts) Kreisläufe, in Anlehnung an [34] und das Butterfly Diagramm [35] nach [36].	11
Abbildung 2.3:	R-Strategien über den Lebenszyklus und deren Einteilung, eigene Darstellung in Anlehnung an [37, 43].	13
Abbildung 2.4:	Produktlebenszyklus mit Systemgrenzen der LCA-Betrachtung und Kreislaufkonzepte in Anlehnung an [24, 48].	18
Abbildung 2.5:	Phasen einer Lebenszyklusanalyse nach [46].	21
Abbildung 2.6:	Methodische Darstellung des LCG mit den Ergebnissen einer LCA.	24
Abbildung 2.7:	Rechtliche Rahmenbedingungen und deren Bezug zum Produktlebenszyklus, eigene Darstellung nach [99].	31
Abbildung 3.1:	Zuordnung der Fertigungsverfahren gemäß DIN 8580 zum DfP, eigene Darstellung nach [121].	37
Abbildung 4.1:	Iterative Schrittabfolge des RE-Ansatzes.	51
Abbildung 4.2:	Dokumentation des Lebenszyklus inkl. EoL gem. Schritt 1.1 der RE-Methode.	52
Abbildung 4.3:	Eingezeichneter EoL _{new} -Pfad inkl. der kreislaufführungsrelevanten Unterprozesse P ₁ -P _n sowie N ₁ gem. Schritt 2.2 der RE-Methode.	53
Abbildung 4.4:	Eingezeichnete Prozess-Merkmale zu den kreislaufführungsrelevanten Unterprozessen gem. Schritt 3.1 der RE-Methode.	54

Abbildung 4.5:	Ergänzte Reverse-Merkmale zu den kreislaufführungsrelevanten Unterprozessen gem. Schritt 3.3 der RE-Methode.	58
Abbildung 5.1:	Dokumentation des Produktlebenszyklus des Einweggetränkebechers aus PLA gem. Schritt 1.1. der RE-Methode.....	65
Abbildung 5.2:	Eingezeichneter EoL_{new} -Pfad inkl. der kreislaufführungsrelevanten Unterprozesse des Einweggetränkebechers gem. Schritt 2.2 der RE-Methode.	66
Abbildung 5.3:	Prozess-Merkmale zu den Unterprozessen des Einweggetränkebechers gem. Schritt 3.1 der RE-Methode.	67
Abbildung 5.4:	Reverse-Merkmale zu den Prozess-Merkmalen des Einweggetränkebechers gem. Schritt 3.3 der RE-Methode.	68
Abbildung 5.5:	Fahrradhelm in konventioneller Multimaterialbauweise (links) unter Verwendung von sechs unterschiedlichen Thermoplasten P1-P6, sowie in Monomaterialbauweise (rechts).	70
Abbildung 5.6:	Produktionsprozess des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise.	71
Abbildung 5.7:	Dokumentation des Produktlebenszyklus des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise gem. Schritt 1.1. der RE-Methode.	72
Abbildung 5.8:	Produktsystem inkl. Systemgrenzen für den Fahrradhelm, wobei die Ausgangslage in blau und die Neuentwicklung in grün dargestellt ist.	73
Abbildung 5.9:	Eingezeichneter EoL_{new} -Pfad inkl. der kreislaufführungsrelevanten Unterprozesse des Fahrradhelms gem. Schritt 2.2 der RE-Methode.	74

Abbildung 5.10: Prozess-Merkmale zu den Unterprozessen des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise gem. Schritt 3.1 der RE-Methode.	75
Abbildung 5.11: Reverse-Merkmale zu den Prozess-Merkmalen des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise gem. Schritt 3.3 der RE-Methode.	76
Abbildung 5.12: Handlingstruktur in Aluminiumbauweise, links beim Einlegen der Sitzschale in die Presse, rechts das CAD-Modell.	79
Abbildung 5.13: Traglastabhängige Leistungsaufnahme unterschiedlicher Knickarmroboter inkl. linearer Regression.	80
Abbildung 5.14: Produktionsprozess der Tragstruktur in Leichtbauweise V1.	82
Abbildung 5.15: Handlingstruktur in Leichtbauweise V1, links dargestellt die montierte Tragstruktur, rechts das CAD-Modell.	82
Abbildung 5.16: Dokumentation des Produktlebenszyklus der Tragstruktur in Leichtbauweise V1 gem. Schritt 1.1.	84
Abbildung 5.17: Eingezeichneter EoL_{new} -Pfad inkl. der kreislaufführungsrelevanten Unterprozesse der Tragstruktur in Leichtbauweise V1 gem. Schritt 2.2 der RE-Methode.	85
Abbildung 5.18: Prozess-Merkmale zu den Unterprozessen der Tragstruktur in Leichtbauweise V1 gem. Schritt 3.1 der RE-Methode.	86
Abbildung 5.19: Reverse-Merkmale zu den Prozess-Merkmalen der Tragstruktur in Leichtbauweise V1 gem. Schritt 3.3 der RE-Methode.	88
Abbildung 8.1: LCA-Modellierung des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise mithilfe der Software Sphera LCA for Experts. Teil 1 von 2.	112

Abbildung 8.2:	LCA-Modellierung des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise mithilfe der Software Sphera LCA for Experts. Teil 2 von 2.	113
Abbildung 8.3:	LCA-Modellierung des Fahrradhelms in Monomaterialbauweise mithilfe der Software Sphera LCA for Experts.	117
Abbildung 8.4:	LCA-Modellierung der Tragstruktur in Aluminiumbauweise mithilfe der Software Sphera LCA for Experts.	121
Abbildung 8.5:	LCA-Modellierung der Tragstruktur in Leichtbauweise V1 mithilfe der Software Sphera LCA for Experts.	126
Abbildung 8.6:	LCA-Modellierung der Tragstruktur in Leichtbauweise V2 mithilfe der Software Sphera LCA for Experts.	131

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1:	Ergebnisse der RE-Methode aller Anwendungsbeispiele qualitativ und quantitativ.....	ii
Tabelle 1.2:	Results of the RE method for all application examples, both qualitative and quantitative.	iv
Tabelle 2.1:	R-Strategien zur Verbesserung der Herstellungsphase, in Anlehnung an [34].....	14
Tabelle 2.2:	R-Strategien zur Verbesserung der Nutzungsphase, in Anlehnung an [34].	15
Tabelle 2.3:	R-Strategien zur Verbesserung des EoL, in Anlehnung an [34].	16
Tabelle 4.1:	Induzierte Änderungen der Fertigungshauptgruppen 1-3 nach DIN 8580 und deren Einfluss auf das EoL.	55
Tabelle 4.2:	Induzierte Änderungen der Fertigungshauptgruppen 4-6 nach DIN 8580 und deren Einfluss auf das EoL.	56
Tabelle 5.1:	Bewertung der Ausgangslage X_0 des Einweggetränkebechers mittels LCA, LCC und LCGA gem. Schritt 1.2 der Methode, eigene Darstellung auf Basis von [34].	66
Tabelle 5.2:	Bewertung des neuen Lebenszyklus des Einweggetränkebechers mittels LCA, LCC und LCGA gem. Schritt 3.4 und 4.1 der Methode.	69
Tabelle 5.3:	Bewertung der Ausgangslage X_0 des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise mittels LCA, LCC und LCGA gem. Schritt 1.2 der Methode.	74
Tabelle 5.4:	Bewertung des Fahrradhelms in Monomaterialbauweise mittels LCA, LCC und LCGA gem. Schritt 3.4 und 4.1 der Methode.	78

Tabelle 5.5:	Bewertung der Ausgangslage X_{0AL} der Tragstruktur in Aluminiumbauweise mittels LCA, LCC und LCGA gem. Schritt 1.2 der Methode.	81
Tabelle 5.6:	Bewertung der Tragstruktur X_{newV1} in Leichtbauweise V1 mittels LCA, LCC und LCGA gem. Schritt 1.2 der Methode.	83
Tabelle 5.7:	Bewertung der Tragstruktur X_{newV2} in Leichtbauweise V2 mittels LCA, LCC und LCGA gem. Schritt 3.4 und gem. Schritt 4.1 der Methode.	90
Tabelle 5.8:	Variationsparameter der Sensitivitätsanalyse.	91
Tabelle 5.9:	Sensitivitätsanalyse der LCA, LCC und LCGA des Fahrradhelms.	92
Tabelle 5.10:	Sensitivitätsanalyse der LCA, LCC und LCGA der Roboter-Tragstruktur in Bauweise V1 und V2.	93
Tabelle 6.1:	Ergebnisse der RE-Methode aller Anwendungsbeispiele qualitativ und quantitativ.	98
Tabelle 8.1:	LCI und Hintergrunddaten zur LCA und LCC des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise.	109
Tabelle 8.2:	LCC-Modellierung des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise.	114
Tabelle 8.3:	LCI und Hintergrunddaten zur LCA und LCC des Fahrradhelms in Monomaterialbauweise.	115
Tabelle 8.4:	LCC-Modellierung des Fahrradhelms in Monomaterialbauweise.	118
Tabelle 8.5:	LCI und Hintergrunddaten zur LCA und LCC der Tragstruktur in Aluminiumbauweise.	119
Tabelle 8.6:	LCC-Modellierung der Tragstruktur in Aluminiumbauweise.	122
Tabelle 8.7:	LCI und Hintergrunddaten zur LCA und LCC der Tragstruktur in Leichtbauweise V1.	123
Tabelle 8.8:	LCC-Modellierung der Tragstruktur in Leichtbauweise V1.	127

Tabelle 8.9:	LCI und Hintergrunddaten zur LCA und LCC der Tragstruktur in Leichtbauweise V2.	128
Tabelle 8.10:	LCC-Modellierung der Tragstruktur in Leichtbauweise V2.	132
Tabelle 8.11:	Absolute Werte der Sensitivitätsanalysen	133

Abkürzungsverzeichnis

3DSW	3D-Skelett Wickeltechnik
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BattDG	Batterierecht-Durchführungsgesetz
c	Credits, zu Deutsch Gutschriften
CAD	Computer Aided Design
CE	Circular Economy
CF	Carbon Faser
DfA	Design for Assembly
DfP	Design for Production
DfX	Design-for-X
ED	Ecodesign
EDM	Ecodesign-Methoden
ELCC	Environmental Life Cycle Costing
ElektroG	Elektronikgerätegesetz
EoL	End-of-Life, zu Deutsch (Produkt-)Lebensende
EPS	Expandiertes Polystyrol
ESPR	Ecodesign for Sustainable Products Regulation
FTHG	Fertigungshauptgruppe
ICT	Institut für Chemische Technologie
IT	Informationstechnologie
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KSG	Klimaschutzgesetz
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Costing
LCG	Life Cycle Gap

LCGA	Life Cycle Gap Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LE	Linear Economy
LiDS	Life Cycle Design Strategy
LkSG	Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz
LKW	Lastkraftwagen
MVA	Müllverbrennungsanlagen
MCDA	Multi Criteria Decision Analysis
N	Nutzungsphase
P	Produktion
PA	Polyamid
PET	Polyethylenterephthalat
PLA	Polylactic Acid
PP	Polypropylen
RE	Reverse-Engineering
RMA	Raw Material Acquisition
SDG	Sustainable Development Goal
SdT	Stand der Technik
THG	Treibhausgas
TRIZ	Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadac
UN	Vereinte Nationen
VerpackG	Verpackungsgesetz

Symbolverzeichnis

C	Cost, zu Deutsch Kosten
C_c	Kosten, welche Gutgeschrieben werden fürs Recycling
C_{EoL}	Kosten für die Verwertung am Lebensende
CF_t	Zahlungen zum Zeitpunkt t
C_p	Kosten der Produktion
C_{RMA}	Kosten der RMA inkl. Transport
C_{total}	Summe der Kosten entlang des Lebenswegs
C_{Use}	Kosten der Nutzungsphase inkl. Transport
E	Effort, zu Deutsch Aufwände
$E(C;I)$	Aufwände für Kosten und potenzielle Umweltwirkungen
I	Impact, zu Deutsch potenzielle Umweltwirkung
I_c	Gutschriften potenzieller Umweltwirkungen durch das Recycling
I_{EoL}	Potenzielle Umweltwirkungen am Lebensende (ohne Gutschriften)
I_{LCG}	Potenzielle Umweltwirkungen der LCG
I_p	Potenzielle Umweltwirkungen der Produktion
I_{RMA}	Potenzielle Umweltwirkungen der RMA inkl. Transport
I_{total}	Summe der potenziellen Umweltwirkungen entlang des Lebenswegs
I_{Use}	Potenzielle Umweltwirkungen der Nutzungsphase inkl. Transport
r	Zinssatz
T	Anzahl an Perioden
X_0	Produktsystem der Ausgangslage
x_i	Stoff- und Energieströme
X_{new}	Verändertes Produktsystem

1 Einleitung

Das Wirtschaftswachstum der vergangenen Jahrzehnte hat zu einem hohen materiellen Wohlstand geführt, dessen Kehrseite eine zunehmende Belastung natürlicher Ressourcen und des Klimas darstellt. Weltweit ist der materielle Wohlstand pro Person seit 1970 von 8,4 auf über 13 Tonnen in 2024 angestiegen [1], wobei die notwendige Energie nach wie vor überwiegend aus fossilen Energieträgern gewonnen wird und damit erhebliche Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) verursacht [2]. Die durchschnittliche Erderwärmung von etwa 0,2 °C pro Dekade [3] verdeutlicht die Dringlichkeit des Handlungsbedarfs: Das Davoser Weltwirtschaftsforum stellte bereits 2020 fest, dass ökologische Risiken die ökonomischen als dominierende globale Risikokategorie abgelöst haben [4]. Das Pariser Klimaabkommen von 2015, in dem sich die ratifizierenden Staaten auf das Zwei-Grad-Ziel verpflichtet haben, markiert den politischen Konsens, wonach eine Transformation des Wirtschaftssystems zwingend erforderlich ist, um die Netto-Null-Treibhausgasemissionen zu erreichen [5].

Das Leitbild dieser Transformation bildet die Kreislaufwirtschaft (im Englischen Circular Economy; CE), deren Grundgedanke darin besteht, Ressourcen möglichst langfristig und hochwertig im Kreislauf zu führen, anstatt sie nach einmaliger Nutzung zu entsorgen. Im Gegensatz zur bisher vorherrschenden linearen Wirtschaft (im Englischen Linear Economy; LE), in der Produkte entwickelt, produziert und konsumiert werden, ohne die ökologischen Auswirkungen oder das Lebensende systematisch zu berücksichtigen, zielt die CE darauf ab, das Ende eines Produktlebens als Ausgangspunkt eines neuen Kreislaufs zu gestalten. Während das Rahmenwerk der CE mit seinen Kreislaufstrategien – den sogenannten R-Strategien – eine visionäre Orientierung bietet, erfordert die praktische Umsetzung auf Produktebene eine differenzierte Betrachtung: Jedes Produkt bringt spezifische Anforderungen, Herausforderungen und Wertpotenziale mit sich, die über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu bewerten sind.

In der Forschung wurden zahlreiche Ecodesign-Methoden (EDM) entwickelt, die Produktentwickler bei der ökologischen Gestaltung unterstützen sollen. Diese lassen sich in drei Kategorien unterteilen: Präskriptive Methoden, wie Checklisten und Design-for-X-Strategien (DfX), sind leicht anwendbar und zeiteffizient, liefern jedoch keine quantitative Entscheidungsunterstützung und lassen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Gestaltungsentscheidungen außer Acht. Evaluierende Methoden, wie die Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment; LCA) und die Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing; LCC), erzeugen fundierte quantitative Ergebnisse, übersetzen diese jedoch nicht in konkrete konstruktive Verbesserungsmaßnahmen. Kreative Methoden öffnen Lösungsräume, stellen aber keinen strukturierten Leitfaden für die Entwicklung kreislauffähiger Produkte bereit. Eine signifikante Reduktion der Umweltwirkungen von Produkten lässt sich nicht allein durch das Schaffen neuer Gesetze und Zielvorgaben erreichen [6]. Es fehlt eine integrierte Methode, die sowohl die systematische Identifikation von Kreislaufhemmnissen als auch deren quantitative Bewertung und konstruktive Überwindung in einem einheitlichen Rahmenwerk vereint.

Parallel dazu hat das Reverse-Engineering (RE), welches als das Lernen von bestehenden Konstruktionen durch deren systematische Analyse verstanden wird, bisher jedoch keinen systematischen Einzug in die nachhaltige Produktgestaltung gefunden. Bestehende RE-Ansätze beschränken sich überwiegend auf die Gewinnung geometrischer Daten und die Bauteilreplikation, während ein strukturierter Einsatz zur Steigerung der Kreislauffähigkeit auf Produktebene mit definierten Arbeitsschritten, quantitativer Bewertung und iterativen Schleifen fehlt. Auch die kombinierte Betrachtung ökologischer und ökonomischer Lebenszyklusbewertungen weist trotz zahlreicher Einzelansätze grundlegende Spannungsfelder auf, insbesondere hinsichtlich der unterschiedlichen zeitlichen Behandlung von Umweltwirkungen und Kapitalflüssen, was eine einfache Aggregation beider Perspektiven in eine einzelne Kennzahl methodisch fragwürdig erscheinen lässt.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Diese Arbeit soll mit einem Ansatz zur Steigerung der Kreislauffähigkeit von physischen Produkten zur Erreichung der CE beitragen. Dabei soll auf Produktebene sichergestellt werden, dass die ökologischen und ökonomischen Aufwände zur Kreislaufführung und -befähigung das Wertpotential des Produktes, über dessen gesamten Lebenszyklus, nicht überschreiten. Mithilfe des Ansatzes gilt es, Hinder- und Hemmnisse der Kreislauffähigkeit systematisch zu erkennen und mögliche Lösungen abzuleiten unter Sicherstellung, dass keine Nachteile zugunsten eines anderen Merkmals (sogenannte „Trade-Offs“) eingegangen werden. Zur Identifikation der Potentiale entlang des Lebenszyklus wird der Grundgedanke des RE, von bestehenden Konstruktionen zu Lernen genutzt und eine Methodik vorgestellt, welche anhand existenter Produkte CE-Schwachstellen identifiziert und Alternativen ganzheitlich ökologisch (durch deren CO₂-Fußabdruck und deren Kreislauffähigkeit) als auch ökonomisch evaluiert.

1.2 Forschungsfragen

In der vorliegenden Dissertation werden drei zentrale Forschungsfragen behandelt, die das Potenzial des RE als systematisches Werkzeug zur Verbesserung der Kreislaufführung am Beispiel polymerbasierter Produkte untersuchen. Diese sind:

- Welche spezifischen Fügetechnologien und Materialauswahlstrategien können durch RE identifiziert werden, um die Recyclingfähigkeit und Werterhaltung von Produkten am Ende ihres Lebenszyklus zu erhöhen?
- Welche werkstofflichen Veränderungen im Lebenszyklus können mittels RE abgeleitet und für die Entwicklung einer effizienteren bzw. ökologischeren Kreislaufführung genutzt werden?
- Welche Elemente und Strategien aus dem RE können genutzt werden, um die Recyclingfähigkeit und Werterhaltung von polymerbasierten Produkten am Ende ihres Lebenszyklus zu erhöhen?

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Dissertation ist in sieben Kapitel gegliedert, die über den allgemeinen Kontext zur spezifischen Methodenentwicklung und deren Anwendung führt.

Das vorliegende Kapitel 1 führt in die Thematik ein und formuliert die Zielsetzung sowie die Abgrenzung der Arbeit. Die Forschungsfragen werden in Kapitel 1.2 dargelegt. Kapitel 2 legt die theoretischen Grundlagen, beginnend mit den Konzepten der Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft sowie der ökologischen und ökonomischen Lebenszyklusbewertung dar. Abschließend werden die Grundlagen zum Reverse-Engineering und den relevanten rechtlichen Rahmenbedingungen vorgestellt. Kapitel 3 arbeitet den Stand der Forschung in den drei zentralen Themenfeldern auf: bestehende Ecodesign-Methoden (unterteilt in präskriptive, evaluierende und kreative Ansätze), der Einsatz von Reverse-Engineering im Kontext der Nachhaltigkeit sowie die bisherige Kombination ökologischer und ökonomischer Lebenszyklusbewertungen. Aus den identifizierten Forschungslücken wird der Handlungsbedarf abgeleitet, den die vorliegende Arbeit aufgreift. Kapitel 4 bildet das methodische Herzstück der Arbeit und stellt den vierphasigen RE-Ansatz auf Produktebene im Detail vor. Die vier Phasen werden mit ihren jeweiligen Teilschritten und den zugehörigen Bewertungskriterien erläutert. Kapitel 5 widmet sich der exemplarischen Anwendung der Methode anhand dreier Fallbeispiele: einem Einweggetränkebecher aus PLA, einem Fahrradhelm und einer Roboter-Tragstruktur. Jedes Fallbeispiel durchläuft sämtliche Phasen der RE-Methode, wodurch die Anwendbarkeit und Leistungsfähigkeit des Ansatzes demonstriert wird. Kapitel 6 diskutiert die gewonnenen Erkenntnisse aus den Fallbeispielen, ordnet die RE-Methode in den Forschungskontext ein und reflektiert deren Limitationen. Kapitel 7 schließt die Arbeit mit einer zusammenfassenden Beantwortung der Forschungsfragen und gibt einen Ausblick auf weiterführende Forschungsansätze.

2 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel führt zunächst in die Grundlagen von Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft im Kapitel 2.1 ein, beschreibt deren Ursprung und zeitliche Entwicklung sowie den Einzug in politische und globale Agenden, wobei auf die Bedeutung der Kreislauffähigkeit für die Erreichung entsprechender Ziele eingegangen wird. Darauf aufbauend werden die Kreislaufstrategien vorgestellt, die zur Schließung technischer Kreisläufe und damit zur Umsetzung der Nachhaltigkeitsziele definiert wurden. In Kapitel 2.2 folgt die Darstellung der quantitativen ökologischen Lebenszyklusbewertung sowie die des methodischen Rahmens. Entsprechend wird auch die ökonomische Lebenszyklusbewertung und deren Grundlagen im Kapitel 2.3 erläutert. Anschließend wird das Reverse-Engineering (RE) als Denkweise einer Umkehr des herkömmlichen Konstruktionsprozesses beleuchtet, das zwar wesentliche Beiträge im Maschinenbau und in der Informatik geleistet hat, bislang jedoch noch keinen systematischen Einzug in die nachhaltige Produktgestaltung mit einem methodischen Rahmen gefunden hat. Abschließend werden aktuelle, für die nachhaltige Produktgestaltung in Deutschland, relevante Richtlinien vorgestellt.

2.1 Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft

Der Begriff Nachhaltigkeit stammt vom altdeutschen Wort *Nachhaltend* welches von *Nachhalten* > *andauern*, *vorhalten*, *wirken* < abgeleitet wird [7]. Bereits im Jahr 1713 rief Oberberghauptmann Hans Carl von Carlowitz in seinem Werk „*Sylvicultura Oeconomica*“, zur „nachhaltenden Nutzung“ der Wälder auf, in dem nur so viel Holz zu schlagen sei, wie nachwachsen kann, um einer drohenden Holzknappheit zu begegnen [8]. Diese Nennung wird in der Literatur als erstmalige Verwendung des Begriffs Nachhaltigkeit, nach dem heutigem Verständnis beschrieben und gilt daher als Ursprung [8 bis 10]. Auf politischer Ebene wurde im Rahmen der Umweltkonferenz der Vereinten Nationen (UN), welche erstmals 1972 in Stockholm stattfand, das Verständnis der Nachhaltigkeit, zu einem umfänglichen Leitmotiv durch Verknüpfung von Umwelt und Entwicklung, neu geprägt [10]. In der Veröffentlichung des Berichts „Die Grenzen des Wachstums“ im Jahr 1972 stellte der Club of Rome, unter Autor

Dennis Meadows, ein ComputermodeLL vor, welches die Folgen eines unbegrenzten Wirtschafts- und Bevölkerungswachstums bis 2100 untersuchte. Die zentrale Schlussfolgerung des Berichts lautet:

„Wenn die gegenwärtige Zunahme der Weltbevölkerung, der Industrialisierung, der Umweltverschmutzung, der Nahrungsmittelproduktion und der Ausbeutung von natürlichen Rohstoffen unverändert anhält, werden die absoluten Wachstumsgrenzen auf der Erde im Laufe der nächsten hundert Jahre erreicht.“ [11]

Im englischen Sprachgebrauch erscheint der Begriff *sustainable development* erstmals 1980 in der Veröffentlichung „World Conservation Strategy“ [12], welche als wegweisender Rahmen für den Umweltschutz die Integration schützender Maßnahmen lebender Ressourcen als auch wirtschaftliches Wachstum, als wesentlichen Bestandteil der Entwicklungsstrategien beschreibt [13]. Die fortschreitende Umweltzerstörung, Erschöpfungserscheinungen fossiler Ressourcen wie auch die Zunahme der Armut und Ungleichheit in Entwicklungs- und Schwellenländern zählen zu den Auslösern für den 1987 veröffentlichten Brundtland-Bericht mit dem Titel „Our Common Future“. Die Kommission etablierte erstmalig das Verständnis nachhaltiger Entwicklung als intra- und intergenerationelle Gerechtigkeit, auch als Generationengerechtigkeit bezeichnet, mit nachstehender Definition:

„Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations.“ [14]

Zur intragenerationellen Gerechtigkeit zählen internationale, soziale und geschlechtsspezifische Gerechtigkeit, während die intergenerationelle Gerechtigkeit ökologische und finanzielle Nachhaltigkeit umfasst [15]. Der Brundtland-Bericht gilt als Ausgangspunkt für die UN-Konferenz, auch bekannt als Erdgipfel, welcher 1992 in Rio de Janeiro stattfand. Der vorgestellte Aktionsplan, für das 21. Jahrhundert, mit dem Titel „Agenda 21“ sollte Nachhaltigkeit in Politik, Wirtschaft und Bildung integrieren und institutionalisieren. Der Bericht, gegliedert in vier Teile, umfasst im ersten Teil soziale und wirtschaftliche Dimensionen zur Bekämpfung der Armut, Förderung nachhaltiger Konsum- und Produktionsmuster sowie die Verbesserung von Gesundheit und Bildung.

Im zweiten Teil werden die Erhaltung und Bewirtschaftung von Ressourcen wie den Schutz der Atmosphäre, die Bewahrung der biologischen Vielfalt, aber auch nachhaltige Land- und Forstwirtschaft sowie Schutz von Ozeanen und Gewässern thematisiert. Die Stärkung wichtiger Gruppen wie Frauen, Kinder und Jugendliche, aber auch ganzer Bevölkerungsgruppen und Gesellschaften wird im dritten Teil beschrieben. Abschließend werden die erforderlichen Maßnahmen auf nationaler, wie internationaler Ebene im vierten Teil dargestellt, weshalb die „Agenda 21“ als Aktionsplan gilt. Hierzu zählen die Verbesserung internationaler Zusammenarbeit durch Verträge und Abkommen, Technologietransfer, Entwicklungshilfe, aber auch finanzielle Unterstützung und Finanzierungsmechanismen [16]. Die „Agenda 21“ kann als wegweisender globaler Aktionsplan beschrieben werden, welcher ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit als integralen Bestandteil von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft verankert und durch umfassende Maßnahmen zur sozialen Gerechtigkeit, Ressourcenschonung und internationalen Zusammenarbeit die Basis für nachhaltige Entwicklung im 21. Jahrhundert schaffte.

Das 1997 auf der dritten Weltklimakonferenz in Kyoto verabschiedete „Kyoto-Protokoll“ verpflichtet die Industrieländer, ihre THG-Emissionen im Zeitraum 2008–2012 um durchschnittlich 5,2 % gegenüber 1990 zu senken [17]. Trotz seiner völkerrechtlichen Verbindlichkeit wurden es die globalen Emissionen nicht wirksam reduziert, so lag 2015 der weltweite CO₂-Ausstoß 60 % über dem Niveau von 1990 [18], da große Emittenten nicht oder nur unzureichend beteiligt waren. Die Bestrebungen wurden daher auf der Klimakonferenz in Doha 2012 durch „Kyoto 2“ bis 2020 verlängert [19].

Im Jahr 2015 wurde das Pariser Klimaabkommen beschlossen, zur Begrenzung des weltweiten Temperaturanstiegs auf deutlich unter 2 °C, mit dem Bestreben, 1,5 °C nicht zu überschreiten, die Senkung der Emissionen und Anpassung an den Klimawandel sowie die Lenkung finanzieller Investitionen im Einklang mit den Klimaschutzzielen festlegt [20]. Die 197 unterzeichnenden Staaten gingen dabei eine Verhaltensverpflichtung ein, jedoch keine verbindliche Ergebnisverpflichtung. Die Umsetzung erfolgt, im Bottom-up-Ansatz, durch nationale Klimaschutzeiträge, im Englischen als Nationally Determined Contributions (NDCs) bezeichnet [21]. Neben dem Pariser-Klimaabkommen wurde

2015 auch die „Agenda 2030“, mit 17 Zielen (dargestellt in Abbildung 2.1) und 169 Unterzielen für nachhaltige Entwicklung (zu Englisch Sustainable Development Goals, kurz SDG's) beschlossen [22]. Die Förderziele, bekannt als die sogenannten „5 Ps“, leiten sich von den Anfangsbuchstaben der englischen Begriffe *People, Planet, Prosperity, Peace and Partnerships* ab [23]. Auf Deutsch entsprechen sie sinngemäß *Menschen, Planet, Wohlstand, Frieden und Partnerschaft*. Sie verdeutlichen, dass die nachhaltige Entwicklung, auf welche die 17 SDGs abzielen, ökologisch, sozial und wirtschaftlich ausgewogen gestaltet sein muss. Im Staatenbericht Deutschlands über die Umsetzung der „Agenda 2030“ werden die 17 SDG's als „Leitprinzip der Politik der Bundesregierung“ beschrieben [24]. Der Ursprung des Nachhaltigkeitsbegriffs sowie die Endlichkeit von Ressourcen und der natürlichen Umwelt verdeutlichen, dass die Etablierung der CE auch für die Verwirklichung sozialer und wirtschaftlicher Ziele der nachhaltigen Entwicklung von zentraler Bedeutung ist – denn ohne Ressourcen und eine intakte Umwelt lassen sich die übrigen SDGs langfristig nicht sichern.

1 Keine Armut	2 Kein Hunger	3 Gesundheit und Wohlergehen
4 Hochwertige Bildung	5 Geschlechtergleichheit	6 Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen
7 Bezahlbare und saubere Energie	8 Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum	9 Industrie, Innovation und Infrastruktur
10 Weniger Ungleichheiten	11 Nachhaltige Städte und Gemeinden	12 Nachhaltige/r Konsum und Produktion
13 Maßnahmen zum Klimaschutz	14 Leben unter Wasser	15 Leben an Land
16 Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen	17 Partnerschaften zur Erreichung der Ziele	

Abbildung 2.1: Die 17 Sustainable Development Goals, eigene Darstellung in Anlehnung an [25].

Das Ziel SDG 12 “Nachhaltige/r Konsum und Produktion“ zielt auf die nachhaltige und effiziente Nutzung natürlicher Ressourcen ab, d.h. die Vermeidung und das Recycling von Abfällen sowie die Verringerung von Nahrungsmittelverschwendung und die Reduktion von sozialen und ökologischen Risiken

[22]. Aus technischer Sicht, auf die Produktentwicklung und Konstruktion betrachtet, nimmt SDG 12 eine zentrale Rolle ein und kann als das bedeutendste Entwicklungsziel aus einer ingenieurbasierten Perspektive betrachtet werden. Nachstehend sind jene Unterziele des SDG 12 aufgeführt, die einen direkten Bezug zur Kreislaufwirtschaft aufweisen:

SDG 12.2 „Nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen“, fördert die Kreislaufwirtschaft durch Ressourcenschonung und Wiederverwertung.

SDG 12.4 – „Umweltfreundliches Chemikalien- und Abfallmanagement“, bezieht sich auf Recycling und ordnungsgemäße Entsorgung gefährlicher Stoffe.

SDG 12.5 – „Abfallvermeidung, Recycling und Wiederverwertung“, ist ein zentrales Unterziel für das Recycling und die Kreislaufwirtschaft.

SDG 12.6 – „Nachhaltigkeit in Unternehmen fördern“, ermutigt Unternehmen, Kreislaufwirtschaft und Recycling in ihre Prozesse zu integrieren.

Die Kreislaufwirtschaft, als Wirtschaftsmodell, zielt darauf ab, das Abfallaufkommen zu minimieren und nachhaltige Produktion, nachhaltigen Konsum und die Ressourceneffizienz, durch langfristige Nutzung und hochwertige Wiederverwertung am Ende des Lebenszyklus, zu maximieren [26]. Die Notwendigkeit Ressourcen im Kreislauf zu führen zeigt sich am „Earth Overshoot Day“, im Deutschen auch „Erdüberlastungstag“ genannt, welcher jenen Tag des Jahres markiert, an welchem die Menschheit die natürlichen Ressourcen, welche die Erde pro Jahr zu Verfügung stellen kann, aufgebraucht hat. Berechnet wird dies durch den globalen ökologischen Fußabdruck im Verhältnis zur globalen Biokapazität [27]. Im Jahr 2024 wurde diese Grenze bereits ab dem 01. August überschritten [28].

Das Prinzip der Kreislaufwirtschaft, geht auf die „Industrial Ecology“ zurück, welche eine nachhaltige Wirtschaftsweise anstrebt, nach dem Vorbild eines natürlichen Ökosystems, in welchem alles wieder- und anschlussverwertet

wird und es keine Abfälle gibt. Ein exakter Ursprung lässt sich nicht benennen, doch ab 1970 finden sich Veröffentlichungen explizit zur CE [29 bis 31] wie die von Roegen– „The Entropy Law and the Economic Process“, in welcher 1971 dargelegt wird, dass wirtschaftliche Prozesse physikalischen Grenzen unterliegen, da Ressourcen durch Entropie degradiert werden [32]. Die begrenzte Kreislaufrfähigkeit vieler Produkte lässt sich physikalisch durch entropische Effekte erklären, da Materialvermischung, Qualitätsverluste und dissipative Prozesse eine vollständige Rückführung zunehmend erschweren. Die Entropie stellt somit eine grundlegende thermodynamische Herausforderung der Kreislaufrführung dar. Auf politischer Ebene wird die Transformation von LE zur CE als Schlüsselaufgabe des 21. Jahrhunderts angesehen und durch den Circular Economy Action Plan (CEAP), welcher 2015 von der Europäischen Kommission beschlossen wurde, vorangetrieben. Die Europäische Kommission beschreibt diesen wie folgt auf ihrer Webseite: *“The new action plan announces initiatives along the entire life cycle of products. It targets how products are designed, promotes circular economy processes, encourages sustainable consumption, and aims to ensure that waste is prevented and the resources used are kept in the EU economy for as long as possible”* [33].

Auch Non-Governmental-Organizations (NGO’s) wie die Ellen MacArthur Foundation, welche sich zum Ziel gesetzt hat den Übergang zur CE zu beschleunigen, entwickeln und fördern Konzepte zur CE gemeinsam mit Industrie, Wissenschaft, Politik und Institutionen. Eine der bekanntesten Veröffentlichungen, das sogenannte “Butterfly Diagram” (siehe Abbildung 2.2), zeigt die kontinuierlichen Material- und Stoffflüsse der CE. Auf der linken Seite sind biologische Kreisläufe dargestellt, bei welchen Nährstoffe durch biologische Abbauprozesse wieder eingebracht werden. Auf der rechten Seite sind die technischen Kreisläufe dargestellt.

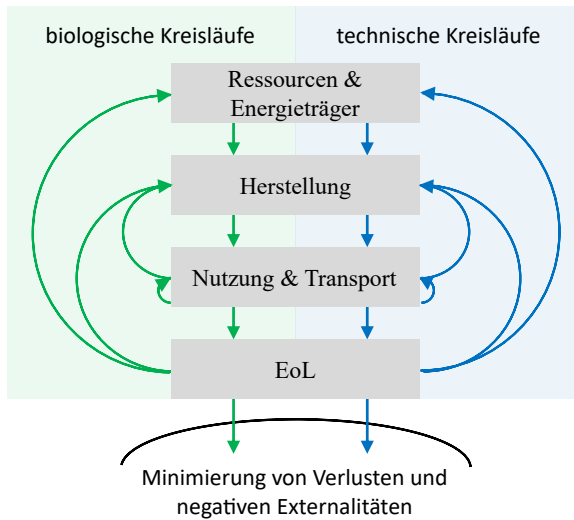


Abbildung 2.2: Kreisläufe einer idealen CE zur Schließung biologischer (links) und technischer (rechts) Kreisläufe, in Anlehnung an [34] und das Butterfly Diagramm [35] nach [36].

Zur Beantwortung der „Wie-Frage“, zur Erreichung der CE, werden die sogenannten „R-Strategien“ als Kernprinzipien der CE verstanden [37]. Die Herkunft der R-Strategien ist nicht eindeutig. Frühe Nennungen einzelner Strategien finden sich in Veröffentlichungen zur CE [29, 30, 32] deren Bezeichnung, als R-Strategien, aus der Vorsilbe der einzelnen englischsprachigen Strategien wie Re-fuse, Re-duce, Re-cycle usw. stammen [38]. In der Literatur wird eine Vielzahl von R-Strategien beschrieben, die teils unterschiedliche, teils überschneidende Zielsetzungen verfolgen. In einzelnen Veröffentlichungen werden bis zu 38 Strategien aufgeführt [39]. Anwendung der Strategien, wie die 3-R (Reduce, Reuse and Recycle) [40] finden sich u.a. in der Abfallstrategie des Vereinigten Königreichs, wie auch in der europäischen Richtlinie 2008/98/EG [41] zur Abfallhierarchie, welche die Basis des deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetzes (siehe Kapitel 2.4) ist. Hier findet sich eine 4-R Strategie (Vermeiden entspricht Refuse, Vorbereitung zur Wiederverwendung entspricht Reuse, Recycling, energetische Verwertung und Verfüllung entspricht

Recover, sowie Beseitigung welche nicht den R-Strategien entspricht). Im Rahmen der vorliegenden Dissertation steht ein produktbezogener Fokus im Vordergrund, weshalb das 9-R Rahmenwerk [42] zugrunde gelegt wird (dargestellt in Abbildung 2.3). Die Nummerierung der R-Strategien (R0, R1, R2...) korreliert invers mit dem Potential zur CE (siehe Pfeil links, Abbildung 2.3). So sinkt der Zirkularitätsgrad mit aufsteigender Nummerierung [43]. Neben der Einteilung nach dem Zirkularitätsgrad lassen sich R-Strategien in drei Leitprinzipien (siehe rechts, Abbildung 2.3) einteilen [37].

- Das erste Leitprinzip soll durch „Intelligente Nutzung und Herstellung von Produkten“ den Energie- und Stoffaufwand bereits bei der ersten Herstellung reduzieren ggf. gänzlich vermeiden.
- Das zweite Prinzip soll der „Verlängerung der Lebensdauer“ dienen und somit den Primärmaterial und -energiebedarf senken.
- Das dritte, am wenigsten zirkuläre Leitprinzip, dient der „Verwendung von Materialien“, um Rohstoffe (im Englischen als Raw Material Acquisition, kurz RMA bezeichnet) für neue Produkte zu extrahieren, aber auch für die thermische Verwertung als Brennstoff, am Produktlebensende (englisch End-of-Life, EoL).

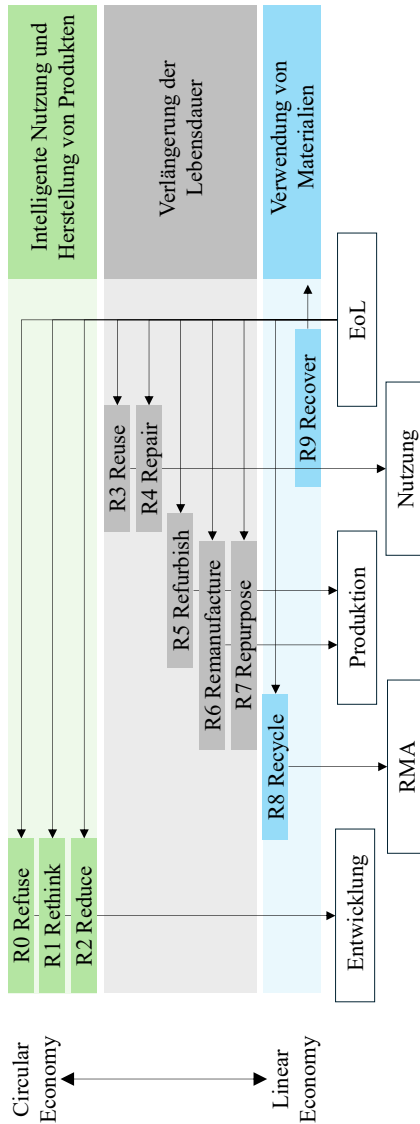


Abbildung 2.3: R-Strategien über den Lebenszyklus und deren Einteilung, eigene Darstellung in Anlehnung an [37, 43].

Betrachtet man die R-Strategien unter dem Gesichtspunkt, an welcher Stelle im Produktlebenszyklus diese einkoppeln und welchen Beitrag zur Werterhaltung sie liefern, ergibt sich die Aufteilung in Tabelle 2.1 zur Herstellungsphase, Tabelle 2.2 zur Nutzungsphase sowie Tabelle 2.3 zum EoL.

Tabelle 2.1: R-Strategien zur Verbesserung der Herstellungsphase, in Anlehnung an [34].

	Erläuterung der Strategie	Beitrag zur Werterhaltung	Exemplarische Anwendung
R0 Refuse (Verweigern)			
	Ein Produkt überflüssig machen, durch Aufgeben oder Übertragen der Funktionen an ein anderes Produkt.	Stoff- und Energieströme werden gänzlich vermieden	MP3-Player und Digitalkamera ins Smartphone integriert
R1 Rethink (Umdenken)			
	Die Nutzung eines Produkts intensivieren	Stoff- und Energieströme werden reduziert	Car- und Desksharing oder Gartengeräte mit Wechselaufsätzen
R2 Reduce (Reduzieren)			
	Geringere Stoff- und Energieströme bei selben Funktionen bzw. Nutzen oder bei Erhöhung des Nutzens bei gleichen Stoff- und Energieströmen	Stoff- und Energieströme werden reduziert	Gewichtsreduktion eines Fahrzeugs bei gleicher Transportleistung

Tabelle 2.2: R-Strategien zur Verbesserung der Nutzungsphase, in Anlehnung an [34].

	Erläuterung der Strategie	Beitrag zur Wert- erhaltung	Exemplarische Anwendung
R3 Reuse (Wiederverwendung)			
	Ein Produkt wiederverwenden, wenn es sich noch in gutem Zustand befindet und seine ursprüngliche Funktion erfüllt	Wiederverwendung ohne Einsatz weiterer Ressourcen	Vesperbox, Gasflaschen, Wassersprudler-Flasche
R4 Repair (Reparatur)			
	Defekte Produkte reparieren und warten, damit sie wieder in ihrer ursprünglichen Funktion genutzt werden können	Wiederverwendung durch Einsatz geringerer Ressourcen als die ursprüngliche Herstellung	Bohrmaschine mit verschlissenen Kohlebürsten, Stuhl mit losem Bein
R5 Refurbish (Aufarbeiten)			
	Ein altes Produkt restaurieren und auf einen definierten Qualitätsstandard bringen	Wiederverwendung durch Einsatz geringerer Ressourcen als die ursprüngliche Herstellung	Polstern einer alten Couch, Leuchtmittel in einer Lampe auf LED umbauen
R6 Remanufacture (Wiederaufarbeiten)			
	Wiederaufarbeitung eines gebrauchten Produkts oder Bauteils zu einem Produkt mit Neuproduktqualität	Herstellung neuer Produkte unter verringertem Einsatz von Ressourcen	Generalüberholte Motoren oder Getriebe
R7 Repurpose (Umfunktionieren)			
	Ein ausrangiertes Produkt oder seine Teile in einem neuen Produkt mit einer anderen Funktion nutzen	Verringerung des Einsatzes von Primärmaterialien	Rotorblätter von Windkraftanlagen als Bedachung für Fahrradparkplatz

Tabelle 2.3: R-Strategien zur Verbesserung des EoL, in Anlehnung an [34].

	Erläuterung der Strategie	Beitrag zur Wer- terhaltung	Exemplarische Anwendung
R8 Recycle			
	Materialien verarbeiten, um dieselbe (hochwertige) oder eine niedrigere (minderwertige) Qualität zu erhalten	Herstellung neuer Produkte unter verringertem Einsatz von Ressourcen	Rückgewinnung von Lithium aus Altbatterien
R9 Recover (Rückgewinnung)			
	Verbrennung von Materialien zur Energiegewinnung	Verringerung des Einsatzes von Primärmaterialien	Restmüll-heizkraftwerke mit Strom- und Wärmeerzeugung

Seit der Prägung des Begriffs der Nachhaltigkeit (wie in Kap. 2 beschrieben) wurde der Grundgedanke durch verschiedene internationale Initiativen wie die UN-Konferenzen oder die Veröffentlichung des Brundtland-Berichts um ökologische, soziale und wirtschaftliche Dimensionen erweitert. Durch die „Agenda 2030“ wurden konkrete Entwicklungsziele, die 17 SDG’s, definiert, wobei SDG 12 die Erreichung kontinuierlicher Materialflüsse, gemäß der Vision einer CE anstrebt (dargestellt in Abbildung 2.2). Die R-Strategien stellen eine fundierte Grundlage für die Ableitung allgemeingültiger Handlungsempfehlungen zur Förderung des SDG 12 dar. Insbesondere durch die Strategien R0, R1, R3 und R7 wird nachhaltiger Konsum gefördert, während R2, R4, R5, R6 die Entwicklung und Herstellung nachhaltiger Produkte unterstützen. Die Strategien R8 und R9 konzentrieren sich auf die stoffliche und energetische Verwertung am Ende des Produktlebenszyklus. Die hierarchische Ordnung der R-Strategien erlaubt eine qualitative Einordnung in Bezug auf die Zirkularität, ohne diese zu quantifizieren. Für eine präzise Ermittlung der Umweltwirkungen ist eine ökologische Lebenszyklusbewertung erforderlich, die im folgenden Kapitel vorgestellt wird.

2.2 Lebenszyklusbewertung

Die Quantifizierung des Umwelteinflusses wird als „Ökobilanz“, im Englischen als Life Cycle Assessment (LCA), bezeichnet, die ökonomische Bewertung als Life Cycle Costing (LCC). Zur Erreichung der CE ist, neben der absoluten Quantifizierung des Umwelteinflusses, vor allem die Bewertung der Kreislauffähigkeit ein wichtiger Indikator. Im nachstehenden Kapitel 2.2.1 wird zunächst die LCA und deren Methodik vorgestellt, gefolgt von der ökonomischen Lebenszyklusbewertung in Kapitel 2.2.2. Anschließend wird in Kapitel 2.2.3 die Life Cycle Gap Analyse (LCGA) von [34] beleuchtet, welche die Summanden der LCA und LCC aufgreift und im Sinne der CE auswertet.

2.2.1 Life Cycle Assessment

Die Ursprünge der LCA gehen in die frühen 60er Jahre zurück, wobei die erste Software-Lösung für „Ganzheitliche Bilanzierung“ kurz „GaBi“ genannt, 1989 veröffentlicht wurde [44]. Mit der Normenreihe ISO 14000 wurde in den 90er Jahren eine Reihe von Umweltmanagementnormen entwickelt, welche die Minimierung von Umweltschäden, die Einhaltung von Umweltvorschriften und die kontinuierliche Verbesserung der Umweltleistung, also der messbaren Ergebnisse einer Organisation hinsichtlich der Steuerung ihrer Umweltaspekte, wie etwa der Reduzierung von Emissionen und Abfällen oder des effizienteren Einsatzes von Ressourcen, verfolgt. Zur Berechnung des CO₂-Fußabdrucks von Produkten, dient die DIN EN ISO 14067 [45], welche auf DIN EN ISO 14040 [46] und DIN EN ISO 14044 [47] fußt und die Grundsätze und Rahmenbedingungen einer LCA sowie die Anforderungen an deren Erstellung definieren. Eine LCA verfolgt den Lebenszyklusgedanken „von der Wiege bis zur Bahre“, somit über den gesamten Lebenszyklus, was die Vermeidung von Trade-Offs unterstützt was einer Verlagerung von Umweltwirkungen in eine andere Lebenszyklusphase bedeutet. Wie in Abbildung 2.4 links dargestellt, erfolgt die vollständige Betrachtung entweder als „Cradle-to-Grave“ („Wiege bis Bahre“), welche den gesamten Lebenszyklus von der RMA bis zum EoL umfasst oder als „Cradle-to-Cradle“ („Wiege bis Wiege“), bei der das EoL nicht als Entsorgung, sondern als Ausgangspunkt eines neuen Produktlebens-

zyklus betrachtet wird. Ebenso ist eine teilweise Betrachtung des Lebenszyklus, wie „Cradle-to-Gate“ oder „Gate-to-Gate“, was im Deutschen „Wiege bis Tor“ und „Tor bis Tor“ bedeutet, möglich. Basierend auf dem gewählten Betrachtungsrahmen, enthält die LCA sowohl den primären Fluss, welcher sich auf die Produktentstehung bezieht, als auch den sekundären, welcher die Kreislaufführung abbildet (siehe in Abbildung 2.4, rechts).

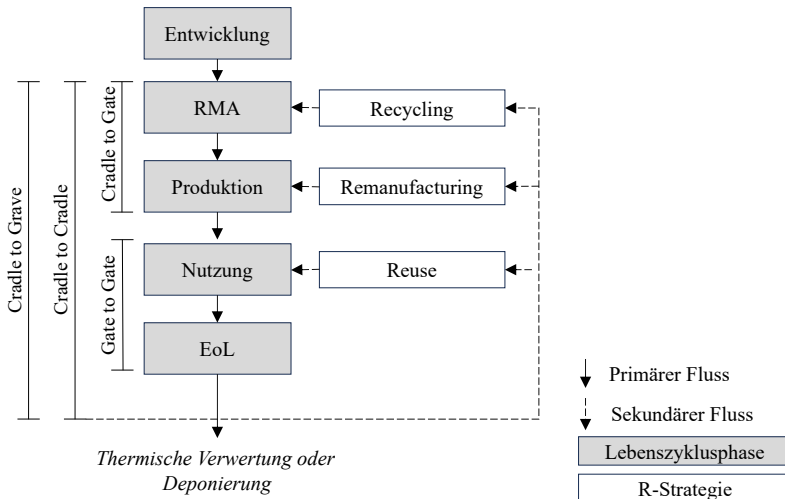


Abbildung 2.4: Produktlebenszyklus mit Systemgrenzen der LCA-Betrachtung und Kreislaufkonzepte in Anlehnung an [24, 48].

Die Durchführung einer LCA ist in der Norm DIN EN ISO 14040 definiert und gliedert sich, unabhängig vom gewählten Betrachtungsrahmen, stets in vier Phasen, wie in Abbildung 2.5 dargestellt und nachstehend beschrieben:

1. Beginnend mit der Festlegung des „Ziel- und Untersuchungsrahmens“, welcher im Englischen als „goal and scope definition phase“ bezeichnet wird. Im Zielrahmen werden die zu untersuchende Anwendung sowie die Zielgruppe festgelegt; zudem werden die Gründe für die Untersuchung dargelegt und es wird bestimmt, ob es sich um eine zu veröffentlichende oder vergleichende Bewertung handelt

- [46]. Der Untersuchungsrahmen, beschreibt u.a. das Produktsystem und dessen Funktionen, die funktionelle Einheit, die Systemgrenzen, die Annahmen und Einschränkungen sowie die Datenverfügbarkeit und -qualität, als auch das gewählte Allokationsverfahren [46].
2. Die „Sachbilanz“, im Englischen als „inventory analysis phase“ bezeichnet, stellt die zweite Phase dar und umfasst die Datenerhebung der Input- und Outputströme des betrachteten Systems und die Berechnungsverfahren, welche vornehmlich durch (softwarebasierte¹) Modellierung erfolgt. Die zugrundeliegenden Daten werden als „Life Cycle Inventory“ (LCI) bezeichnet. Die Datenbasis stellen Ökobilanz-Datenbanken² dar. Die Modellierung umfasst die Materialien/Stoffe, Energien und Emissionen aller Prozessschritte, mit dem Ziel ein vollständiges Stoff- und Energieflussmodell zu erhalten. Die transparent, nachvollziehbare und vollständige Dokumentation der verwendeten Daten und getroffenen Annahmen, sowie deren Validierung, ist maßgeblich für die Qualität der LCA entscheidend, weshalb die Sachbilanz die zeitaufwendigste Phase [44] ist.
 3. Die dritte Phase, die „Wirkungsabschätzung“, welche im Englischen als „impact assessment phase“ (LCIA) bezeichnet wird, bringt die Sachbilanzdaten, welche nicht direkt interpretierbar sind, in einen qualitativen und quantitativen Zusammenhang zu den Umweltauswirkungen. Hierzu werden die Emissionen und genutzten Ressourcen der Sachbilanz den Wirkungsindikatoren, sogenannten „Mid-point-Categories“ zugeordnet, wie beispielsweise CO₂ dem Treibhauspotential oder Stickoxide (NO_x) der Versauerung, was als Klassifizierung bezeichnet wird. Anschließend werden die Wirkungsindikatoren mittels Charakterisierungsfaktoren, wie u.a. ReCiPe oder Environmental Footprint, in die gemeinsame Einheit der Wirkungsindikatoren, beispielsweise CO₂-Äquivalente (im Englischen CO₂-Equivalents, kurz CO₂-e) für das Treibhauspotential oder SO₂-Äqui-

¹ Die Marktführer für LCA Software sind GaBi und SimaPro [49].

² Hierzu zählen u.a. Ecoinvent, GaBi, Hazardous Substances Data Bank, USLCI oder Global LCA Data Access.

valente für die Versauerung, umgewandelt. Die Umweltauswirkungen werden dabei ohne mögliche Auswirkungen einer zeitlichen Verzögerung berücksichtigt [45]. Der Charakterisierungsfaktor drückt aus, wie stark ein Stoff zur Wirkung beiträgt, im Vergleich zu einer Referenzsubstanz. Die Wirkungsindikatoren können den übergeordneten Schadenskategorien, sogenannten „Endpoint-“ bzw. „Damage-Categories“ (wie beispielsweise menschliche Gesundheit oder Ökosystemqualität) zugeordnet werden, um ihre Relevanz auf einer gesellschaftlich verständlicheren Ebene darzustellen. Wird die Wirkungskategorie Klimawandel betrachtet, welche in CO₂-Äquivalenten (CO₂-e) gemessen wird, so besitzt 1 kg CO₂ per Definition einen Charakterisierungsfaktor von eins. Im Vergleich dazu weist Methan (CH₄) aufgrund seiner stärkeren Treibhauswirkung einen Charakterisierungsfaktor von 28 auf, was bedeutet, dass 1 kg CH₄ mit 28 kgCO₂-e in die Bilanz eingeht [50].

4. In der abschließenden vierten Phase, der LCA, der „Auswertung“, werden die Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung interpretiert und aufbereitet. Hierzu können eine Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und/oder Konsistenzprüfung vorgenommen werden, Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen abgeleitet und Grafiken zur verständlichen Darstellung der Ergebnisse erstellt werden.

Die LCA stellt ein methodisches Rahmenwerk zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Produkten und Dienstleistungen dar. Sie ist primär ein wertneutrales Analyseinstrument, das Umweltwirkungen erfasst, jedoch keine Bewertung oder Optimierung vornimmt.

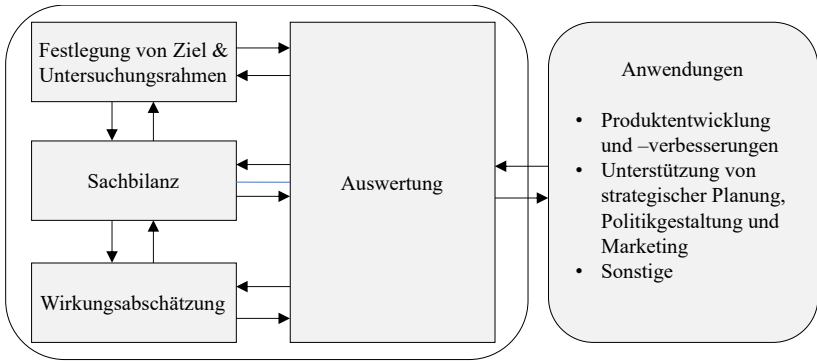


Abbildung 2.5: Phasen einer Lebenszyklusanalyse nach [46].

Mathematisch lässt sich die LCA als Summe der potenziellen Umweltwirkungen I, basierend auf [34], mit nachfolgender Formel 2.1 beschreiben:

$$I(X_0)_{total} = \sum_{i=1}^n I(X_0)_{RMA}(x_{io}) + I(X_0)_P(X_o) + I(X_0)_{Use}(X_o) + I(X_0)_{EoL}(X_o; x_{io}) - I(X_0)_c(X_o; x_{io}) \quad (2.1)$$

$$\text{mit } X = (x_i)_{i=1}^n,$$

$I(X_0)$ ist jeweils die Summe der potenziellen Umweltwirkungen, wobei das Subskript für die Lebenszyklusphasen steht (siehe hierzu die Legende der Abbildung 2.6 oder Symbolverzeichnis). Stoff- und Energieströme werden als x_i bezeichnet, wobei $i \in N$. Das gegebene Produktsystem wird X_0 bezeichnet. Ein verändertes Produktsystem wird mit X_{new} bezeichnet. Vornehmlich werden die Aufwände für das EoL und die Gutschriften c als ein Bilanzposten zusammengefasst (siehe EoL^* , Abbildung 2.6).

Die normbasierte LCA stellt eine fundierte Methode für die ökologische Lebenszyklusbewertung dar. Der Perspektive der CE, zur Verlangsamung der Ressourcennutzung und der Schließung von Kreisläufen, wird eine LCA nicht gerecht. Handlungsempfehlungen sind häufig stark vereinfacht und überwiegend qualitativ. Insbesondere bei Produkten, bei denen die Nutzungsphase das Gesamtergebnis $I(X)_{total}$ dominiert (siehe Anwendungsbeispiel in Kapitel 5.3),

könnte aus der LCA fälschlicherweise geschlossen werden, dass die Kreislauf-führung am EoL keinen relevanten Einfluss hat. Neben der ökologischen ist vor allem die ökonomische Bewertung für den Erfolg von Produkten entschei-dend, welche im nachfolgenden Kapitel vorgestellt wird.

2.2.2 Life Cycle Costing

Die Lebenszykluskostenrechnung, im Englischen Life Cycle Costing (LCC) genannt, ist eine kumulative Summierung aller Kosten von der Entwicklung bis hin zum Produktlebensende. Wie auch bei der ökologischen Lebenszyklus-bewertung werden die Lebenszykluskosten im Wesentlichen bereits in der Pla-nungs- und Designphase festgelegt; spätere Kostensenkungen in der Produk-tion sind nur noch in begrenztem Maße möglich [51]. Die DIN 60300-3-3 [52], zugehörig zum Zuverlässigkeitsmanagement, stellt den Anwendungsleitfaden einer LCC dar. Grundsätzlich wird die Nutzung etablierter Rechnungslegungs-grundsätze wie die Generally Accepted Accounting Principles (GAAP) oder der International Financial Reporting Standard (IFRS) empfohlen. Für die Be-wertung der Wirtschaftlichkeit wird die Kapitalwertmethode, im Englischen als Discounted Cash Flow (DCF), genutzt, welche durch Abzinsen von Kapi-talflüssen den Zahlungszeitpunkt berücksichtigt (siehe Formel 2.2). Der Zins-satz spiegelt dabei den Zeitwert des Geldes wider, was zu einer Verzerrung der LCC-Betrachtung im Vergleich zur LCA-Betrachtung führt (eingehende Be-leuchtung folgt in Kapitel 3.3). Der Verzicht auf die Diskontierung (Zinssatz $r = 0\%$), ermöglicht diese zu vermeiden.

$$DCF = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (2.2)$$

CF_t: Zahlung zum Zeitpunkt t

r: Zinssatz

T: Anzahl an Perioden

Für die LCC von Produkten entsprechen die Zahlungszeitpunkte den Lebens-zyklusphasen. Unter Verzicht auf die Diskontierung ergibt sich die nachste-hende Formel 2.3 für die Berechnung der Lebenszykluskosten.

$$C(I)_{total} = \sum_{i=1}^n C(I)_{RMA}(x_{io}) + C(I)_P(X_o) + C(I)_{Use}(X_o) + C(I)_{EoL}(X_o; x_{io}) - C(I)_c(X_o; x_{io}) \quad (2.3)$$

mit $X = (x_i)_{i=1}^n$,

$C(I)$ ist jeweils die Summe der Kosten. Die Subskripte sowie die Bezeichnung der Produktsysteme und der Stoff- und Energieströme ergeben sich analog jener der LCA.

Auch die LCC stellt eine fundierte und universelle Methode dar, welche zusammen mit der LCA zur vollständigen quantitativen ökonomischen und ökologischen Lebenszyklusbewertung dient. Wie auch die LCA, schenkt die LCC der CE, insbesondere der Auswertung der Kreislaufführung am EoL, keine besondere Beachtung. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit die Ergebnisse beider Methoden im Sinne der CE auszuwerten. Hierzu wird im nachfolgenden Kapitel eine Methodik vorgestellt.

2.2.3 Life Cycle Gap Analyse

Die Life Cycle Gap Analyse (LCGA) stellt eine auf die Schließung technischer Kreisläufe und damit auf die Prinzipien der CE ausgerichtete integrierte Ergebnisinterpretation von LCA und LCC dar. Die von M. Dieterle entwickelte Methode ist nicht in einer Norm verankert, greift jedoch die normbasierten Ergebnisse von LCA und LCC auf. Die LCGA findet sich in diversen Veröffentlichungen siehe [34, 53 bis 55] und vertieft die Analyse des EoL im Sinn der CE. Bei der LCGA wird, abweichend von der üblichen Vorgehens- und Betrachtungsweise einer LCA und LCC, das EoL nicht als einheitlicher Bilanzposten behandelt, sondern in Aufwände und Gutschriften (für die Substitution von Primärrohstoffen und/oder -energieträgern) disaggregiert. Es resultiert eine Lücke (im Englisch als Gap bezeichnet und namensgebend für diese Methode) zwischen den eingesetzten Stoff- und -Energieströmen für die Materialbereitstellung und der Produktion sowie den Gutschriften am EoL, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, welche durch den LCG quantifiziert werden.

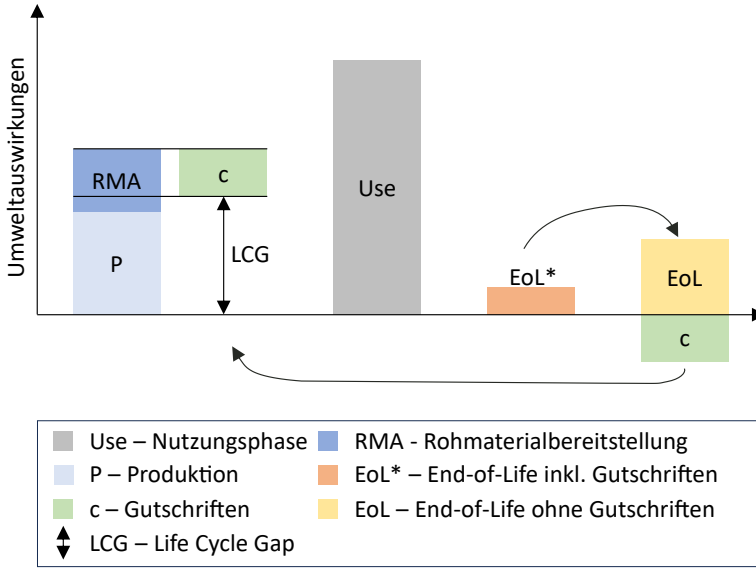


Abbildung 2.6: Methodische Darstellung des LCG mit den Ergebnissen einer LCA.

Die LCGA quantifiziert den Anteil der nicht kreislauffähigen Aufwände im Produktlebenszyklus, welche als Life Cycle Gap (LCG) bezeichnet werden. Für die Auswertung der LCA lässt sich die LCG wie nachstehend in Formel 2.4 und die Auswertung der LCC wie in Formel 2.5 dargestellt, berechnen:

$$I(X_0)_{LCG} = \sum_{i=1}^n I(X_0)_{RMA}(x_{io}) + I(X_0)_P(X_o) - I(X_0)_c(X_o; x_{io}) \quad (2.4)$$

$$C(X_0)_{LCG} = \sum_{i=1}^n C(X_0)_{RMA}(x_{io}) + C(X_0)_P(X_o) - C(X_0)_c(X_o; x_{io}) \quad (2.5)$$

Neben der absoluten Berechnung der LCG lässt sich diese auch relativ darstellen. Hierzu wird die Höhe der absoluten LCG ins Verhältnis zu den ursprünglichen Aufwänden der RMA und P gesetzt, siehe Formel 2.6 für die relative ökologische LCG und Formel 2.7 für die relative ökonomische LCG.

$$I(X_0)_{\%LCG} = \frac{(I)_{LCG}}{(I)_{RMA} + (I)_P} \quad (2.6)$$

$$C(X_0)_{\%LCG} = \frac{(C)_{LCG}}{(C)_{RMA} + (C)_P} \quad (2.7)$$

Nach [34] lassen sich die Potentiale zur Reduktion der LCG entlang der Lebenszyklusphasen einteilen. In den Phasen RMA und Produktion können grundlegende Veränderungen des Produktdesigns, die Substitution von Stoffen und Energieträgern sowie die Steigerung der Ressourceneffizienz zur Reduktion der LCG beitragen. In der Nutzungsphase kann eine Verlängerung der Nutzungsdauer sowie die Reparatur und Wartung defekter Produkte zur Reduktion beitragen. Am EoL kann ebenso die Reparatur des Produktes, aber auch die Wiederverwendung von Komponenten die LCG verringern. Ist dies nicht möglich erfolgt stoffliches oder energetisches Recycling, um Materialien und Energie in Abhängigkeit von Menge und Qualität zurückzugewinnen.

Die LCGA ermöglicht, auf Basis der LCA und LCC, eine Ergebnisinterpretation im Sinne der CE. Die quantitativen Ergebnisse der LCA, LCC und LCGA resultieren aus dem Lebenszyklus des Produkts, welcher maßgeblich auf der Konstruktion und den verwendeten Materialien basiert. Im nachfolgenden Kapitel wird eine Denkweise zur Umkehr des Konstruktionsprozesses vorgestellt, welche in Kapitel 5 angewandt wird, um die Kreislauffähigkeit von Produkten zu steigern.

2.3 Reverse-Engineering

Der Begriff RE bezieht sich auf die Umkehrung des herkömmlichen Konstruktionsprozesses, der vom Entwurf zum physischen Endprodukt führt und als Forward Engineering (FE) bezeichnet wird [56]. Rückwärtsgerichtetes Problemlösen wird in der Literatur als RE geführt [57]. Der zeitliche Ursprung des RE lässt sich nicht eindeutig bestimmen, da in der Literatur hierfür unterschiedliche Angaben gemacht werden. Frühe Anwendungen von RE finden sich um das Jahr 1900, als die Gebrüder Wright ein Flugzeug nach dem Vorbild eines Vogels konstruierten [56]. In weiteren Veröffentlichungen wird RE im Zusammenhang mit der Analyse und Replikation feindlicher Militärtech-

nologien in den 1940er-Jahren erwähnt [58, 59]. Seit den 1990er-Jahren wurden Anwendungen in der Informationstechnologie (IT) bedeutender, wobei RE sowohl in der Softwareentwicklung als auch zur Erfassung geometrischer Daten, von physischen Objekten, eingesetzt wird [60 bis 64]. Die Wurzeln von RE werden nach [65, 66] in der Analyse von Hardware und im Entschlüsseln bestehender Konstruktionen verortet. Die Aufgabe des RE im mechanischen Ingenieurwesen wird von [67] als Methode zur Gewinnung von Konstruktionen und Daten auf Basis existenter Objekte beschrieben. Die zugrundeliegende Motivation lässt sich dabei in zwei Zielrichtungen unterteilen: einerseits in die Erstellung eines Klons mit identischer Funktion, Passgenauigkeit und Arbeitsweise, andererseits in die Entwicklung eines Ersatzproduktes, das zwar dieselbe Funktion und Passgenauigkeit aufweist, jedoch auf einer abweichenden Arbeitsweise beruht [65]. Allgemein kann RE als Lern- und Implementierungsprozess verstanden werden, um zu begreifen, wie ein Objekt funktioniert [56]. Eine Definition aus dem Jahr 1985 beschreibt RE als einen Prozess der Untersuchung, nicht als Veränderung oder Replikation, mit dem Ziel, Komponenten und deren Wechselwirkungen zu analysieren und zu identifizieren [65]. Die angewandten Methoden variieren unterschiedlich stark, beinhalten jedoch häufig Schritte wie Datenerfassung, Analyse, Modellierung, Prototypenherstellung, Leistungsevaluierung sowie die Einhaltung regulatorischer Vorgaben [68]. Beispiele für RE-Anwendungen und RE-Ansätze zur Schaffung von Klonen und Ersatzprodukten finden sich vermehrt in der Literatur [69 bis 75], während Anwendungen mit Fokus auf Nachhaltigkeit vergleichsweise selten sind. Zu den nachhaltigkeitsorientierten RE-Anwendungen zählen Ansätze, die den Klonprozess weniger abhängig von Geräten und Rechenleistung gestalten [76], ein sensorisches RE-Framework zur Herstellung nachhaltiger Lebensmittel [77] sowie ein Programmiermodell zur Optimierung der Standortwahl für Sammelpunkte, um Wiederverwendung oder Entsorgung zu fördern [78]. RE-Anwendungen auf Produktebene, um fehlende oder defekte Produktkomponenten zu reproduzieren [69 bis 75], (wodurch die Nutzung und somit, die Lebensdauer verlängert wird) tragen zu einer verbesserten Ökobilanz bei, da die Nutzung von natürlichen Ressourcen reduziert wird. Die primäre Motivation solcher Klon- und Ersatzanwendungen liegt jedoch in der Regel in einer defizitären Ersatzteilversorgung und nicht in ökologischen Überlegungen. Daher werden diese Anwendungen im Rahmen dieser Dissertation nicht als RE zur

Verbesserung der Nachhaltigkeit verstanden. Für das RE kreislauffähiger Produkte wird „mit dem Ende im Blick“ begonnen: Ausgehend von einer Vision, wie die Zukunft aussehen könnte, wird rückwärts in die Gegenwart gearbeitet, wobei gefragt wird, welche Schritte unternommen werden können, um diese Vision zu erreichen. Diese Vorgehensweise wird als „Backcasting“, „Reverse Scenarios“ oder „Reverse Engineering“ bezeichnet [79] und entspricht dem Prinzip des rückwärtigen Problemlösens:

„Backward problem-solving takes you where you know you want to end up—because where you want to end up is where you begin solving the problem. While forward problem-solving (as in forward engineering) involves mostly synthesis, backward problem-solving (which is the key to reverse engineering—or vice versa) involves mostly analysis.“ [57]

2.4 Rechtlicher Rahmen

Politische Zielsetzungen und Richtlinien der EU werden auf Bundes- und Landesebene durch eigene Gesetzgebungen umgesetzt, während Verordnungen direkt in den Mitgliedsstaaten gelten. Für Hersteller gelten u.a. Gesetze zum Verbraucherschutz, Produkthaftung und dem Schutz von geistigem Eigentum, wie auch Gesetze zum Umweltschutz und der Kreislaufführung. Dabei werden Produzenten, verstärkt für den vollständigen Produktlebenszyklus zur Verantwortung gezogen [80]. Nachstehend werden die in Deutschland relevanten Gesetze aufgeführt, welche zur nachhaltigen Produktgestaltung, zur grundsätzlichen Abfallvermeidung und -umgangsweise, sowie zum Ressourcen- und Umweltschutz ausschlaggebend sind.

Abfallvermeidung und -umgang

- Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) [81], setzt die europäische Direktive EU 2008/98/CE [82] um und regelt den Umgang mit Abfall und somit auch das Recycling. Es zielt auf die Schaffung geschlossener Kreisläufe, durch Etablierung einer Pflichtenhierarchie, auch bekannt

als Abfallhierarchie (siehe Kapitel 2.1). Sie dient als Grundlage für die Entwicklung von Produkten, bei welcher die Abfallentstehung vermieden oder, falls dies nicht möglich ist, Recycling mit hochwertiger Materialrückgewinnung ermöglicht werden soll.

- Das Verpackungsgesetz (VerpackG) [83] setzt die Richtlinie 94/62 [84] aus 1994 sowie der späteren Richtlinie EU 2018/852 [85] um. Zusammen mit dem
- Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) [86] verpflichtet es Unternehmen, welche erstmals eine mit Ware befüllte Verpackung oder Elektronikgeräte in Deutschland in den Verkehr bringen, zur Rücknahme und hochwertigen Verwertung. Die Inverkehrbringer finanzieren die Sammlung von Verpackungsmüll, mittels Lizenzgebühren an das Duale System, welches die Sammlung und Entsorgung übernimmt, während Elektrogeräte von den Händlern zurückgenommen werden müssen. Die Gesetze stellen eine Ausweitung der Hersteller- bzw. Händlerverantwortung dar, mit dem Ziel Müll- und Abfallmengen zu reduzieren, eine Kreislaufführung zu etablieren und die Recyclingquoten zu steigern.
- Das Batterierecht-Durchführungsgesetz (BattDG), basierend auf der EU-Verordnung EU 2023/1542 [87], regelt neben der Rücknahme- und Verwertungspflicht auch die Transparenz und nahtlose Dokumentation von Rohstoffgewinnung, Produktion, (Wieder-)Nutzung sowie des Recyclings. Hersteller sind verpflichtet ab 2027 für definierte Batterietypen³ u.a. den CO₂-Fußabdruck, Daten zu Kapazität und Lebensdauer, Sicherheits-, Reparatur-, Recyclinginformationen und die verwendeten Materialien, einschließlich ihrer Herkunft, in einem digitalen Batteriepass anzugeben [88]. Der Batteriepass gilt als Pilot für weitere digitale Produktpässe und erweitert Produktverantwortung und Transparenz auf ein neues Niveau.
- Die Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV) [89], basierend auf der europäischen Richtlinie 2000/53/EG [90], regelt die Rücknahme und Ent-

³ Hierzu zählen Industriebatterien mit mehr als 2 kWh Kapazität, Traktionsbatterien sowie Batterien von Zweirädern wie E-Bikes und Rollern.

sorgung von Altfahrzeugen. Sie verpflichtet Hersteller, bei der Konstruktion und Produktion neuer Fahrzeuge der Demontage, Wiederverwendung und stofflichen Verwertung Rechnung zu tragen. Seit 2015 gelten Verwertungsquoten von mindestens 95 Gewichtsprozent je Fahrzeug, davon mindestens 85 Gewichtsprozent durch Wiederverwendung und Recycling. Im Jahr 2023 wurde durch die EU-Kommission ein Verordnungsentwurf (COM(2023) 451) [91] vorgelegt, welcher Zirkularitätsanforderungen an die Konstruktion und das Management von Altfahrzeugen ersetzen stellt. Diese erweitert den Geltungsbereich auf den gesamten Fahrzeuglebenszyklus, schreibt Mindestanteile an Kunststoff-Rezyklat vor und verbindet Designanforderungen mit der EoL-Behandlung.

Nachhaltige Produktion und Transparenz

- Das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz (LkSG) [92] verpflichtet Unternehmen auf die Einhaltung der Menschenrechte und Umweltstandards, entlang ihrer gesamten globalen Lieferkette, zu achten.
- Die Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) [93] löst die bisherige Ökodesign-Richtlinie (EU 2009/125/EG) ab, welche auf die Nutzungsphase energieverbrauchsrelevanter Produkte fokussiert war [94]. Die Definition von Ecodesign in der ESPR lautet: “the integration of environmental sustainability considerations into the characteristics of a product and the processes taking place throughout the product’s value chain” (Art. 2 Abs.6). Die ESPR erweitert neben der Anzahl an betroffenen Produktgruppen⁴ auch die Mindestanforderungen für die Ressourceneffizienz, sowie die Pflicht zur Erstellung digitaler Produktdatenpässe (vgl. BattDG, Kapitel 2.4) für eine Vielzahl an Produkten wie u.a. Textilien, Möbel, Reifen, Farben, Stahl-, Eisen- und Aluminiumprodukten [96]. Die ESPR sollen insgesamt zur Steige-

⁴ Diese sind in >30 Kategorien gegliedert, umfassen ebenso das Energie- und Reifenlabel und verantworten zusammen 50% des EU-Energiebedarfs [95].

rung der Produktzirkularität, Ressourceneffizienz und Transparenz entlang des Lebenszyklus beitragen.

Ressourcen- und Umweltschutz

- Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) [97] schützt neben Menschen, Tieren, Pflanzen, Böden, Wasser, Atmosphäre, sowie Kultur- und Sachgüter vor schädlicher Einwirkung durch Luftverunreinigung, Geräuschen und Erschütterungen. Das Gesetz findet vor allem im kommerziellen Bereich Anwendung, etwa bei der Errichtung von Energieerzeugungs-, Industrie- und Abfallbehandlungsanlagen und weniger in privaten Haushalten.
- Das Klimaschutzgesetz (KSG) [98] dient der nationalen (Über-) Erfüllung des europäischen Klimaschutzgesetz EU2021/1119 [99]. Das Gesetz legt dafür Minderungsziele der Jahresemissionsmengen unterschiedlicher Sektoren fest (siehe [98]), sowie für die Netto-THG-Emissionen. Diese sind eine 65 %ige Reduktion der Netto-THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 und 85 % Reduktion bis zum Jahr 2040 im Vergleich zu 1990. Die Erreichung der Treibhausgasneutralität wird bis 2045 angestrebt. Ab 2050 sollen negative THG-Emissionen erreicht werden. Das nationale Gesetz in Deutschland zielt auf die schnellere Erreichung der Ziele im Vergleich zum zugrundeliegenden EU-Gesetz.

Seit das Kyoto-Protokoll 1997 verabschiedet wurde ist weltweit die Anzahl an Gesetzen zum Klimaschutz von 60 auf mehr als 1200 Gesetze angestiegen [100]. Dies zeigt den politischen Stellenwert eines forcierten Themas mit klaren Zielen. Der Bezug der rechtlichen Rahmenbedingungen zum Produktlebenszyklus ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Die Wirksamkeit (Tempo und Umfang) bleiben jedoch hinter den Zielvorstellungen zurück [21]. Der jährliche Bericht zum Status der Klimagesetze [101] zeigt, dass keiner der bewerteten Indikatoren den zum Erreichen des 1,5 °C-Ziels erforderlichen Status aufweist und sich einige Indikatoren sogar verschlechtern. Die Kritik am europäischen Klimaschutzgesetz betrifft die Vorgabe lediglich die Netto- anstatt ebenso die Brutto-THG-Reduktion zu betrachten, bei welchen ebenso Einsparungen gegengerechnet werden. Darüber hinaus werden die fehlende Strategie zur Errei-

chung der gesetzten Ziele sowie die fehlenden Sanktionsmechanismen bemängelt [21]. Eine Senkung der Umweltwirkungen von Produkten lässt sich nicht allein durch regulatorische Vorgabe zu bewältigen, sondern bedarf geeigneter Methoden und technischer Innovationen [9].

Rechtliche Rahmenbedingung \ Lebenszyklusphase	RMA	Produktion	Nutzung	EoL
KrWG	x	x	x	x
KrWG	x	x	x	x
VerpackG		x		x
ElektroG	x	x	x	x
BattDG	x	x		x
LkSG	x	x		x
ESPR	x	x	x	x
BImSchG		x	x	
KSG	x	x	x	x
AltfahrzeugV	x	x	x	x

Abbildung 2.7: Rechtliche Rahmenbedingungen und deren Bezug zum Produktlebenszyklus, eigene Darstellung nach [102].

3 Stand der Forschung

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Forschung der drei für die vorliegende Arbeit zentralen Themenfelder. Zunächst werden bestehende Ecodesign-Methoden (EDM), eingeteilt in präskriptive, evaluierende und kreative Ansätze, im Kapitel 3.1 vorgestellt. Die Analyse zeigt, dass präskriptive Methoden leicht anwendbar sind, jedoch keine quantitative Entscheidungsunterstützung bieten. Evaluierende Methoden liefern fundierte Ergebnisse, die sich allerdings nicht unmittelbar in konstruktive Verbesserungen übersetzen lassen. Kreative Methoden öffnen Lösungsräume, stellen jedoch keinen strukturierten Leitfaden für die Entwicklung kreislauffähiger Produkte bereit.

In Kapitel 3.2 wird der Stand der Forschung zum RE im Kontext der Nachhaltigkeit aufgearbeitet. Dabei wird deutlich, dass RE bislang überwiegend zur Gewinnung geometrischer Daten und zur Bauteilreplikation eingesetzt wird, während ein systematischer Einsatz zur Steigerung der Kreislauffähigkeit auf Produktebene, mit definierten Schritten, quantitativer Bewertung und iterativen Schleifen, fehlt.

In Kapitel 3.3 wird die kombinierte Betrachtung von LCA und LCC vorgestellt. Die Analyse bestehender Ansätze zeigt eine hohe methodische Vielfalt, gleichzeitig jedoch grundlegende Spannungsfelder zwischen Aggregation, Transparenz und der unterschiedlichen Behandlung von Zeitpunkten der Umweltwirkungen und Kapitalflüsse.

Aus den identifizierten Forschungslücken der drei Themenfelder leitet sich der Handlungsbedarf ab, den die vorliegende Arbeit aufgreift: eine RE-basierte Methode, die präskriptive Designgrundsätze mit quantitativen Bewertungsmethoden (LCA, LCC, LCGA) verbindet, um die Kreislauffähigkeit auf Produktebene systematisch und prüfbar zu steigern ohne Trade-Offs einzugehen.

3.1 Ecodesign-Methoden

Ecodesign (ED), wie in ISO/TR 14062:2003 definiert, ist ein Designansatz, der darauf abzielt, die Umweltwirkungen von Produkten und Dienstleistungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu reduzieren und dabei gleichwertige oder bessere Leistungen für die Kunden sicherzustellen [103]. Neben dem Begriff ED wurden von [104] weitere 21 Begriffe identifiziert, welche in der Literatur synonym verwendet werden. Während Sustainable-Design auf die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (gem. Agenda 21, siehe Kapitel 2.1) abzielt, fokussiert sich ED auf die ökologische Nachhaltigkeit [105]. Die R-Strategien (siehe Kapitel 2.1) bilden einen visionären, auf CE gerichteten Orientierungsrahmen, während die EDM der konkreten Umsetzung auf Produkt-bene dienen. Die Kernaufgaben von EDM bestehen in der Quantifizierung und der Verringerung von Umwelteinflüssen [106]. In der Literatur existieren unterschiedliche Ansätze zur Einteilung von EDM in der Literatur. So teilt beispielsweise [49] in 8 Kategorien (Ökobilanz-Werkzeuge, CAD-integrierte Werkzeuge und Methoden, Diagramm-Werkzeuge, Checklisten und Leitfäden, Design-for-X-Ansätze, Methoden zur Unterstützung der betrieblichen Ecodesign-Implementierung, Methoden zur Umsetzung des gesamten Lebenszyklus sowie Methoden zur Integration verschiedener bestehender Werkzeuge) ein, während [107] in 3 Kategorien einteilt (präskriptive, datenbasierte und analytische Methoden). Die Einteilung nach [107] in drei übergeordnete Kategorien bietet gegenüber der feingranularen Klassifikation nach [49] den Vorteil einer höheren Abstraktion, die eine klarere Zuordnung und Abgrenzung der Methoden ermöglicht. Während die acht Kategorien nach [49] teilweise inhaltliche Überschneidungen aufweisen, erlaubt die Dreiteilung eine systematische Unterscheidung anhand der grundlegenden Funktion einer EDM. In Anlehnung an [107] wird im Rahmen dieser Dissertation daher in präskriptive, evaluierende und kreative Methoden unterteilt.

3.1.1 Präskriptive Methoden

Nachfolgend werden präskriptive EDM vorgestellt, die auf LCA-Erkenntnissen und Expertenwissen basieren. Diese enthalten keine absoluten quantitativen Methoden und sind als Heuristiken zu verstehen.

Der Eco-Kompass [108] wie auch die Life Cycle Design Strategy (LiDS) [109] werden in einem Netzdiagramm dargestellt und dienen der Produktbewertung anhand von acht Handlungsfeldern wie bspw. der Materialauswahl und der EoL-Optimierung. Die Ausprägung wird auf den Netzspeichen von 0 (Mitte) bis 5 (Außenring) bewertet, wobei höhere Werte eine bessere Kriteriumserfüllung anzeigen. Der Eco-Kompass und die LiDS dienen der Visualisierung unabhängiger Bewertungskriterien, erlauben jedoch keine Aussage über die tatsächlichen Umweltwirkungen und unterliegen der subjektiven Bewertung des Anwenders. Bekannte Vertreter präskriptiver Methoden sind Checklisten wie bspw. [109, 110], welche den Anwender unterstützen eine Vielzahl an Aspekten zu berücksichtigen. Die Strukturierung der Checklisten folgt teilweise den Lebenszyklusphasen (vgl. [109]) oder den Baugruppen, den Bauteilen oder den Funktionen (vgl. [110]). Die „Fast Five of Philips“ Checkliste nutzt fünf „Ja/Nein-Fragen“, um Nachhaltigkeitsverbesserungen eines Produktes sicherzustellen [111]. Die vom Fahrzeughersteller Volvo entwickelte schwarze [112], graue [113] und rote Liste [114] zählt nach [49] zu den ED-Checklisten und dient der ökologischen Materialauswahl in frühen Entwicklungsphasen, jedoch ohne quantitative Bewertung. Die „Ten Goldenen Rules“ Checkliste von [115] stellt einen generischen Leitfaden dar, ohne quantitative Methoden, zur Bewertung von Produkten. Die Checkliste wird vom Autor als „Schweizer Taschenmesser“ bezeichnet, wobei die Hinweise allgemein formuliert sind und den Anwender vor die Herausforderung stellt, sie in konkrete Handlungen auf Produktebene zu übertragen und eventuelle Wechselwirkungen zu bewerten. Die bekanntesten Checklisten sind die Design-for-X (DfX) Strategien. Die Definition des DfX ist gemäß [116] der Entscheidungsprozess in der Produktentwicklung, welcher die Produkte, deren Prozesse sowie deren Fertigung betrifft. Nach [117] ist das X ein Platzhalter für eine Produkteigenschaft, eine Lebenszyklusphase oder eine Kreislaufstrategie. Es existieren unterschiedliche Definitionen zum DfX in der Literatur vgl. [118, 119]. Die Richtlinien des DfX

sind gemäß [120] bereits in der frühen Phase der Konstruktion zu berücksichtigen, womit sich DfX vorne in die Konstruktionsprozesskette des FE eingliedert. Beispiele einzelner Gestaltungsrichtlinien sind das Design for Assembly (DfA), Design for Reuse and Repurposing (DfRR) oder das Design for Production (DfP). Als verbindendes Element verknüpfen die DfX-Richtlinien Merkmale (z.B. Fügetechnologien) mit Eigenschaften (z.B. Montageeignung, Wiederverwendbarkeit oder Herstellbarkeit) und Hinweisen, welche Merkmale auszuprägen sind, damit die angestrebten Eigenschaften erzielt werden [118]. Zu jeder R-Strategie (siehe Abbildung 2.3) finden sich zugehörige DfX-Richtlinien in der Literatur (vgl. [79] für DfP). Bei den präskriptiven DfX-Richtlinien handelt es sich nicht um verbindliche Vorgaben, sondern um grundsätzliche Hinweise. So wird bspw. beim DfA gemäß [121] geraten, Montageoperationen zu vereinfachen, zusammenzufassen und zu reduzieren, Parallelisierung zu ermöglichen, Montageteile zusammenzufassen, Integralbauweisen zu bevorzugen und vormontierte Baugruppen zu verwenden. Auch bspw. Ikea beschreibt in ihrer Anleitung, zur Entwicklung zirkulärer Produkte, acht DfX-Strategien mit grundsätzlichen Hinweisen [122]. Es lässt sich ableiten, dass DfX-Checklisten ein hinreichendes Verständnis über Fertigung und Lebenszyklus, sowie den Einflüssen und deren Wechselwirkungen, erfordern. Nach [121] ist deren Komplexität nur durch eine geeignete Strukturierung zu beherrschen wobei es, durch die unterschiedlichen Perspektiven und damit Zielorientierung, keinen allgemeingültigen Ansatz geben kann. Die Komplexität, Vielfalt und die Anwendungsspezifik zeigt sich in Abbildung 3.1, in welcher das DfP auf die Produktionsverfahren nach DIN 8580 [123] aufgegliedert ist.

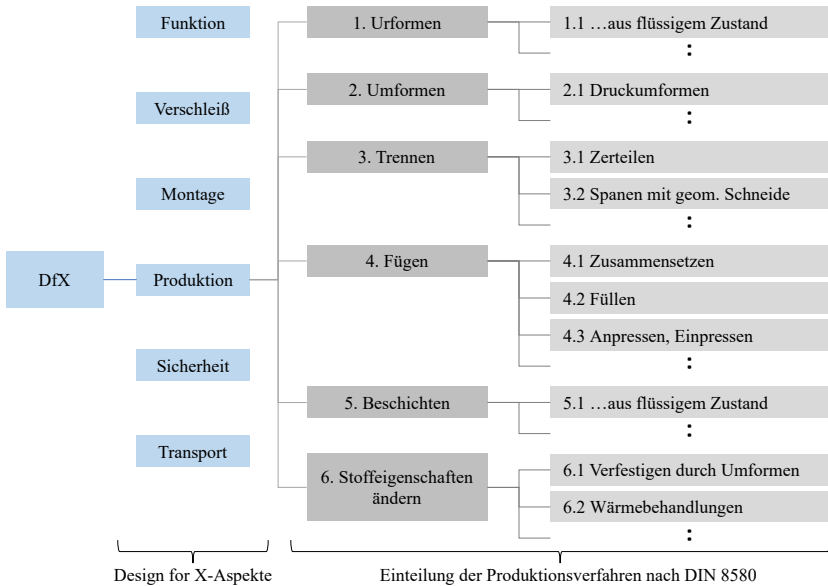


Abbildung 3.1: Zuordnung der Fertigungsverfahren gemäß DIN 8580 zum DfP, eigene Darstellung nach [124].

Die holistische Lebenszyklusbetrachtung der CE widerspricht der Festlegung auf einen einzelnen X-Aspekt in der Konstruktion, was den Lösungsraum beschneidet und lösungsoffene Methoden erfordert [117]. Die DfX-Strategien sind daher nicht explizit auf eine CE ausgerichtet und es fehlt an einer klaren Methode zur Anwendung [125]. Bereits die Beachtung einer einzelnen DfX-Strategie wird in der Literatur als komplex und ressourcenintensiv beschrieben [126]. Nach [127] besteht ein Bedarf neuer Methoden zur Integration von DfX in den Produktdesignprozess, um die Entscheidungsfindung im Designprozess nachhaltig zu unterstützen. Die Auswertung von 31 Publikationen im Zeitraum 1999–2001 zeigt dass CE-Erfolg nur bei Integration multipler DfX-Strategien erzielt wird [127]. Die präskriptiven Methoden sind einfach anzuwenden und zeiteffizient, doch fehlen zugleich eine Anwendungsmethodik mit Produktbezug, quantitative Entscheidungshilfen, die Wechselwirkungen und Priorisierung ermöglichen, sowie der Einbezug geltender Regularien.

3.1.2 Evaluierende Methoden

Die evaluierenden Methoden lassen sich in quantitative und semi-quantitative einteilen. Die quantitativen Methoden dienen primär der Berechnung des Umwelteinflusses, während die semi-quantitativen Methoden weitere Funktionen bieten.

Unter quantitativ evaluierenden EDM wird die, in Kapitel 2.2.1 vorgestellte, normbasierten Methodik der LCA verstanden, welche universell einsetzbar ist und wissenschaftlich fundierte Bewertungen ermöglicht. Auch die in Kapitel 2.2.3 vorgestellte LCGA zählt zu den evaluierenden EDM. Die zugrundeliegende Ökobilanzdatenbank einer LCA ist ausschlaggebend für deren Qualität [49] und folglich auch für jene der LCGA. Die Programme zur Berechnung der Umweltwirkungen sind (überwiegend) kostenpflichtig, softwarebasiert und erfordern Erfahrung/Schulungen zur Nutzung. Die Durchführung einer vollumfänglichen LCA benötigt zudem große Datenmengen und ist ressourcenintensiv [128]. Alternative (Software-) Lösungen zur Durchführung vereinfachter LCA (im englischen Simplified LCA genannt; S-LCA) wie SustainableMinds [129], OneClickLCA [130] oder EarthSmart [131] haben sich am Markt etabliert und ermöglichen eine Abschätzung der Umweltwirkungen. Quantitativ evaluierende Methoden sind damit zwar am aufwendigsten, bieten jedoch die umfassendste, methodisch transparenteste und objektivste Bewertung.

Der Material Circularity Indicator (MCI) ist eine der am häufigsten verwendeten Kennzahlen zur Bewertung der Zirkularität auf Produktebene. Dabei werden die Materialmassenflüsse berücksichtigt, zu denen der Materialinput, die Masse der nicht verwertbaren Abfälle am EoL sowie die Nutzungsintensität des Produkts zählen, berücksichtigt [132]. Somit liefert der MCI ein materialorientiertes Maß dafür, wie effizient die Kreislaufführung, durch Recycling und Reuse, innerhalb eines Produktsystems möglich ist. Nach [133] stellt die Außerachtlassung der Degradation und Kontamination eine wesentliche Einschränkung der MCI.

Das CIRCelligence-Framework der Boston Consulting Group, ist ein Softwaretool, welches auf Basis von Unternehmensressourcenplanung die Zirkularität

entlang der Wertschöpfungskette bewertet. Dabei werden die Art der in das Unternehmen einfließenden Ressourcen (Inflow), die Dauer der Ressourcennutzung (Slow Flow), die Art der aus den Unternehmensgrenzen ausfließenden Ressourcen (Outflow) sowie qualitative Aspekte berücksichtigt [134]. CIR-Celligence betrachtet nicht nur den reinen Materialfluss entlang des Wertschöpfungskreislaufs, sondern berücksichtigt auch den Materialwert. CIRCelligence richtet sich an das Management und liefert strategische Handlungsempfehlungen, adressiert jedoch nicht die konstruktive Produktebene und beinhaltet keine normbasierte LCA oder LCC.

Insgesamt zeigt sich in der Gegenüberstellung der quantitativ evaluierenden EDM, dass die normbasierte LCA eine fundierte Methode ist, jedoch mit hohem Zeit- und Ressourcenaufwand einhergeht. Für die Bewertung der Kreislauffähigkeit auf Produktebene können MCI und LCGA genutzt werden, wobei der MCI im Gegensatz zur LCGA die Aufwände der Produktion nicht berücksichtigt und weitere R-Strategien (mit Ausnahme von Recycling und Reuse) unberücksichtigt bleiben. Die LCGA ist im Vergleich zum MCI umfassender und näher an der LCA-Bewertung und Betrachtungsweise, dadurch dass die Ergebnisse der LCA im Sinne der CE für die LCGA ausgewertet werden. Das CIRCelligence-Framework bewertet mittels eigener Faktoren die Zirkularität von Produkten und von Organisationen und deren Organen, wobei weder auf normbasierte LCA noch LCC in der Veröffentlichung verwiesen wird.

Semi-quantitative EDM integrieren quantitative LCA-Funktionen in andere Methoden und (Software-) Programme. Die Entwicklung von Bauteilen und -gruppen erfolgt heutzutage rechnerunterstützt (in Englisch als Computer Aided Design; CAD), wobei das digitale Produktmodell neben den geometrischen Informationen auch Angaben zum Material und dem Herstellungs- und Fügeverfahren enthält. In Verbindung mit einer Ökobilanz-Datenbank ist somit eine (teilweise) ökologische Bewertung bspw. Cradle-to-Gate möglich. Ursprünge der LCA/CAD Integration finden sich bereits seit 2005 in Publikationen vgl. [135 bis 137]. CAD-Programme wie SolidWorks Sustainability beinhalten neben den Funktionalitäten des CAD's eine Bilanzierungsmöglichkeit von der Rohstoffgewinnung bis zum Produktlebensende, wobei der CO₂-Fußabdruck,

der Energieverbrauch, die Versauerung und die Überdünnung von Gewässern quantifiziert werden können [138]. Neben der direkten Integration von LCA in CAD-Systeme besteht der Ansatz, fertige CAD-Modelle als Input für eigenständige LCA-Software zu nutzen [135]. Aufgrund der Diskrepanzen in den zugrundeliegenden methodischen Prinzipien von CAD und LCA besteht hierbei jedoch weiterhin Forschungsbedarf [139]. Die Integration von LCA in die Produktentstehungssoftware, bspw. ECO-CAD [140] und CircularLCA [141], findet auch in der Bauindustrie Anwendung, um Ökobilanzen und Gebäuderessourcenpässe auszustellen, welche bspw. auch Zugangsvoraussetzung für Förderprogramme sind.

Die quantitativen wie auch semi-quantitativen Methoden liefern objektive Ergebnisse, tragen jedoch nicht unmittelbar zur Senkung der Umweltauswirkungen bei, da sie primär quantifizieren ohne gezielt Schwachstellen in der Konstruktion zu identifizieren und auf Optimierungspotenziale hinzuweisen.

3.1.3 Kreative Methoden

Methoden, welche dem Anwender keine Lösung vorgeben, nicht strikt mathematisch sind, sondern eine Lösungsfindung anregen und -wege aufzeigen können, werden unter der Bezeichnung „Kreative Methoden“ gefasst. Eine universelle Methode zur Problemlösung in der Konstruktion ist die TRIZ-Methode. Das Akronym leitet sich aus der russischen Bezeichnung „Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadach“ ab und steht für die Theorie des erfinderischen Problemlösens [142]. TRIZ basiert darauf, dass technische Probleme oftmals auf Widersprüchen basieren und wiederkehrende Lösungsmuster helfen, durch Strukturierung der Widersprüche, diesen zu begegnen [143]. Die TRIZ Methode wurde von [144] in einen Ansatz integriert, mit dem Ziel ED in frühen Entwicklungsphasen zu integrieren. Dies zielt jedoch nicht explizit auf die Erreichung einer CE ab. Der ED-Ansatz des „reverse scenarios“ von [79], siehe Kapitel 2.2.3, ein Zielbild zu definieren und davon ausgehend in die Gegenwart zu arbeiten, sodass dieses erreicht wird, zählt ebenso zu den Kreativitäts-Methoden. Die Umsetzung wird in drei Schritten beschrieben: Beginnend mit einer Vision des angestrebten Endzustands. Im Anschluss wird zurück zur ge-

genwärtigen Situation gegangen, um im letzten Schritt sukzessiv hin zur Verwirklichung der Vision zu gelangen.

Eine weitere kreative Methode ist das „Lateral Thinking“ von [145] welches auffordert, Probleme in entgegengesetzter Richtung zu analysieren und unkonventionelle Lösungen zu entwickeln. Ein zentraler Bestandteil von lateralem Denken (von lateinisch *latus* „Seite“) ist das Durchbrechen etablierter Denkmuster durch seitwärtige Analyse, zur Findung neuer Konzepte und Einstiegspunkte. Der Ansatz fördert einen bewussten Perspektivenwechsel, der es ermöglicht, Annahmen zu hinterfragen und unkonventionelle Lösungen zu entwickeln. Strukturiertes Denken, das sich durch eine gründliche Problemanalyse und klar definierte Schritt-für-Schritt-Prozesse auszeichnet, dient hierbei dazu, die Kreativität in zielgerichtete Bahnen zu lenken. Dieser methodische Ansatz unterscheidet sich wesentlich von Kreativitätstechniken wie bspw. Brainstorming, das häufig improvisiert und intuitiv erfolgt. Zusammengefasst wird in „Lateralem Denken“ Kreativität mit einer klaren Struktur und konkreten Zielen kombiniert. Dies ermöglicht die Entwicklung von Ideen, die nicht nur innovativ, sondern auch praktisch und umsetzbar sind.

Die kreativen Methoden sind generisch und liefern keinen direkt anwendbaren Leitfaden für die kreislauffähige Produktentwicklung im Sinne der CE. Die kreativen Methoden des „reverse scenarios“ in welchen ein Zielzustand definiert wird und dieser mit lateralem Denken analytisch und schrittweise angestrebt wird, ist auf hohem Abstraktionsniveau die Basis des in Kapitel 4 vorgestellten RE-Ansatzes. Dieser basiert ebenso darauf, von Bestehendem zu lernen, was als der Kern des RE verstanden wird und im folgenden Kapitel erläutert wird.

3.2 Reverse-Engineering

Arbeiten, welche mittels RE einen Beitrag zu gesteigerter Nachhaltigkeit liefern, dienen überwiegend der Rekonstruktion von defekten Bauteilen, motiviert durch eine mangelnde Ersatzteilversorgung (Anwendungen hierzu sind [72, 73, 75, 146]). Nachhaltigkeit ist dabei nicht die primäre Motivation, weshalb diese Anwendungen, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, im Rahmen dieser Dissertation nicht zur Steigerung der Nachhaltigkeit verstanden werden. Die zugrundeliegende RE-Prozesskette der Klon- und Ersatzanwendungen variiert. So beschreibt [147], basierend auf [146], eine fünfstufige Methodik, gegliedert in Datenerfassung, Pre-Processing, Segmentation, Feature-Klassifikation und Modeling. Die vierstufige Prozesskette, vorgestellt von [76], inkorporiert den Grundgedanken des RE, der Systemanalyse und dem -verständnis, gemäß [56], durch Integration eines vorgelagerten deskriptiven Prozessschritts, bei welchem die Objektgeometrie in ihre zugrundeliegenden, elementaren Geometrien unterteilt wird. Diese werden anschließend in Koordinaten-Punktwolken umgesetzt, bevor sie mittels CAD in ein Modell zusammengesetzt und das physische Objekt gefertigt wird. Gemäß [67] ist RE eine Methode des Produkt-designs, der Analyse, der Modifikation und der Verbesserung, gegliedert in eine sechsstufige Prozesskette bestehend aus Datenerfassung, Vorverarbeitung, Triangulation, Merkmalsextraktion, Segmentierung und Flächenanpassung. Die Dominanz von RE, mit dem Ziel der Gewinnung von CAD-Daten, zeigt sich insbesondere in der Kategorisierung von RE-Bedarfen nach [148]. Dort werden vier Bereiche unterschieden: das Design neuer Produkte, die Modifikation bestehender Produkte, der Verlust von Produkt-Design-Daten sowie die Verifikation von Produkten. Auch wenn die vier Kategorien unterschiedlich erscheinen, dienen alle der Gewinnung von CAD-Daten. Die vorgestellten Schrittabfolgen zur Gewinnung und Aufbereitung geometrischer Daten sind nicht auf die zirkuläre Produktgestaltung übertragbar, da sie ausschließlich der Erfassung von Geometriedaten dienen, jedoch keine Methodik zur Bewertung und Optimierung von Produkten hinsichtlich ihrer Kreislauffähigkeit bereitstellen. Neben dem Einsatz zur Replikation von Bauteilen ist RE ebenso in der IT ein fester Bestandteil der Software- und Cyber-Security-Entwicklung, wobei nach [57] IT-Anwendung, im Vergleich zur Anwendungen auf physische Produkte, übermäßig in der Literatur vertreten sind. Nach [62] unterliegen IT-

Anwendungen sechs Motivationen zu welchen, neben code- und programmierspezifischen Intentionen, das Lernen von fortgeschrittenen Ansätzen und dem Aufbau von Wissen, sowie die Entdeckung von Innovationsmöglichkeiten zählen. Aufgrund der ausgeprägten Anwendungsspezifität und thematischen Heterogenität von RE in der IT werden diese Aspekte im Rahmen dieser Dissertation nicht weiter untersucht.

Der in Kapitel 2.3 beschriebene Produktgestaltungsansatz von [79] nutzt RE explizit, um Umweltauswirkungen zu reduzieren und die Zirkularität zu erhöhen. Ausgangspunkt des Konstruktionsprozesses ist das angestrebte Produktlebensende als übergeordnete Vision. Eine strukturierte Methodik zur Durchführung wird nicht vorgestellt.

Ein Ansatz, RE explizit zur Verringerung des Umwelteinflusses bzw. zur Erhöhung der Zirkularität zu nutzen, wird von [79] vorgestellt. Dabei handelt es sich um einen grundsätzlichen Produktgestaltungsansatz, bei dem der Konstruktionsprozess mit dem angestrebten Produktlebensende als Zielbild begonnen wird. Eine strukturierte Vorgehensweise wird jedoch nicht beschrieben. Der Ansatz von [149] nutzt RE um Studenten systematisch an Nachhaltigkeitsprinzipien heranzuführen, indem sie technische Geräte zerlegen, um die Funktion der einzelnen Bauteile zu identifizieren sowie Materialuntersuchungen durchzuführen. Zusätzlich wurde analysiert welche Kriterien dem Konstruktions- und Materialauswahlprozess zugrunde gelegt wurden. Die Studierenden müssen für ausgewählte Bauteile alternative, „nachhaltigere“ Materialien oder Konstruktionen vorschlagen und diese aus ökologischer, sozialer und ökonomischer Perspektive begründen, inklusive Fragen zur Produktlebensdauer und EoL-Strategien. Der Ansatz des universitären Lehrformats bildet eine Grundlage für die Anwendung von RE zur Steigerung der Nachhaltigkeit. Der Schwerpunkt liegt stark auf Material- und Chemieaspekten, jedoch fehlt eine methodische Vorgehensweise, mit klar definierten Kriterien zur Bewertung der Kreislauffähigkeit. Dennoch gehört dieser Ansatz zu den wenigen Beispielen, in denen RE gezielt zur Steigerung der Nachhaltigkeit – wenn auch nicht explizit der Kreislauffähigkeit – eingesetzt wird.

Eine weitere Studie, die RE zur Produktanalyse einsetzt zeigt, dass die Anwendung, insbesondere das Austarieren konkurrierender Designentscheidungen

herausfordernd ist, etwa hinsichtlich Produkteigenschaften, Fertigungsmöglichkeiten und Materialwahl, im Spannungsfeld von Kosten und Nutzen [150]. In der Veröffentlichung von [151] werden Tintenstrahldrucker mittels eines RE-Ansatzes produktarchitekturbasiert zerlegt und anhand eigens definierter Metriken (u. a. Teileanzahl, Gewicht, Verbindungen pro Teil, Materialvielfalt sowie Verhältnis von Verpackungs- zu Produktvolumen) zu einem gewichteten Nachhaltigkeitswert umgerechnet, wobei jedoch universelle quantitative LCA-Methoden sowie eine Bewertung der Kreislauffähigkeit und der Kosten unberücksichtigt bleiben.

Die Veröffentlichungen zu RE-Ansätzen zur Steigerung der Nachhaltigkeit nutzen zwar die analytische Denkweise des RE, um Wissen und Verständnis über das untersuchte Produkt zu gewinnen, weisen jedoch zentrale Lücken auf.

- Erstens fehlt eine universelle, klar strukturierte Schrittabfolge, die den Anwender systematisch, einschließlich iterativer Schleifen, entlang einer angestrebten Kreislaufstrategie (siehe Kapitel 2.1, R-Strategien) führt und quantitative Rahmenbedingungen zur Bewertung von Änderungen und zur Vermeidung von Trade-Offs bereitstellt.
- Zweitens bieten die bestehenden Ansätze keine ausreichende Flexibilität, um unterschiedliche Kreislaufstrategien anzustreben.
- Drittens mangelt es an der Einbindung universell einsetzbarer und DIN-basierter quantitativer Methoden. So kann weder die Ausgangssituation noch potenzielle Variationen der Materialauswahl, Fügeverfahren und Konstruktionsänderungen im Hinblick auf Ökologie und Ökonomie systematisch quantifiziert werden. Damit können die Methoden nicht konsistent in das Konzept der CE eingebettet werden.

Aus den identifizierten Defiziten ergibt sich der Bedarf eines methodischen Rahmenwerks, das RE systematisch mit quantitativen, normbasierten Bewertungsmethoden verknüpft und flexibel auf unterschiedliche Kreislaufstrategien anwendbar ist.

3.3 Kombination ökologischer und ökonomischer Lebenszyklusbewertung

Die kombinierte Betrachtung von LCA und LCC wird seit über 20 Jahren in Forschungsarbeiten und Methoden angestrebt. Ansätze lassen sich nach [152] in vollaggregierte (in einer Gesamtgröße) und teilaggregierte (in Einzelbewertungen) Ansätze einteilen. Eine alternative Einteilung von [153], basiert auf 333 analysierten Veröffentlichungen aus dem Zeitraum 1994 – 2017 und teilt diese in sechs Gruppen:

- (I) Unabhängige LCA und LCC
- (II) Unabhängige LCA und LCC in einem übergeordneten Rahmen
- (III) Unabhängige LCA und LCC integriert in Multi Criteria Decision Analysis (MCDA)
- (IV) LCA- und LCC-Optimierungsansätze
- (V) Umwelt-LCC
- (VI) Ökoeffizienz-Methoden

Insgesamt zeigen die Ergebnisse von [153], dass (I), (II) sowie (V) die am häufigsten vertretenen Formen integrativer Betrachtungen sind. Die ökologische Bewertung folgt meist der, in Kapitel 2.2, vorgestellten Normenfamilie DIN EN ISO 14000, während die ökonomische Betrachtung der, in Kapitel 2.2.1 vorgestellten, DIN 60300-3-3 (wie in [154, 155]) folgt. Eine LCA ohne LCC ist für Unternehmen nur sehr eingeschränkt nützlich [156], da unternehmerische Entscheidungen stets auch einer wirtschaftlichen Rechtfertigung bedürfen und ökologische Bewertungen ohne ökonomischen Kontext somit keine fundierten Handlungsgrundlagen liefern können. Wie die Kombination von LCA und LCC umgesetzt und deren Ergebnis bewertet wird, variiert stark. Im teilaggregierten Ansatz von [154], welcher nach [153] zu (I) zählt, werden LCA und LCC getrennt durchgeführt, jedoch die Wirkungsindikatoren als externe Kosten (z.B. die Umweltkosten mit 0,173\$ pro kgCO₂-e) in der LCC berücksichtigt. Nachteile der getrennten Bewertung (I) sind u.a. der abweichende Untersuchungsrahmen und -perspektiven von LCC und LCA, sowie deren getrennte Darstellung. Ansätze, welche LCA und LCC unabhängig in einem übergeordneten Rahmen kombinieren, zählen zu (II) nach [153]. Diese haben

u. a. den Nachteil, dass der Fokus nur in reduziertem Maße auf den Bewertungsmethoden (LCA und LCC) liegt, diese nicht standardisiert erfolgt und ggf. zusätzlich Ressourcen für die Bewertung weiterer Dimensionen erforderlich sind. Der Ansatz von [157] zielt auf die Verbindung und die Optimierung von LCA, LCC sowie soziale Aspekte für ausgewählte Wirkungsindikatoren, Technologien und Szenarien mittels MCDA, womit er nach [153] zu (III) zählt. Die Nutzung von MCDA bedingt eine Gewichtung und Priorisierung von Kriterien, was eine subjektive Wertentscheidung durch den Anwender darstellt und den neutralen Charakter einer normgerechten LCA und LCC reduziert. Methoden, welche eine Optimierung anstreben, sind nach [153] der Kategorie (IV) zuzuordnen und dienen der Minimierung oder Maximierung von Zielfunktionen. Dies erfolgt unter Beachtung zahlreicher Variablen, Parametern sowie Rahmenbedingungen, was zu einer Problemkomplexität führt, welche die menschliche Fähigkeit zur Lösungsfindung oft übersteigt und den Einsatz algorithmischer Verfahren erforderlich macht. Beispiele algorithmischer Anwendungen finden sich in [158] wo unterschiedliche Varianten einer Produktion optimiert wurden, in [159] wo die Optimierung einer Busflotte für unterschiedliche Szenarien angestrebt wird, oder in [160] zur Optimierung von Re-ovierungen von Bestandsbauten. Die algorithmischen Verfahren basieren auf mathematischen Modellen und erfordern valide Modellierung, hohe Datenqualität sowie eine geeignete IT-Infrastruktur, was ihre Einführung in der Praxis erschwert. Insbesondere bei LCA und LCC mit langen Betrachtungszeiträumen (bspw. bei Cradle-to-Cradle Betrachtungen einer Produktionsanlage) werden Unsicherheiten über Szenarien abgebildet, wodurch die Ergebnisse stark von den zugrunde gelegten Annahmen abhängen. Algorithmen sind ein mächtiges Werkzeug zur numerischen Optimierung, doch sie bedingen Intransparenz und erfordern hohen initialen Aufwand für Modell, Datenaufbereitung und Parametrisierung. Methoden, die sämtliche Kosten entlang des Lebenszyklus erfassen, explizit auch die Umweltexternalitäten, zählen zu (V) nach [153] und werden als Umwelt-LCC bezeichnet. Im Englischen werden diese als Environmental Life Cycle Costing (ELCC) bezeichnet und wurden von der Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) entwickelt [161]. Umweltexternalitäten sind unbeabsichtigte Auswirkungen, von Schadstoffen und Abfällen, auf Umwelt und Verbraucher [162]. Anwendungsbeispiele sind die Bewertung von urbanem Flugtransport, bei welchem die Um-

weltkosten (durch CO₂-e. wie auch Lärmbelastung) berücksichtigt wurden [163] oder die ELCC Bewertung von Backöfen zur Senkung des Energieverbrauchs unter Beachtung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden [164]. Ein vollaggregierter Ansatz von [155] kombiniert durch einen Eco-Effizienzindikator, die Ergebnisse der LCA und LCC mittels Normierung (mit den Durchschnittswerten eines Europäers pro Jahr) und Multiplikation, in eine einzelne Zahl. Diese Methoden werden nach [153] zur Kategorie VI gezählt. Das Prinzip der Normalisierung basiert auf DIN EN ISO 14042 [165] und ermöglicht den Vergleich von Werten unterschiedlicher Umweltkategorien (somit auch Einheiten) auf Grundlage einer Normalreferenz [156]. Die Nutzung von normierter Betrachtung ermöglicht den Vergleich und die Aggregation von Werten unterschiedlichster Einheiten, doch bedingt Intransparenz. Die Normierung transformiert absolute Werte in relative Kennzahlen, deren Bedeutung wesentlich von der gewählten Referenz abhängt und damit bereits eine interpretative Vorentscheidung enthält. Eine grundlegende Herausforderung der Vereinigung von LCA und LCC, welcher in der Literatur wenig Beachtung geschenkt wird, liegt in der unterschiedlichen Berücksichtigung des Zeitpunktes, wann Emissionen entstehen oder Kapitalflüsse getätigt werden. So gibt die Norm zur Berechnung des CO₂-Fußabdrucks von Produkten (DIN EN ISO 14067, Absatz 6.5.8) vor, dass alle „THG-Mengen so berechnet werden, als wären sie zu Beginn des Bewertungszeitraums freigesetzt oder entzogen worden ohne (...) die Auswirkung einer Verzögerung (...) zu berücksichtigen“ [45]. Die Norm zur Berechnung der LCC (DIN EN ISO 60300, Kapitel C2 und C6) erklärt die Kapitalwertmethode (siehe Kapitel 2.2.1, Formel 2.1). Sie „stelle das Grundprinzip aller modernen Methoden der Investitionsbeurteilung dar“ [52] und berücksichtigt den Zeitwert des Geldes. Das EU-Projekt CIL-ECCTA hat festgestellt, dass es nicht sinnvoll ist LCA- und LCC-Ergebnisse einfach zu einem einzigen Wert zusammenzuziehen, das sie unterschiedliche Größen, Einheiten und Zeitlogiken abbilden [166].

Zusammenfassend zeigt der Forschungsstand, dass der Bedarf an ganzheitlichen Methoden ökonomischer und ökologischer Lebenszyklusbewertung als notwendig erkannt wird, bislang jedoch keine allgemein akzeptierte, methodisch einheitliche Vorgehensweise existiert. Die Vielzahl an teil- und vollaggregierten Ansätzen verdeutlicht einerseits das große Potenzial integrierter Be-

wertungen, andererseits aber auch die Spannungsfelder zwischen Transparenz, Interpretierbarkeit und Praktikabilität. Besonders kritisch ist die nur unzureichend adressierte Diskrepanz in der zeitlichen Behandlung von Umweltwirkungen und Kapitalflüssen vollaggregierter Ansätze. Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass tragfähige Entscheidungen nicht aus der Reduktion von LCA- und LCC-Ergebnissen auf eine einzige Kennzahl möglich sind, sondern aus einem Rahmenwerk, dass beide Perspektiven gleichberechtigt berücksichtigt und ihre jeweiligen (zeitlichen) Annahmen transparent darstellt. Basierend auf dem identifizierten Forschungsbedarf wird im folgenden Kapitel ein Lösungsansatz vorgestellt, der die beiden Bewertungsperspektiven (von LCA und LCC) in einem Rahmenwerk verbindet.

4 Methodischer Reverse-Engineering Ansatz auf Produktebene

Das vorliegende Kapitel stellt einen Lösungsansatz vor, welcher zur Erreichung des SDG 12.2 und folglich der CE, auf Produktebene CE-Hindernisse identifiziert und zur Umsetzung einer gesteigerten Kreislaufführung unter Einbezug von etablierten Methoden der ökonomischen und ökologischen Bewertung unterstützt. Der Ansatz zielt auf die Schließung technischer Kreisläufe im Sinne des Butterfly-Diagramms (siehe hierzu Abbildung 2.2) durch die Analyse von Produkten, insbesondere deren Materialien und deren Herstellung, sowie deren Lebenszyklus. Ausgehend vom Lernen von existenten Objekten, entsprechend dem Verständnis des RE nach [56], werden Produkt und deren Lebenszyklus durch die nachstehend vorgestellte Methode systematisch analysiert, um Wissen aufzubauen und um CE-Innovationsmöglichkeiten zu identifizieren. Die Kombination dieser RE-geprägten Lernperspektive mit dem rückwärtsgerichteten Arbeiten von einem angestrebten Zielbild aus in die Gegenwart, wie nachfolgend in Schritt 2.2 der Methode beschrieben und im Einklang mit der Definition des RE nach [57], führt dazu, dass die Methode als RE-Ansatz bezeichnet wird.

Der Ansatz adressiert den Entwicklungsbedarf an Methoden, welche Designgrundsätze mit analytischen Schritten und quantitativen Rahmenbedingungen in Lösungen übersetzen. Aus Perspektive der EDM (vorgestellt in Kapitel 3.1), kombiniert die RE-Methode präskriptive DfX-Strategien mit den evaluierenden LCA-, LCGA- und LCC-Analysen, womit die RE-Methode als präskriptiv-bewertend eingeordnet werden kann. Zur Begegnung der Defizite präskriptiver EDM, welche die fehlende Methodik und die Außerachtlassung rechtlicher Regulatorik betreffen, ist der RE-Ansatz in Phasen und Schritte iterativ strukturiert und mit quantitativen Methoden und Rahmenbedingungen verknüpft. Aus Sicht der kombinierten Methoden von LCA und LCC (siehe hierzu Kapitel 3.3) ordnet sich die RE-Methode in Gruppe II, der unabhängigen LCA und LCC in einen übergeordneten Rahmen, ein. Während die Gruppe IV auf

die Optimierung der LCA und LCC abzielt, zielt die RE-Methode auf die Erreichung der CE durch Verbesserung der Kreislauffähigkeit ohne negative Veränderung der LCA und LCC.

Bevor die Methode im Detail erläutert wird, kann ein praktisches Bild helfen, das Grundprinzip darzulegen, welches keine wissenschaftliche Beschreibung des Vorgehens darstellt, jedoch die zentrale Idee der RE-Methode verdeutlicht: Stark vereinfacht lässt sich das Zielbild der CE, dass der Endpunkt eines Produktlebens, der zugleich der Startpunkt eines neuen ist, als eine kreisförmige Wanderung ansehen. Die Wanderoute entspricht dem Produktlebenszyklus mit ansteigenden wie auch mit abfallenden Passagen. Um lineare Wanderwege in Rundwanderwege zu überführen, bedarf es an Rückwegen, welche im Produktlebensweg den R-Strategien entsprechen. Die unterschiedlichen R-Strategien bedingen, wie weit auf den ursprünglichen (Produktlebens-) Weg zurück geführt wird. Nicht alle Passagen einer Wanderung sind rückwärtig begehbar, so müssen bspw. Klettersteige umlaufen werden. Diese Schlüsselstellen bedingen, dass gewisse Wege nur „linear“ begehbar sind. Sie können gefunden werden, indem der ursprüngliche Weg zurückgegangen wird, bis man vor einer nicht rückwärtig begehbaren Stelle steht. In der Draufsicht lässt sich dann analysieren, ob ein Hilfsmittel oder eine Umgehung sinnvoll ist. Um den Rückweg zu ermöglichen, was in der Analogie der zirkulären Transformation entspricht, können (technische) Hilfsmittel zum Aufstieg bereitgestellt werden oder eine Anpassung des ursprünglichen Wegs zur Vermeidung der Schlüsselstelle vorgenommen werden. Was technisch möglich ist, muss von den Produktentwicklern – in der Analogie den Bergführern – abgeleitet und hinsichtlich der Auswirkungen durch Lebenszyklusbewertungen quantifiziert werden.

Die RE-Methode ist in vier Phasen gegliedert, mit respektiven Teilschritten, wie in Abbildung 4.1 dargestellt. Die 1. Phase dient der Dokumentation und der Bewertung der Ausgangslage, dem sogenannten „Stand der Technik“ (SdT). In der 2. Phase wird eine Reduktion des LCG, durch höherwertige Kreislaufführung im Sinne der CE (siehe Kapitel 2.1) angestrebt. Phase 3 dient der Analyse und Ableitung möglicher Lösungen auf Produktebene, bevor in Phase 4 die abschließende Erfolgskontrolle und Quantifizierung durchgeführt wird.

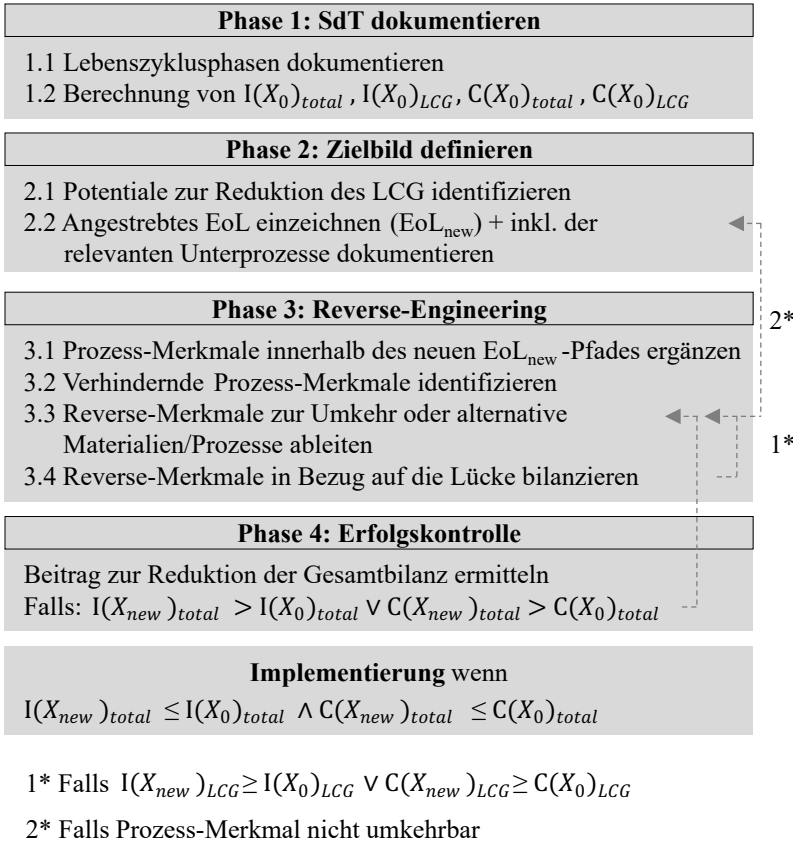


Abbildung 4.1: Iterative Schrittabfolge des RE-Ansatzes.

4.1 Phase 1: Stand der Technik dokumentieren

Beginnend mit der Dokumentation des SdT, versehen mit Subskript 0 in Schritt 1.1, werden die Lebenszyklusphasen, von der Entwicklung bis zum Produktlebensende, inklusive des aktuellen EoL-Pfades, aufgetragen wie in Abbildung 4.2 dargestellt. Im Kontext dieser Arbeit wird der Begriff EoL-Pfad als Synonym für die R-Strategie verwendet und beschreibt die aktuelle Kreislauffüh-

rung (vgl. Abbildung 2.3). Hierbei sind ebenfalls die relevanten Randbedingungen, insbesondere die regulatorischen, zu dokumentieren. Beispielhafte Randbedingungen, in der Entwicklung und RMA, für Kinderspielzeuge betreffen physikalische und mechanische Eigenschaften gem. der EU-Spielzeugrichtlinie 2009/48/EG [167]. Während gewisse Randbedingungen konstruktiv gelöst werden können, beschränken andere mögliche EoL-Pfade, beispielsweise aufgrund von geltenden Hygienevorschriften. Schematisch ist das Ergebnis von Schritt 1.1 in Abbildung 4.2 dargestellt. Im Folgeschritt 1.2 wird eine vollständige quantitative Bewertung mittels LCA (siehe Kapitel 2.2.1), LCGA (siehe Kapitel 2.2.3) und LCC (siehe Kapitel 2.2.2) durchgeführt.



Abbildung 4.2: Dokumentation des Lebenszyklus inkl. EoL gem. Schritt 1.1 der RE-Methode.

4.2 Phase 2: Zielbild definieren

In Phase 2 wird das Zielbild definiert, dessen Umsetzung in Phase 3 angestrebt wird. Hierzu werden in Schritt 2.1 Potentiale für die Reduktion des LCG identifiziert, welche durch Zielsetzung einer (CE dienlicheren) R-Strategie erreicht werden. Im Folgeschritt 2.2 wird der angestrebte EoL_{new} -Pfad (wie in Abbildung 4.3 in orange dargestellt) eingezeichnet. Wird bspw. stoffliches Recycling angestrebt koppelt der EoL_{new} -Pfad (anwendungsspezifisch des Recyclingverfahrens) entweder in die RMA oder in die Produktion ein. Neben den Randbedingungen ist in Schritt 2.2 auch die Aufschlüsselung der Produktionsphase in die Prozessschritte P_1 bis P_n , nach DIN 8580 [123] (siehe Abbildung 3.1) durchzuführen und diese oberhalb der Lebenszyklusphase zu dokumentieren. Sollte das Produkt in der Nutzungsphase Veränderungen wie bspw. Abnutzung, Degradation oder Verunreinigung unterliegen, ist dies ebenfalls oberhalb der Lebenszyklusphase durch N_1 bis N_n zu dokumentieren. Dabei sind jene Prozessschritte der Produktion und Nutzung zu ergänzen, die grafisch unterhalb der angestrebten EoL_{new} liegen, da ausschließlich diejenigen Veränderungen als relevant betrachtet werden, die ab dem Einkopplungspunkt des EoL_{new} -Pfades im Produktlebenszyklus auftreten.

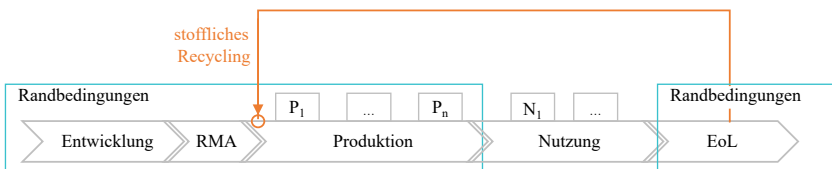


Abbildung 4.3: Eingezeichneter EoL_{new} -Pfad inkl. der kreislaufführungsrelevanten Unterprozesse P_1 - P_n sowie N_1 gem. Schritt 2.2 der RE-Methode.

4.3 Phase 3: Reverse-Engineering

In Phase 3. wird die Umsetzung des EoL_{new} -Pfades auf Produktebene angestrebt. Hierzu werden im Schritt 3.1 die Prozess-Merkmale zu den Prozessschritten ergänzt. Als „Prozess-Merkmale“ werden die Veränderungen der Material- und Produktbeschaffenheit bezeichnet, welche durch P_1 - P_n oder N_1 induziert werden. In Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 sind beispielhafte Prozess-Merkmale der Fertigungshauptgruppen (FTHG) 1–6 gemäß DIN 8580, sowie deren negativer Einfluss auf die Verwertung am EoL, dargestellt. Diese Effekte können sowohl während der RMA, der Produktionsphase als auch in der Nutzungsphase induziert werden. So lässt sich beispielsweise eine oberflächliche Verschmutzung der FTHG 5 (Beschichten) zuordnen, während Kratzer der FTHG 2 (Trennen) zugeordnet werden.

Bei den Prozess-Merkmalen handelt es sich um grundlegende Beschaffenheitsänderungen, betreffend der Homogenität der Materialien, der Gefüge und der Verbindungen. Daher stehen weder exakte quantitative Effekte noch prozessspezifische Ausführungsvarianten im Fokus der Analyse. Ziel ist es, die prinzipiellen Wirkmechanismen und deren generischen Einfluss auf den Produkt- und Materialzustand zu erfassen und diese in Schritt 3.1 systematisch zu ergänzen wie nachfolgend in Abbildung 4.4 dargestellt.

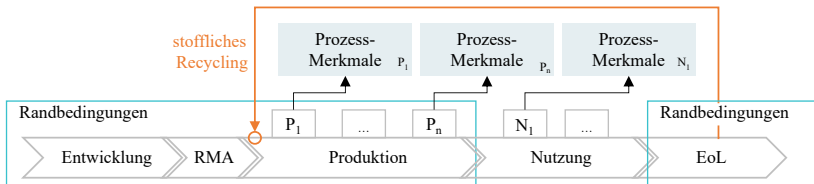


Abbildung 4.4: Eingetragene Prozess-Merkmale zu den kreislaufrelevanten Unterprozessen gem. Schritt 3.1 der RE-Methode.

Tabelle 4.1: Induzierte Änderungen der Fertigungshauptgruppen 1-3 nach DIN 8580 und deren Einfluss auf das EoL.

Hauptgruppe	1 Urformen	2 Umformen	3 Trennen
Prozess-Merkmal (Induzierte Änderung in der Produktion)	- Änderung der Geometrie durch erstmalige Formgebung - Gefügeausbildung während der Erstarrung - Einstellung der Materialhomogenität	- Änderung der Geometrie bei Erhalt der Stoffkontinuität - Gefügeänderung - Aufbau von Eigenspannungen - lokale Anisotropien	- geometrische Fragmentierung - Entstehung neuer Oberflächen - lokale Schädigung der Randzonen mit potenzieller Kontamination
negative Auswirkungen auf das EoL	- Additiverungen und Legierungen erschweren die Rückführung. Können als Störstoffe wirken - hoher Energiebedarf fürs Umschmelzen	- Gefüge müssen durch Energieaufwand isotropiert werden - Eigenspannungen können das Recycling erschweren	- Mehr Oberflächen bedingen mehr Kontamination z.B. Verschmutzung oder Oxidation - Kleinteiligkeit erschwert die Sortierung
Reverse-Merkmal (Rückführungs- verfahren im EoL)	- Geometrische Auflösung und Funktions-neutralisierung - Gefügeneubildung und Homogenisierung	- geometrische Neutralisierung - Spannungsabbau und Gefüge-Rückführung und Isotropisierung	- Dekontamination oder Oberflächenreinigung - ggf. Fügen - thermische Behandlung der Randzonen

Tabelle 4.2: Induzierte Änderungen der Fertigungshauptgruppen 4-6 nach DIN 8580 und deren Einfluss auf das EoL.

Hauptgruppe	4 Fügen	5 Beschichten	6 Stoffeigenschaften ändern
Prozess-Merkmal (induzierte Änderung in der Produktion)	- stoff-, form- oder kraftschlüssige Verbindung von (unterschiedlichen) Materialien - Veränderung der phys. Eigenschaften - Festlegung der Demontierbarkeit	- Aufbringen zusätzlicher Materialschichten durch chem. oder phys. Bindung an das Substrat - Einführung neuer Stoffe durch Funktionalisierung wie Schutz oder Optik	- Modifikation des Gefüges oder der Phasen - Erzeugung von Anisotropien oder Gradienten
negative Auswirkungen auf das EoL	- unlösbare Fügestellen verhindern sortenreine Trennung - stoffliche Vermischung führt zu Downcycling - hoher Demontage- und Energieaufwand	- Störstoffe im Recycling erschweren stoffliche Trennung - zusätzliche Energie und Prozessschritte im EoL notwendig	- Gefüge müssen durch Energieaufwand isotropisiert werden - teilweise nicht auf Primärniveau möglich
Reverse-Merkmal (Rückführungs- verfahren im EoL)	- Demontage - Fügestellen- Neutralisierung bspw. durch thermische Prozesse für adhäsive Verbindungen	- Entschichtung - Haftung aufheben durch Trennung von Schicht und Substrat - mechanische Störstoffabtrennung	- Homogenisierung für räumliche Gleichmäßigkeit - Isotropisierung zum Erreichen von Richtungs-unabhängigkeit

In Schritt 3.2 der Methode werden jene Prozess-Merkmale identifiziert, welche das angestrebte EoL_{new} behindern oder gar verhindern. Dies ist individuell vom Prozess-Merkmal und dem angestrebten EoL_{new} abhängig. Es gilt durch den Anwender der Methode zu validieren, ob ein eingebrachtes Prozess-Merkmal für die angestrebte Kreislaufführung hinderlich ist. Um die Rückkehr zum angestrebten Punkt im Produktlebenszyklus zu ermöglichen, im Falle des Beispiels in Abbildung 4.5 (stoffliches Recycling) zu jenem Zeitpunkt, an dem das Rohmaterial bspw. in granulierter Form oder als gewalztes Blech vorlag. Hierzu ist es erforderlich sämtliche Prozess-Merkmale, welche seit diesem Zeitpunkt induziert wurden, rückabzuwickeln. Folglich werden als „Reverse-Merkmale“ die grundlegenden Wirkprinzipien bezeichnet, mit denen induzierte Prozess-Merkmale gezielt rückgängig gemacht oder funktional kompensiert werden. In Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 sind beispielhafte Reverse-Merkmale zu den Prozess-Merkmalen der FTHG aufgeführt. In Schritt 3.3 werden die Reverse-Merkmale über den Prozess-Merkmalen ergänzt wie in Abbildung 4.5 schematisch dargestellt.

Werden in einem mehrstufigen Prozess sequenziell identische Prozess-Merkmale eingebracht, ohne das Materialsystem zu verändern, beispielsweise durch einen Urform- und mehrstufigen Umformprozess, so können diese mit einem einzigen Reverse-Merkmal, beispielsweise durch Schreddern, kompensiert werden.

In FTHG 1 gilt es insbesondere zu prüfen, ob hergestellte (stoffschlüssige) Materialkombinationen eine wirtschaftlich und technisch sinnvolle Anschlussverwertung haben, da (unlösbare) Verbindungen nicht zwangsläufig die Kreislaufführung behindern oder gar verhindern. Handelt es sich um homogene oder ineinander lösliche Stoffe, die sich durch chemische Einlagerung oder Adhäsion verbinden, lassen sich diese ggf. stofflich recyceln. Beispiele hierfür sind Additive in Polymeren, Farbstoffe, Treibgase, aber auch Füll- oder Faserstoffe. Form- und kraftschlüssiges Fügen kann sowohl lösbar wie auch unlösbar ausgelegt werden, während stoffschlüssige Verbindungen als unlösbar (im Sinne der Zerstörungsfreiheit) gelten [168].

Sollten keine Reverse-Merkmale zu einem Prozess-Merkmal existieren, folglich dieses nicht umkehrbar sein, gilt es durch den Anwender alternative Ma-

terialien/Prozesse abzuleiten, welche zum angestrebten EoL_{new} -Pfad befähigt. Beispielsweise muss eine nicht trennbare Fügstellekonstruktiv so ausgelegt werden, dass eine Demontage ermöglicht wird oder die Demontage durch konstruktive Maßnahmen, die etwa durch eine Monomaterialstrategie, entbehrlich wird. Sollte dies nicht möglich sein, leitet die Methode über einen integrativen Schritt (siehe Abbildung 4.1 links) zurück zu Schritt 2.2 um ein alternatives (weniger kreislauffähiges) EoL_{new} anzustreben.

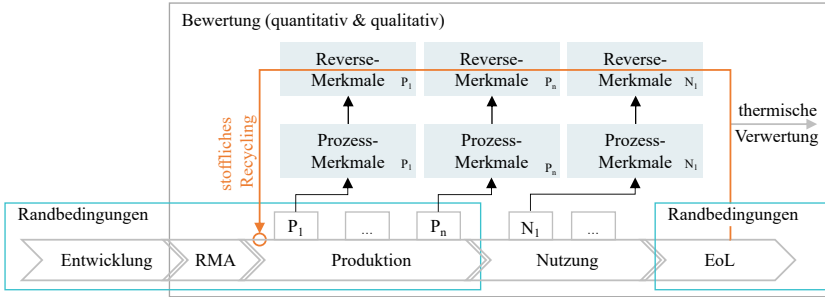


Abbildung 4.5: Ergänzte Reverse-Merkmale zu den kreislaufführungsrelevanten Unterprozessen gem. Schritt 3.3 der RE-Methode.

In Schritt 3.4 werden die Aufwände der Reverse-Merkmale in Bezug auf die Lücke, durch ein neues LCGA bilanziert, um die Verbesserung der Kreislauffähigkeit durch das veränderte Produktsystem X_{new} sicherzustellen. Dabei muss die nachstehende Bedingung (4.1) erfüllt sein, andernfalls führt die Schrittabfolge zu Schritt 3.3 zurück (siehe Abbildung 4.1), um alternative Reverse-Merkmale zu identifizieren.

$$I(X_{new})_{LCG} < I(X_0)_{LCG} \wedge C(X_{new})_{LCG} < C(X_0)_{LCG} \quad (4.1)$$

4.4 Phase 4: Erfolgskontrolle

In Phase 4. wird das (neue) Produkt einschließlich der Kreislaufführung mittels vollständiger LCA und LCC bewertet, um mit den nachstehenden Bedingungen 4.2 sicherzustellen, dass keine Trade-Offs zu Lasten der ökonomischen und ökologischen Gesamtbilanz eingegangen werden. Ein Beispiel für eine mögliche Problemverlagerung ist die Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs während der Nutzungsphase durch den Einsatz eines kreislauffähigen, jedoch schwereren Werkstoffs.

$$I(X_{new})_{total} \leq I(X_0)_{total} \wedge C(X_{new})_{total} \leq C(X_0)_{total} \quad (4.2)$$

Sollten die Bedingungen nicht erfüllt sein, leitet die Methode iterativ zu Schritt 3.3 zurück, um alternative Reverse-Merkmale (oder Materialien/Prozesse) zu identifizieren. Sind die Bedingungen gemäß den Gleichungen 4.1 und 4.2 erfüllt, ist eine Steigerung der Zirkularität unter gleichzeitiger Vermeidung von Trade-Offs sichergestellt, und die Schrittabfolge schließt mit der Implementierung ab.

In den nachfolgenden Kapiteln wird die Anwendung der Methode anhand dreier Fallbeispiele (Einweggetränkebecher, Robotergreifer und Fahrradhelm) demonstriert.

5 Exemplarische Anwendung des Reverse-Engineering-Ansatzes

Im vorliegenden Kapitel wird der RE-Ansatz anhand von drei Anwendungsbeispielen durchgeführt. Die Auswahl der Anwendungsbeispiele ist durch Forschungsprojekte des Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT) in der Zeit 2019-2026 bedingt. Sie umfasst zwei Konsumgüter: einen Einweggetränkebecher (siehe Kapitel 5.1) und einen Fahrradhelm (siehe Kapitel 5.2) sowie ein Industriegut: eine Roboter-Tragstruktur aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (siehe Kapitel 5.3). Für die nachstehenden LCA- und LCC-Bewertungen gilt:

Ziel der Studien:

Im Rahmen einer vergleichenden Bewertung des vollständigen Produktlebenszyklus werden die Umweltwirkungen der Ausgangslage sowie des veränderten Produktsystems quantifiziert. Ziel der Studie ist es, eine nachhaltigere Produktentwicklung zu unterstützen, indem Änderungen im Produktlebenszyklus vorgenommen und deren Einfluss mithilfe von Lebenszyklusbewertungen im Sinne der CE quantifiziert werden. Die ökologischen Ergebnisse werden ebenso für die LCGA verwendet.

Informationen zur Sachbilanz:

Für die LCA jedes Produktsystems wurde die Software Sphera LCA for Experts (vormals „Gabi“) sowie die Datenbanken von Sphera und Ecoinvent verwendet. Die funktionelle Einheit ist im jeweiligen Anwendungskapitel beschrieben. Die verwendeten Hintergrunddaten und das LCI zur LCA und LCC finden sich in tabellarischer Form im Anhang. Die Ergebnisse der LCA wurden mithilfe von Microsoft Excel zur Berechnung der LCGA herangezogen. Auch die LCC wurde mithilfe von Microsoft Excel erstellt und findet sich in tabellarischer Form im Anhang. Alle direkten Kosten wurden in Euro (€) erfasst, Externalitäten wie Umweltkosten wurden hierbei nicht berücksichtigt. Die Er-

gebnisse der LCA, LCGA und LCC finden sich zusammengefasst im jeweiligen Anwendungskapitel.

Wirkungsindikatoren:

Zur Quantifizierung der potenziellen Umweltwirkungen, welche aus den in der Sachbilanz erfassten Stoff- und Energieströmen resultieren, wird der Indikator „Klimawandel“ betrachtet, welcher in $[\text{kgCO}_2\text{-e}]$ bzw. in $[\text{gCO}_2\text{-e}]$ gemessen wird. Der Klimawandel gilt als meistverwendeter und politisch relevantester Wirkungsindikator in Ökobilanzen [169].

Allokation:

Für die Zuordnung der Umweltwirkungen und Kosten am EoL, gemäß der ISO 14044, wird in der vorliegenden Arbeit die 0/100 Methode (auch als Systemerweiterung oder „avoided burden approach“ bezeichnet) angewandt. Dies bedeutet, dass Rezyklate oder rückgewonnene Energie am EoL als ökonomische und ökologische Gutschriften bilanziert werden, welche vermiedene Primärproduktion substituieren. Dieser Ansatz belohnt recyclingfähige Produkte und steht im Einklang mit dem Ziel der RE-Methode, den Wert der Kreislaufführung zu steigern. Insbesondere die LCGA (siehe Kapitel 2.2.3) basiert konzeptionell auf der Gegenüberstellung von Herstellungsaufwänden und EoL-Gutschriften, weshalb der Substitutionsansatz die methodisch konsistenteste Wahl darstellt.

Sensitivitätsanalyse:

Eine Sensitivitätsanalyse der Anwendungsbeispiele folgt abschließend in Kapitel 5.4, mit Ausnahme des Einweggetränkebechers, für welchen lediglich LCA, LCC und LCGA, jedoch nicht das LCA-Modell, vorliegen weshalb für diesen kein Sensitivitätsanalyse erfolgt.

5.1 Einweggetränkebecher

Im Jahr 2021 trat die Einwegkunststoffverbotsverordnung (EWKVerbotsV) in Kraft, welche den Einsatz von oxo-abbaubaren Polymeren, welche sich in der Umwelt chemisch zersetzen und in Mikroplastik fragmentieren, sowie den von expandiertem Polystyrol (EPS) in Einwegprodukten untersagt [170]. Der kompostierbare¹ thermoplastische Werkstoff Polylactic Acid (PLA) stellt eine Alternative zu dem bislang häufig verwendeten Polypropylen (PP) und Polyethylenterephthalat (PET) dar, auch im Hinblick auf die Verarbeitungseigenschaften. PLA wird durch Fermentation von Zucker, vornehmlich aus Mais oder Zuckerrohr, zu Milchsäure (im Englischen als lactic acid bezeichnet und namensgebend für den Kunststoff) und deren anschließender Synthese gewonnen. Zwar gilt PLA als biologisch abbaubar, doch ist stoffliches Recycling aus Perspektive der CE zu bevorzugen.

Die experimentellen Arbeiten von J. Ginter [173] zeigen, dass der übliche mechanische Aufbereitungsprozess von Kunststoffabfällen (Sortieren, Waschen, Zerkleinern, Compoundieren und Granulieren) für den Einweggetränkebecher aus PLA mit prozessualen Herausforderungen verbunden ist [173]. Zum einen ist der Durchsatz bei der Zerkleinerung gering, wodurch der spezifische Energieverbrauch ineffizient ausfällt. Zum anderen weist auch das Schreddergut eine geringe Rieselfähigkeit auf, was die Zuführung zum Compoundierprozess erschwert. Ginter kommt zu dem Ergebnis, dass ein zur mechanischen Zerkleinerung vorgelagerter thermischer Relaxationsschritt diese prozessuale Herausforderung eliminiert. Die Prozesskette des Recyclings (Sammeln, Sortieren, Waschen, Tempern, Zerkleinern) inkl. der Parameter wurde von [173] erforscht und validiert. Die daraus resultierenden Ergebnisse der LCA, LCC und LCGA basieren auf der Arbeit von [34]. Es handelt sich beim ersten Anwen-

¹ Nach DIN EN 13432 [171] gilt eine Verpackung als kompostierbar, sofern mindestens 90 % des Materials innerhalb von sechs Monaten unter industriellen Kompostierungsbedingungen zu CO₂, Wasser und Biomasse abgebaut wird [172].

ungsbeispiel um eine Methodendemonstration basierend auf den Erkenntnissen von [33;169].

Der thermische Prozess stellt eine Umkehr (Reverse-Merkmal) der zuvor eingebrachten Vorzugsrichtung durch das Thermoformen (Prozess-Merkmal) dar. Nachfolgend wird die RE-Methodik angewandt, welche die verfahrenstechnische Lösung im EoL systematisch identifiziert, indem entsprechende Reverse-Merkmale abgeleitet werden. Das Anwendungsbeispiel wird als einleitender Fall vorgestellt, da für das betrachtete Produktsystem bereits Ergebnisse aus LCA, LCC und LCGA vorliegen und diese im Folgenden ausschließlich im Rahmen der RE-Methodik zur systematischen Ableitung, der bereits aus [34, 173] bekannten verfahrenstechnischen Lösungen, verwendet werden. Die funktionelle Einheit ist definiert als: Becher zur Bereitstellung von 400 ml Flüssigkeit zur einmaligen Nutzung.

5.1.1 Phase 1: Stand der Technik dokumentieren

In Schritt 1.1 der Methode ist, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, der momentane Lebenszyklus des Einweggetränkebechers inkl. des momentanen EoL zu dokumentieren. Zu den relevanten Randbedingungen zählen die Einwegkunststoffverbotsverordnung, das Produktsicherheitsgesetz und die Rahmenbedingungen für Lebensmittel-Kontaktmaterialien (z.B. Richtlinien 2002/72/EG und Verordnung (EU) Nr. 10/2011), welche sicherstellen, dass Einweggetränkebecher aus PLA über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg keine Gefahren für Verbraucher darstellen und keine unzulässigen Stoffe an Lebensmittel abgeben. Das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz und das Abfallrecht regeln darüber hinaus die Verantwortung der Hersteller von der RMA bis EoL (inklusive der Entsorgung) und zählen zu den Randbedingungen, welche auch das EoL betreffen.



Abbildung 5.1: Dokumentation des Produktlebenszyklus des Einweggetränkebechers aus PLA gem. Schritt 1.1. der RE-Methode

In Schritt 1.2 der RE-Methode ist eine vollständige LCA, LCGA und eine LCC der Ausgangslage, mit dem Index 0, zu erstellen.

Der Becher wird aus 10 g PLA hergestellt, welches als Granulat aus den USA bezogen und 6.300 km mittels Frachtschiffs und 1.700 km mittels Lastkraftwagen (LKW) nach Deutschland transportiert wird. Die Herstellung erfolgt durch die Extrusion des PLA zu einer Folie und anschließender Warmumformung (sog. „Thermoformen“) durch einen Tiefziehprozess in Becher-Form. Der Transport zur Kulturveranstaltung und anschließend zum Entsorgungsbetrieb ist mit 1.000 km mittels LKW berücksichtigt. Für das momentane EoL (thermische Verwertung) sind Gutschriften für die thermische, wie auch die elektrische Energie berücksichtigt.

Für das (LCA und LCC) LCI und die Modellierung wird auf [34] verwiesen, die Ergebnisse der Bewertung finden sich in Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Bewertung der Ausgangslage X_0 des Einweggetränkebechers mittels LCA, LCC und LCGA gem. Schritt 1.2 der Methode, eigene Darstellung auf Basis von [34].

Lebenszyklusphase		Klimawandel (gCO ₂ -e)	Lebenszykluskosten (€)
		I (X ₀) LCA	C (X ₀) LCC
Herstellung	E(I;C) _{RMA} RMA inkl. Transport	28,0	0,026
	E(I;C) _P Produktion	5,2	0,003
	E(I;C) _{RMA+P} Summe der Herstellung	33,2	0,029
	E(I;C) _{Use} Nutzung und Transport	0,8	0,003
EoL	E(I;C) _{EoL} EoL (ohne Gutschriften)	0,3	0,002
	E(I;C) _c Gutschriften	-6,1	0,0
	E(I;C) _{EoL+c} Summe EoL inkl. Gutschriften	-5,9	0,0
E(I;C) _{total} Total		28,2	0,032
E(I;C) _{LCG} absolut LCG		27,1	0,027
E(I;C) _{%LCG} relative LCG		82%	93%

5.1.2 Phase 2: Zielbild definieren

Das momentane Produktlebensende, die thermische Verwertung, stellt das EoL mit der geringsten Werterhaltung dar. Die relative ökologische LCG₀ beläuft sich auf 82 %, was die geringe Kreislauffähigkeit der Kreislaufstrategie R9 (siehe Abbildung 2.3) widerspiegelt. In Schritt 2.1 gilt es, eine höherwertige Kreislaufstrategie anzustreben, welche im vorliegenden Fall R8 (Recycling gem. Abbildung 2.3) ist und in die Lebenszyklusphase RMA einkoppelt. In Schritt 2.2 wird der angestrebte EoL_{new}-Pfad sowie die relevanten Unterprozesse (Urformen, Umformen, Nutzung) in das Schaubild zum Lebenszyklus zum Ergänzen, wie in Abbildung 5.2 dargestellt.

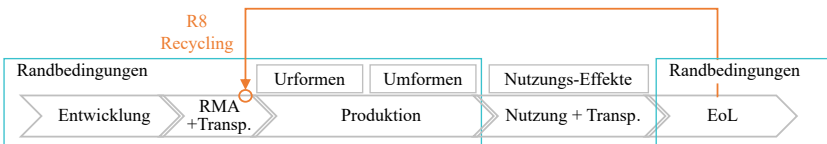


Abbildung 5.2: Eingezeichneter EoL_{new}-Pfad inkl. der kreislaufführungsrelevanten Unterprozesse des Einweggetränkebechers gem. Schritt 2.2 der RE-Methode.

5.1.3 Phase 3: Reverse-Engineering

In Schritt 3.1 werden die Prozess-Merkmale der Unterprozesse Urformen, Umformen und Nutzung unterhalb des EoL_{new} -Pfades ergänzt, wie in Abbildung 5.3 dargestellt.

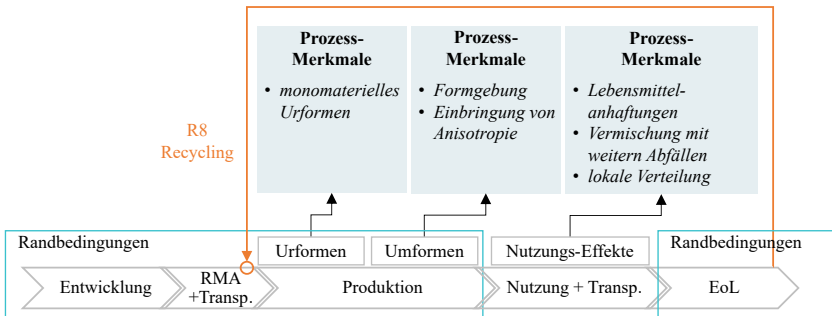


Abbildung 5.3: Prozess-Merkmale zu den Unterprozessen des Einweggetränkebechers gem. Schritt 3.1 der RE-Methode.

In Schritt 3.2 werden die verhindernden Prozess-Merkmale identifiziert, die im vorliegenden Fall sowohl aus der Nutzungsphase als auch aus dem Umformprozess resultieren. Während Sammlung, Sortierung und Waschen zum gängigen Verfahrensablauf der Gewinnung sogenannter Post-Consumer-Rezyklate (PCR) zählen, stellt die eingebrachte Anisotropie, was eine richtungsabhängige Eigenschaft des Materials bedeutet, ein untypisches Hindernis dar. Gemäß Schritt 3.3 der Methode werden, zur Ermöglichung des EoL_{new} -Pfades, die Reverse-Merkmale ergänzt wie in Abbildung 5.4 dargestellt. Die systematische Analyse ergibt eine fünfstufige Prozesskette zur Kreislaufführung der Becher. Zunächst werden die lokal verteilten Becher gesammelt und anschließend sortiert, um sie von anderen Abfallströmen zu trennen. Darauf folgt ein Waschschritt zur Entfernung von Lebensmittelrückständen. Um die Isotropie des Materials wiederherzustellen, werden die Becher anschließend getempert. Den Abschluss bildet die mechanische Zerkleinerung, die den bei der Extrusion entstandenen Stoffzusammenhalt auflöst.

Im ersten Anwendungsfall zeigt sich, dass zu den eingebrachten Prozess-Merkmalen die korrelierenden Reverse-Merkmale abgeleitet werden können. Im nachfolgenden Schritt 3.4 ist die angestrebte Reduktion der LCG durch eine erneute LCGA zu prüfen. Die Ergebnisse der LCGA werden zusammen mit den Resultaten der LCA_{new} und LCC_{new} in Tabelle 5.2 dargestellt. Durch die Befähigung zur Kreislaufführung sinkt die LCG_{new} auf 19 % und fällt damit 63 % geringer aus die LCG_0 der Ausgangslage. Damit ist die Bedingung einer reduzierten Lücke (siehe Formel 4.1 in Kapitel 4.3) erfüllt, sodass die abschließende Erfolgskontrolle in Phase 4 durchgeführt werden kann.

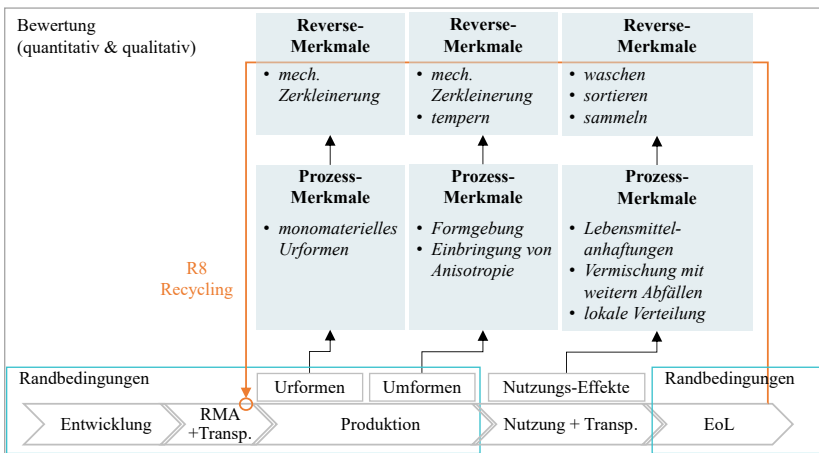


Abbildung 5.4: Reverse-Merkmale zu den Prozess-Merkmalen des Einweggetränkebechers gem. Schritt 3.3 der RE-Methode.

5.1.4 Phase 4: Erfolgskontrolle

Die abschließende Erfolgskontrolle umfasst eine vollständige LCA und LCC des neuen Produktsystems mit dem Ziel keine Trade-Offs zulasten der ökologischen und ökonomischen Gesamtbilanz einzugehen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Die LCA, als auch die LCC, zeigen eine deutliche Reduktion.

Tabelle 5.2: Bewertung des neuen Lebenszyklus des Einweggetränkebechers mittels LCA, LCC und LCGA gem. Schritt 3.4 und 4.1 der Methode.

Lebenszyklusphase		Klimawandel (gCO ₂ -e)	Lebenszykluskosten (€)
		I (X _{new}) LCA	C (X _{new}) LCC
Herstellung	E(I;C) _{RMA} RMA inkl. Transport	28,0	0,026
	E(I;C) _P Produktion	5,2	0,003
	E(I;C) _{RMA+P} Summe der Herstellung	33,2	0,029
	E(I;C) _{Use} Transport und Nutzung	0,8	0,003
EoL	E(I;C) _{EoL} EoL (ohne Gutschriften)	4,0	0,002
	E(I;C) _c Gutschriften	-27,0	-0,025
	E(I;C) _{EoL+c} Summe EoL inkl. Gutschriften	-23,0	-0,023
	E(I;C) _{total} Total	11,0	0,009
	E(I;C) _{LCG} absolut LCG	6,2	0,004
	E(I;C) _{%LCG} relative LCG	19%	14%

Der CO₂-Fußabdruck kann, durch diese Maßnahme zur Erhöhung der Kreislauffähigkeit von 28,2 gCO₂-e pro Becher mit thermischer Verwertung am EoL auf 11 gCO₂-e je Becher, d.h. um 61 %, gesenkt werden. Auch die Lebenszykluskosten sinken von 0,032 € auf 0,009 € pro Becher, also um 72 %. Somit sind die Bedingungen der Lebenszyklusbewertungen von Phase 4 erfüllt und der neue Lebenszyklus kann implementiert werden.

5.2 Fahrradhelm

Beim zweiten Anwendungsbeispiel handelt es sich um einen Fahrradhelm, welcher aus einer Vielzahl an Polymeren und metallischen Werkstoffen gefertigt wird (siehe Abbildung 5.5 links).

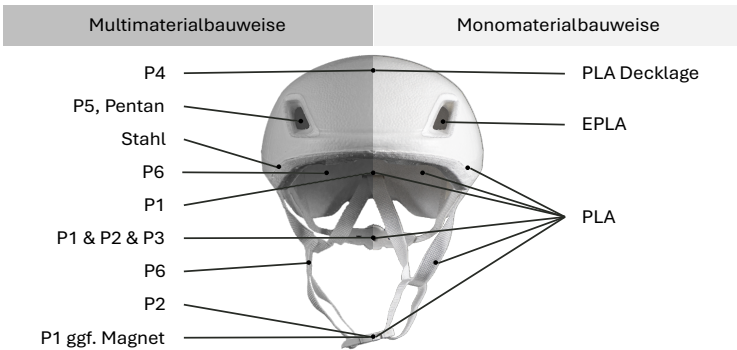


Abbildung 5.5: Fahrradhelm in konventioneller Multimaterialbauweise (links) unter Verwendung von sechs unterschiedlichen Thermoplasten P1-P6, sowie in Monomaterialbauweise (rechts).

Die Entwicklung einer nachhaltigen Alternative wurde im Rahmen des PIMMS-Projektes („Polylactic acid monomaterial sports goods“) durch die Fraunhofer-Zukunftsstiftung (06_ZP-2023_PIMMS) im Zeitraum 07/23-12/24 gefördert. Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines alternativen Materialsystems für Kunststoffprodukte mit reduziertem CO₂-Fußabdruck. Aufgrund bestehender Geheimhaltungsvereinbarung werden die verwendeten Kunststoffe der Multimaterialbauweise anonymisiert mit P1-P6 bezeichnet. Die funktionelle Einheit ist: Ein Helm zum Schutz des Kopfes, vor Kräften und vor Eindringen, beim Aufprall, welcher die Mindestanforderungen an die Widerstandsfähigkeit gegenüber Stößen nach DIN EN 1078, über eine zu erwartende Lebensdauer von 5 Jahren, erfüllt.

5.2.1 Phase 1: Stand der Technik dokumentieren

Der Helm, bestehend aus acht Bauteilen, wird aus acht Werkstoffen durch vier urformende, zwei umformende und drei fügende Produktionsverfahren hergestellt, wie in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Teile lassen sich in Anbauteile, die im letzten Produktionsschritt montiert werden und Kernbauteile, die miteinander verbunden werden, unterteilen. Aus P1 wird mittels Spritzguss die Schließe gefertigt, die im letzten Produktionsschritt montiert wird. Aus den Polymeren P1, P2 und P3 werden zusätzliche Komponenten mittels Spritzguss hergestellt, die anschließend zum sogenannten Fit-System montiert werden und die Größenverstellung des Helms ermöglichen. Aus P3 wird ein Anker mittels Spritzguss gefertigt, der zusammen mit der aus Stahl gefertigten Achse den Riemen im Helm befestigt. Die Decklage des Helms besteht aus einer Schale, die aus P4 mittels Extrusion und anschließendem Tiefziehen hergestellt wird. Der Schaumkern setzt sich aus P5 mit Pentan zusammen, die gemeinsam extrudiert und anschließend vorgeschäumt werden. Für den Tragekomfort wird ein Polster aus P6 mittels Schmelzspinnen gefertigt. Der Kinnriemen wird aus P1 durch Schmelzspinnen und einem anschließenden Webprozess hergestellt. Die Kernbauteile werden in einem thermischen Prozess (durch Umspritzen) verbunden, anschließend werden die Anbauteile montiert, sodass der Helm einsatzbereit ist.

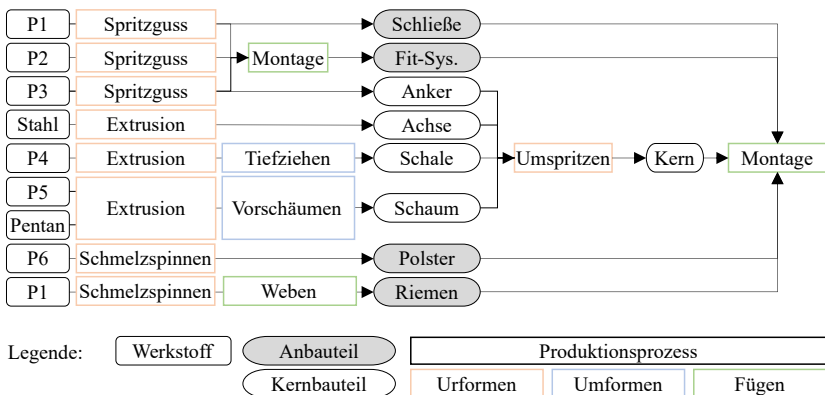


Abbildung 5.6: Produktionsprozess des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise.

In Schritt 1.1 wird der Lebenszyklus des Fahrradhelms und dessen EoL dokumentiert wie in Abbildung 5.7 dargestellt. Zu den relevanten Randbedingungen der Entwicklung, RMA und Produktion zählen die DIN EN 1078, welche die Anforderung an „Helme für Radfahrer und für Benutzer von Skateboards und Rollschuhen“ definiert. Die Vorschriften umfassen unter anderem Vorgaben zu den verwendeten Materialien, der Konstruktion, der Stoßdämpfungseigenschaft, der Langlebigkeit sowie der Befestigungseinrichtung. Zudem werden die relevanten Testmethoden definiert. In Bezug auf die Haltbarkeit wird festgelegt, dass der Helm keine Beschädigungen aufweisen darf. Herstellerhandbücher empfehlen, Helme nicht nur nach einem Aufprall, sondern auch nach einer definierten Nutzungsdauer oder einer definierten Dauer ab dem Kaufdatum auszutauschen. ABUS empfiehlt einen Austausch nach 4–5 Jahren, je nach Nutzung oder spätestens nach 8 Jahren [174], SCOTT nach 3 Jahren [175] und uvex nach 5 Jahren oder maximal 8 Jahren nach dem Kauf [176]. Hinsichtlich der Entsorgung oftmals auf die Abfallentsorgungsvorschriften des Landes verwiesen wird, welche in Deutschland auf kommunaler Ebene geregelt werden und bei Fahrradhelmen, aufgrund der Verbundbauweise, in der Regel die Entsorgung im Restmüll empfehlen (siehe kommunales Abfall-ABC Kreis Stuttgart [177] oder Kreis Karlsruhe [178]). Der Restmüll wird ohne weitere Sortierung thermisch verwertet [179].

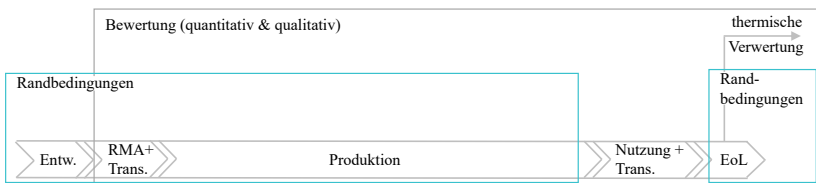


Abbildung 5.7: Dokumentation des Produktlebenszyklus des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise gem. Schritt 1.1. der RE-Methode.

Zur Quantifizierung der Ausgangslage wird in Schritt 1.2 eine LCA, LCGA und eine LCC erstellt. Das Produktsystem der Ausgangslage ist in Abbildung 5.8 in blau dargestellt.

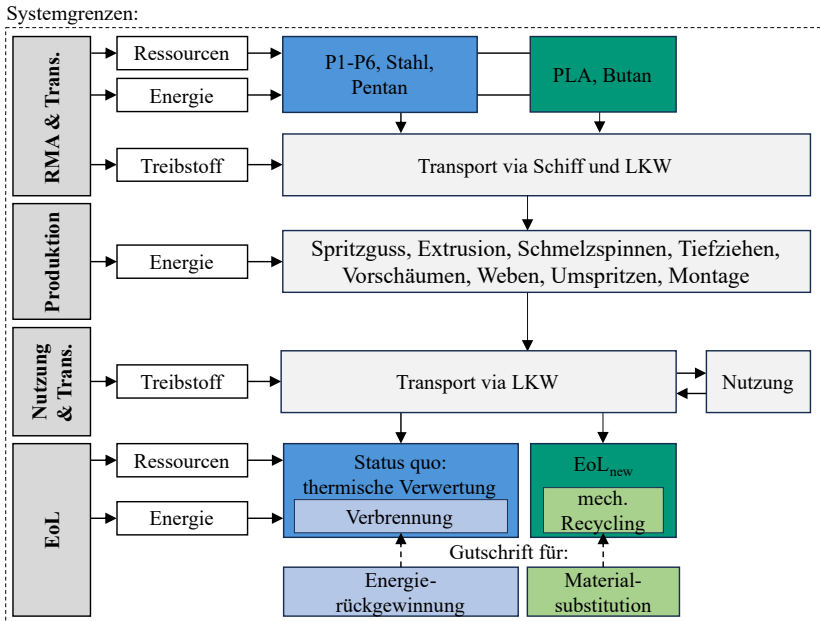


Abbildung 5.8: Produktsystem inkl. Systemgrenzen für den Fahrradhelm, wobei die Ausgangslage in blau und die Neuentwicklung in grün dargestellt ist.

Das LCI der LCA und LCC für das Produktsystem X_0 findet sich im Anhang in Tabelle 8.1, die Modellierung des LCA-Modells in Abbildung 8.1 und Abbildung 8.2, das LCC-Modell in Tabelle 8.2. Die Ergebnisse der LCA, LCC und LCG für das Produktsystem X_0 sind nachfolgend in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Tabelle 5.3: Bewertung der Ausgangslage X_0 des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise mittels LCA, LCC und LCGA gem. Schritt 1.2 der Methode.

Lebenszyklusphase			Klimawandel (kgC0 ₂ -e)	Lebenszykluskosten (€)
			I (X ₀) LCA	C (X ₀) LCC
Herstellung	E(I;C) _{RMA}	RMA inkl. Transport	1,29	0,82
	E(I;C) _P	Produktion	0,92	0,55
	E(I;C) _{RMA+P}	Summe der Herstellung	2,21	1,37
	E(I;C) _{Use}	Nutzung und Transport	0,00	0,01
EoL	E(I;C) _{EoL}	EoL (ohne Gutschriften)	0,74	0,04
	E(I;C) _c	Gutschriften	-0,22	-0,20
	E(I;C) _{EoL+c}	Summe EoL inkl. Gutschriften	0,53	-0,16
	E(I;C) _{total}	T otal	2,74	1,22
	E(I;C) _{LCG}	absolut LCG	2,0	1,17
	E(I;C) _{%LCG}	relative LCG	90%	85%

5.2.2 Phase 2: Zielbild definieren

Die thermische Verwertung am EoL resultiert in einer relativen LCG₀ in Höhe von 90 %. Dies stellt den Verlust von Ressourcen dar und widerspricht damit dem Zielbild der CE. Daher wird in Schritt 2.1 eine höherwertige Kreislaufstrategie angestrebt, die die Randbedingung berücksichtigt, dass ein Helm nach Ablauf der vorgesehenen Nutzungsdauer oder bei Beschädigung auszutauschen und zu vernichten ist. Im vorliegenden Fall ist das nächstkreislauffähigere EoL R8 (Recycling) gem. Abbildung 2.3. In Schritt 2.2 wird der angestrebte EoL_{new}-Pfad sowie die relevanten Unterprozesse ergänzt, wie in Abbildung 5.9 dargestellt.

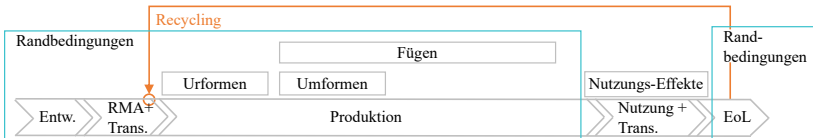


Abbildung 5.9: Eingezeichneter EoL_{new}-Pfad inkl. der kreislaufführungsrelevanten Unterprozesse des Fahrradhelms gem. Schritt 2.2 der RE-Methode.

5.2.3 Phase 3: Reverse-Engineering

Gemäß Schritt 3.1 sind die Prozess-Merkmale, welche die Beschaffenheitsänderungen sowie den Materialzusammenhalt beschreiben, in Abbildung 5.10, ergänzt.

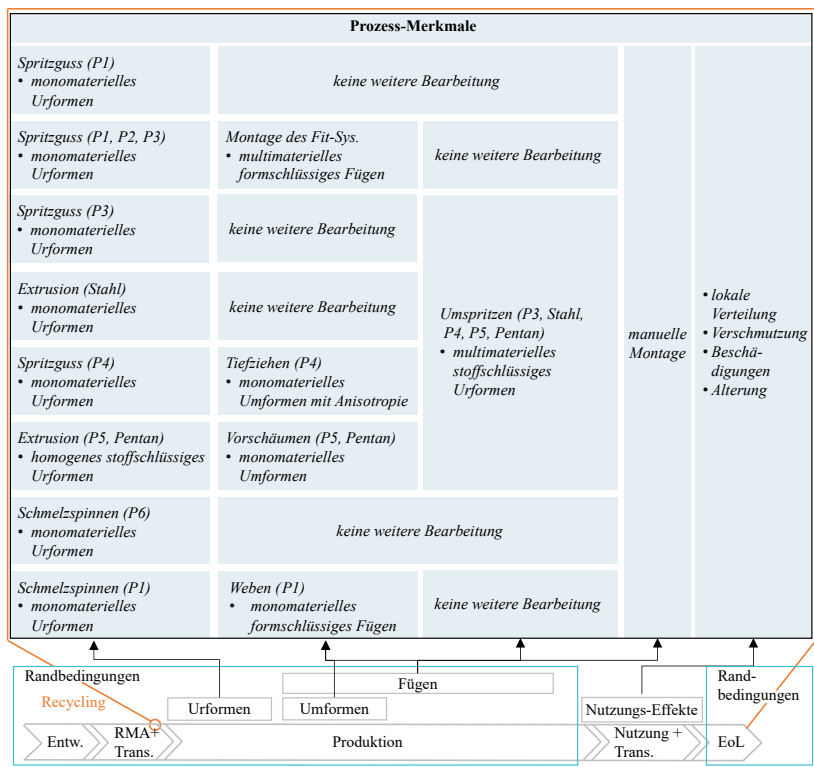


Abbildung 5.10: Prozess-Merkmale zu den Unterprozessen des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise gem. Schritt 3.1 der RE-Methode.

Zur Umsetzung des angestrebten EoL_{new} (R8; Recycling) gilt es die verhin- dernden Prozess-Merkmale zu identifizieren, welche diese Kreislaufführung momentan verhindern. Nahezu alle Prozess-Merkmale lassen sich zur Errei- chung von R8 rückabwickeln und ein Reverse-Merkmal ableiten, um in den

Zustand der Lebenszyklusphase RMA zurückzukehren, wie in Abbildung 5.11 dargestellt, mit Ausnahme der in orange markierten Einträge.

- Umspritzen von (P3, Stahl, P4, P5, Pentan). Das stoffschlüssige Urformen von Anker, Achse, Schale und Schaum, stellt eine unlösbare Verbindung dar, welche sich nicht zerstörungsfrei lösen und sich folglich die Stoffströme nicht trennen, lassen. Es stellt ein verhinderndes Prozess-Merkmal dar, gekennzeichnet in Abbildung 5.11 mit einem roten Kreuz.
- Beschädigungen und Alterung während der Nutzungsphase beeinträchtigen die Schutzfunktion des Helms und stellen eine nicht rückabwickelbare Veränderung dar. Sie verhindern die angestrebte Kreislaufführung R8 (Recycling gem. Abbildung 2.3) jedoch nicht.

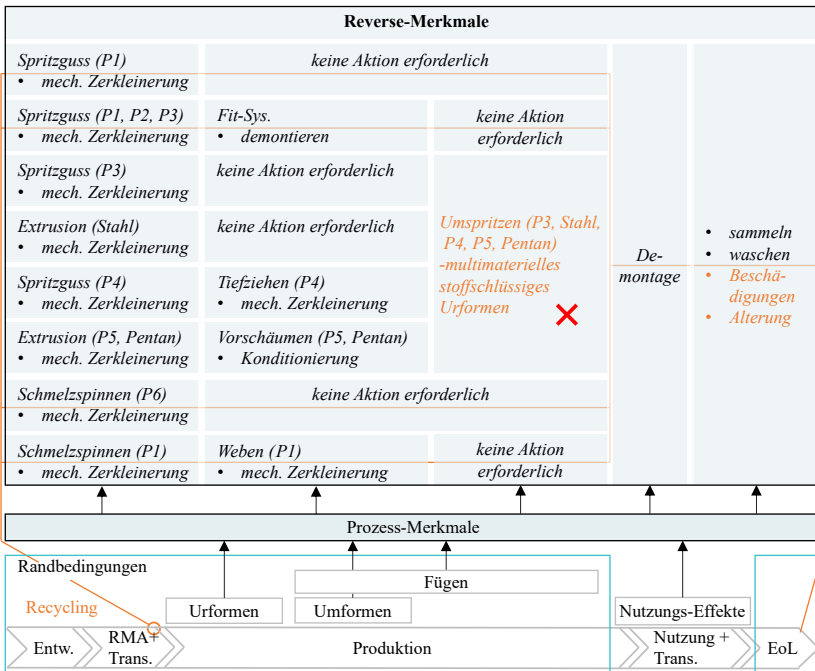


Abbildung 5.11: Reverse-Merkmale zu den Prozess-Merkmalen des Fahrradhelms in Multi-materialbauweise gem. Schritt 3.3 der RE-Methode.

Gemäß Schritt 3.3 der Methode gilt es für die nicht rückabwickelbaren Merkmale alternative Materialien oder (Herstell-) Prozesse zu finden. Der stoffschlüssige Urformprozess ist nicht rückabwickelbar und so müssen alternative Materialien oder Prozesse gefunden werden, gem. Schritt 3.3 der RE-Methode. Im Rahmen des PIMMS-Projektes wurde hierzu der Kern (Anker, Achse, Schale und Schaum) in Monomaterialbauweise aus PLA entwickelt und gefertigt. Neben dem Kern wurden ebenso die Anbauteile (Schließe, Fit-System, Polster und Riemen) aus PLA gefertigt, womit sowohl der Demontageschritt des Helms in Kern und Anbauteile als auch die Demontage des Fit-Systems entfällt und die notwendigen Prozessschritte für das mechanische Recycling minimiert werden. Die Anpassung der Materialwahl im Vergleich zur Modifikation der Konstruktion zur Ermöglichung der Demontage bietet den Vorteil, dass die bestehenden Fertigungswerkzeuge nicht verändert werden müssen. Die Wahl von PLA als Werkstoff hat zudem den Vorteil, dass es sich um einen biologisch abbaubaren Werkstoff handelt welcher, neben dem technischen, auch dem biologischen Kreislauf (siehe Abbildung 2.2, links) zugeführt werden kann. Zur Sicherstellung einer verbesserten Kreislauffähigkeit wird die LCG des neuen Produktsystems berechnet (siehe Abbildung 5.8, grün). Das Ergebnis, in Tabelle 5.4 dargestellt, fällt mit einer relativen ökologischen LCG $I(X_{\text{new}})\%_{\text{LCG}}$ in Höhe von 63 % und der relativen ökonomischen LCG $C(X_{\text{new}})\%_{\text{LCG}}$ in Höhe von 53 % aus, womit die Bedingung der Formel 4.1, zur Steigerung der Kreislauffähigkeit, erfüllt sind.

5.2.4 Phase 4: Erfolgskontrolle

Zur Sicherstellung keine Trade-Offs, durch die Veränderung des Produktsystems, eingegangen zu sein wird gem. Phase 4 eine neue LCA und LCC erstellt und die Erfüllung der Bedingungen 4.2 und 4.3 (siehe Kapitel 4.3) geprüft. Das LCI der LCA_{new} und LCC_{new} findet sich im Anhang in Tabelle 8.3, die Modellierung des LCA-Modells in Abbildung 8.3 und das LCC-Modell in Tabelle 8.4. Die Ergebnisse der LCA_{new} , LCC_{new} und LCG_{new} sind nachfolgend in Tabelle 5.4 zusammengefasst. Sowohl die ökologische als auch die ökonomische Bewertung zeigen eine deutliche Verbesserung. Die LCA wird um 54 % von 2,74 kgCO₂-e auf 1,26 kgCO₂-e reduziert, die LCC von 1,22 € auf 0,85 €

um 30,3 %. Damit sind die quantitativen Bedingungen der Methode zur Steigerung der Kreislauffähigkeit unter Sicherstellung, die ökonomische und ökologische Gesamtbilanz (LCA und LCC) nicht zu verschlechtern, erfüllt und das neue Produktsystem kann am Markt eingeführt werden.

Tabelle 5.4: Bewertung des Fahrradhelms in Monomaterialbauweise mittels LCA, LCC und LCGA gem. Schritt 3.4 und 4.1 der Methode.

Lebenszyklusphase			Klimawandel (kgCO ₂ -e)	Lebenszykluskosten (€)
			I (X _{new}) LCA	C (X _{new}) LCC
Herstellung	E(I;C) _{RMA}	RMA inkl. Transport	0,87	0,82
	E(I;C) _p	Produktion	0,95	0,57
	E(I;C) _{RMA+p}	Summe der Herstellung	1,82	1,39
	E(I;C) _{Use}	Nutzung und Transport	0,00	0,01
EoL	E(I;C) _{EoL}	EoL (ohne Gutschriften)	0,11	0,11
	E(I;C) _c	Gutschriften	-0,68	-0,66
	E(I;C) _{EoL+c}	Summe EoL inkl. Gutschriften	-0,57	-0,55
	E(I;C) _{total}	Total	1,26	0,85
	E(I;C) _{LCG}	absolut LCG	1,1	0,73
	E(I;C) _{%LCG}	relative LCG	63%	53%

5.3 Roboter-Tragstruktur

Für die Manipulation (im Englischen als Handling bezeichnet) großer Bauteile durch Knickarmroboter bedarf es häufig einer Tragstruktur, welche am Flansch des Roboters montiert ist und als Anbindungspunkt der Greif- und Saugaktoren fungiert. Bei der Tragstruktur handelt es sich um eine anwendungsspezifische Sonderanfertigung, welche in der Regel aus Aluminiumnutprofilen, Winkel- und Gelenkverbindern sowie Nutensteinen und Schrauben gefertigt werden (siehe Abbildung 5.12). Die Tragstruktur zusammen mit den angebauten Aktoren, welche die Bauteile greifen, wird als Handlingstruktur bezeichnet. Im vorliegenden Anwendungsfall wird diese eingesetzt, um Einleger in einer Presse zu positionieren und anschließend eine fertige Sitzschale zu entnehmen und auf einem Förderband abzulegen.

Die funktionelle Einheit ist: Eine Tragstruktur, zur Anbringung von Anbauteilen (Gesamtmasse 5,26 kg) für die Manipulation von Einlegern sowie einer Sitzschale (Gesamtmasse 4,2 kg) über die Dauer von 10 Jahren bei 12,8 Betriebsstunden an 365 Tagen.

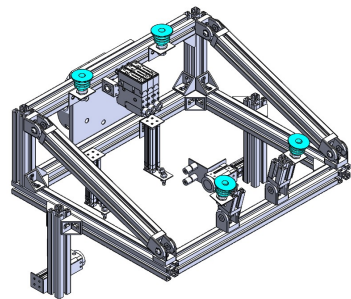
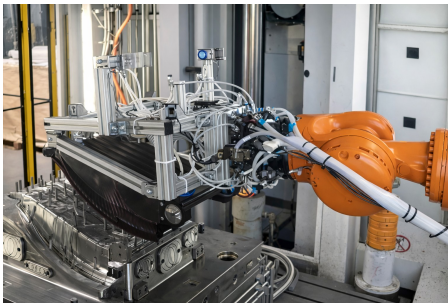


Abbildung 5.12: Handlingstruktur in Aluminiumbauweise, links beim Einlegen der Sitzschale in die Presse, rechts das CAD-Modell.

Aufgrund fehlender Detaildaten zur gewichtsabhängigen Leistungsaufnahme einzelner Roboter wurde eine lineare Regression der Leistungsaufnahme, unterschiedlicher Modelle und Traglasten anhand der technischen Spezifikatio-

nen, erstellt. Bei Angabe eines Traglastbereichs, wurde der Mittelwert gebildet. Die Validität der Interpolation zeigt sich an den Messwerten von [180, 181], welche die Linearität des gewichtsabhängigen Stromverbrauchs bei gleichbleibender Zykluszeit bestätigen. Die Veröffentlichung von [182] bestätigt ebenso, dass die Traglast linear in den Energieverbrauch eingeht.

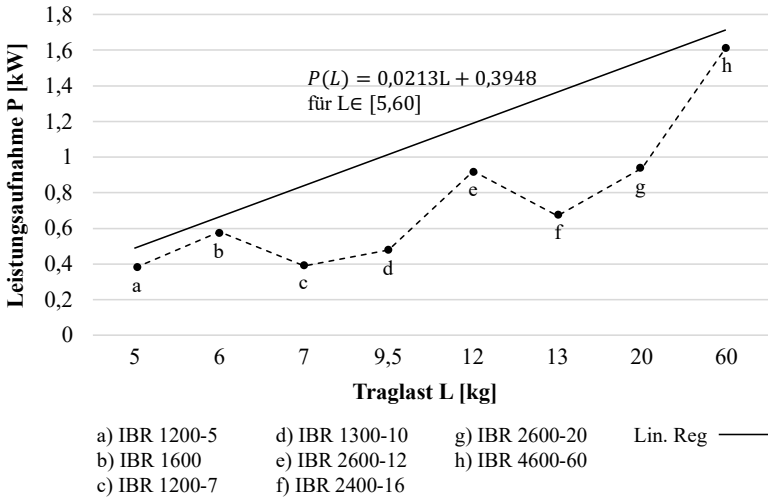


Abbildung 5.13: Traglastabhängige Leistungsaufnahme unterschiedlicher Knickarmroboter inkl. linearer Regression.

Die Ergebnisse der LCA und LCC der Ausgangslage aus Aluminium (X_{0AL}) sind in Tabelle 5.5 dargestellt und basieren auf dem LCI (siehe Tabelle 8.5) und der Modellierung des Lebenszyklus mithilfe der Software Sphera LCA for Experts (siehe Abbildung 8.4). Die untersuchten Bauvarianten sind am Fraunhofer ICT aufgebaut worden und die Bauteile aus Deutschland bezogen worden, weshalb Aufwände für den Transport nicht berücksichtigt werden. Für die Montagekosten werden 30 % der RMA veranschlagt, aufgrund der Kleinteiligkeit mit 123 Einzelteilen. Da die Demontage im Vergleich zur Montage erfahrungsgemäß deutlich schneller vonstattengeht, werden hierfür 15 % der RMA-Kosten veranschlagt, somit die Hälfte der Montageaufwände. Die Sig-

nifikanz der Nutzungsphase $E(I;C)_{Use}$, mit einem Anteil von 99,8 % am CO_2 -Fußabdruck und 97,9 % an den Lebenszykluskosten, resultiert aus der traglastabhängigen Leistungsaufnahme (für X_{0AL} $P(L=9,44) = 0,596$ kW) und der Betriebsdauer der funktionellen Einheit. Eine leichtere Tragstruktur resultiert in einer verringerten elektrischen Leistungsaufnahme und folglich einem verringerten Energieverbrauch in der Nutzungsphase.

Tabelle 5.5: Bewertung der Ausgangslage X_{0AL} der Tragstruktur in Aluminiumbauweise mittels LCA, LCC und LCGA gem. Schritt 1.2 der Methode.

Lebenszyklusphase			Klimawandel (kgCO ₂ -e)	Lebenszykluskosten (€)
			I (X_{0AL}) LCA	C (X_{0AL}) LCC
Herstellung	E(I;C) _{RMA} RMA		90,01	139,86
	E(I;C) _P Produktion		1,14	41,96
	E(I;C) _{RMA+P} Summe der Herstellung		91,15	181,82
	E(I;C) _{Use} Nutzung		11.669,46	6.961,28
EoL	E(I;C) _{EoL} EoL (ohne Gutschriften)		4,03	26,79
	E(I;C) _e Gutschriften		-68,78	-57,07
	E(I;C) _{EoL+e} Summe EoL inkl. Gutschriften		-64,75	-30,28
	E(I;C) _{total} Total		11.695,86	7.112,82
	E(I;C) _{LCG} absolut LCG		11.600,68	6.904,21
	E(I;C) _{%LCG} relative LCG		25%	69%

Im Rahmen des Projektes „confidentAM“ („Continuous Fiber-Reinforced Low-Density Thermoplastic Additive Manufacturing“), gefördert durch das Technologietransfer-Programm Leichtbau des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWK) mit Förderkennzeichen 03LB3097A, wurde im Zeitraum 06/2023-05/2026 eine Leichtbaulösung entwickelt.

Diese besteht aus duromeren Carbon-Rundprofilen und 10 sogenannten Knotenelementen, welche als Eckverbinder fungieren und mittels 3D-Druck aus Ultrafuse® PAHT CF15 (PA mit 15 Gew.-% Carbonkurzfasern) hergestellt werden. Die Knoten werden anschließend mit Carbon-Endlosfaser (vom Typ MCP1223 Maru Hachi Corporation, mit PA-Matrix) mittels 3D-Roboter-Skelettwickeln (3DSW) umwickelt. Zur Befestigung der Rundprofile in den Knoten, wird eine Klemmverbindung durch Schlauchschellen hergestellt. Durch

die Verbindung von 3D-Druck und 3DSW lassen sich werkzeuglos Einzelanfertigungen mit effizienter Materialausnutzung herstellen.

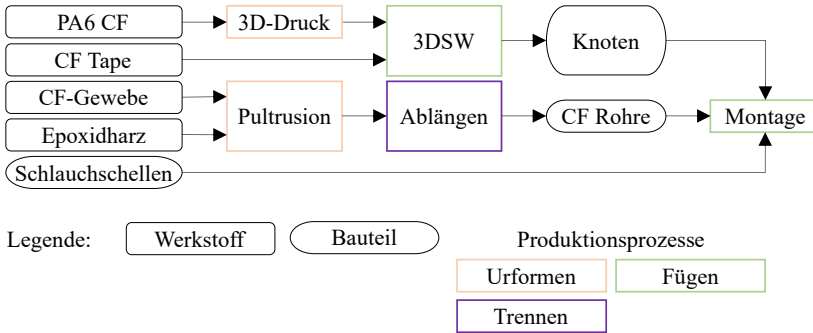


Abbildung 5.14: Produktionsprozess der Tragstruktur in Leichtbauweise V1.

Die Neuentwicklung ist in Abbildung 5.15 dargestellt. Die beschriebene Konstruktion wird im Nachfolgenden als Leichtbauweise V1 bezeichnet. Diese wiegt 3,04 kg was zu einer traglastabhängigen Leistungsaufnahme des Roboters $P(L=3,04) = 0,46 \text{ kW}$ führt. Für die Montage der 49 Einzelteile werden 10 % der RMA-Kosten veranschlagt. Für die Demontage werden, die Hälfte der Montageaufwände somit, 5 % veranschlagt.

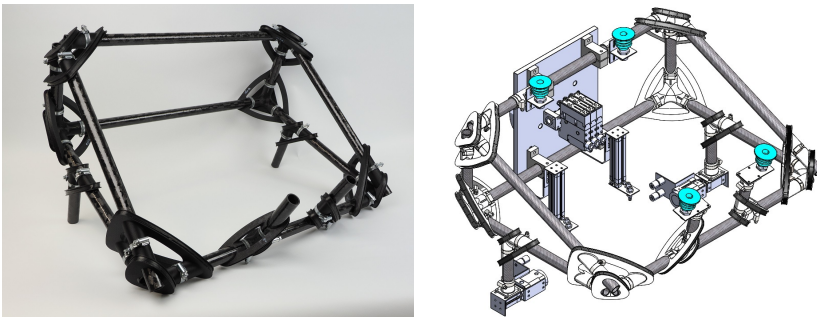


Abbildung 5.15: Handlingstruktur in Leichtbauweise V1, links dargestellt die montierte Tragsstruktur, rechts das CAD-Modell.

Am EoL werden die Knoten, aufgrund der identischen Faser-Matrix-Kombination aus PA6 und CF gewaschen, mechanisch recycelt und zu Sekundärmaterial (mit 65 % Substitutionsquote) verarbeitet. Der überwiegende Anteil glas- und carbonfaserverstärkter Kunststoffe wird gegenwärtig als Ersatzbrennstoff in Müllverbrennungsanlagen (MVA) thermisch verwertet [183, 184]. Die düromeren Rohre werden anwendungsspezifisch abgelängt und werden am EoL in MVA thermisch verwertet, wobei die Faserrückstände deponiert werden. Die Schlauchschellen werden wiederverwendet, weshalb 50 % der RMA-Kosten und Umwelteinflüsse am EoL gutgeschrieben werden. Die Hintergrunddaten sowie das LCI finden sich in Tabelle 8.7, die Modellierung des LCA-Modells in Abbildung 8.5 und das LCC-Modell in Tabelle 8.8. Die Ergebnisse sind nachfolgend in Tabelle 5.6 zusammengefasst.

Tabelle 5.6: Bewertung der Tragstruktur X_{newV1} in Leichtbauweise V1 mittels LCA, LCC und LCGA gem. Schritt 1.2 der Methode.

Lebenszyklusphase		Klimawandel (kgCO ₂ -e)	Lebenszykluskosten (€)
		I (X_{newV1}) LCA	C (X_{newV1}) LCC
Herstellung	E(I;C) _{RMA} RMA inkl. Transport	39,47	102,58
	E(I;C) _P Produktion	10,35	16,38
	E(I;C) _{RMA+P} Summe der Herstellung	49,82	118,96
	E(I;C) _{Use} Nutzung und Transport	9.059,44	5.368,74
EoL	E(I;C) _{EoL} EoL (ohne Gutschriften)	1,71	5,99
	E(I;C) _c Gutschriften	-10,24	-40,54
	E(I;C) _{EoL+c} Summe EoL inkl. Gutschriften	-8,53	-34,55
	E(I;C) _{total} Total	9.100,73	5.453,15
	E(I;C) _{LCG} absolut LCG	39,6	78,42
	E(I;C) _{%LCG} relative LCG	79%	66%

Der CO₂-Fußabdruck $E(I)_{\text{total}}$ der Leichtbauweise V1 ist im Vergleich zur Aluminiumbauweise um 22,2 % reduziert (von 11.695,86 kgCO₂-e auf 9.100,73 kgCO₂-e). Die Lebenszykluskosten $E(C)_{\text{total}}$ sind um 23,3 % (von 7.112,82 € auf 5.453,15 €) gesunken. Die alleinige Betrachtung der LCA und LCC, würde zu einer durchweg positiven Interpretation der Neuentwicklung fehlerleiten. Erst die Auswertung im Sinne der CE, mithilfe der ökologischen LCGA, zeigt eine Verschlechterung der $E(I)_{\%LCG}$ (von 25 % auf 79 %, vgl. Tabelle 5.5 und Tabelle 5.6) um 54 %. Die relative ökonomische LCG $E(C)_{\%LCG}$ konnte um 3 %

von ursprünglich 69 % auf 66 % gesenkt werden. Das Anwendungsbeispiel zeigt die Notwendigkeit zur Auswertung der LCC und LCA im Sinne der CE, die alleinige Betrachtung von LCA und LCC fehlerhaft ist. Nachstehend, wird die RE-Methode zur Steigerung der Kreislauffähigkeit der Neuentwicklung in Leichtbauweise V1 angewandt.

5.3.1 Phase 1: Stand der Technik dokumentieren

Zur Analyse der Ausgangslage werden die Lebenszyklusphasen und Randbedingungen der Tragstruktur in Leichtbauweise V1 gem. Schritt 1.1 der Methode in Abbildung 5.16 dokumentiert. Am EoL wird die Tragstruktur demonstriert und die Bauteile (Knoten, CF-Rohre, Schlauchschellen) werden wie folgt verwertet: Die Knoten werden mechanisch recycelt, die Schlauchschellen werden wiederverwendet und die Rohre werden thermisch verwertet wobei nur 41,8 Gew.-% in thermische und elektrische Energie umgesetzt wird. Die Faserreste werden deponiert. Zu den Rahmenbedingungen, für Entwicklung und Produktion, zählt die Maschinenverordnung, welche Anforderungen an die Sicherheit stellt. Das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz adressiert die Verantwortung der Hersteller von der RMA bis EoL, bei welchem ebenso das KrWG relevant ist, welches das Ziel verfolgt, geschlossene Kreisläufe zu schaffen. Die Ergebnisse der quantitativen Bewertung, gem. Schritt 2.1 der RE-Methode, sind in Tabelle 5.6 dargestellt.



Abbildung 5.16: Dokumentation des Produktlebenszyklus der Tragstruktur in Leichtbauweise V1 gem. Schritt 1.1.

5.3.2 Phase 2: Zielbild definieren

Phase 2 der RE-Methode beginnt mit der Identifikation von Potentialen zur Reduktion der LCG. Die bereits bestehende Wiederverwendung (R3 Reuse) der Schlauchschellen (in Abbildung 5.17 und Abbildung 5.16 dargestellt in grün), erfordert weder den Einsatz weiterer Rohstoffe noch werden Produktionsaufwände notwendig und stellt eine Verlängerung der Lebensdauer (gem. Abbildung 2.3) dar. Dies kann, im Vergleich zu den weiteren Bauteilen der Tragstruktur, als CE-Konform bewertet werden. Das nächstkreislauffähigere EoL ist „Reduktion“ (R2 Reduce), was konstruktiv umzusetzen wäre. Das bereits bestehende mechanische Recycling der Knoten (R8, dargestellt in Abbildung 5.16 und Abbildung 5.17 in grün) ermöglicht die Schließung eines stofflichen Kreislaufs (mit 65% Substitutionsquote), was ebenso als CE-Konform bewertet werden kann. Das nächstkreislauffähigere EoL ist „Umfunktionieren“ (R7 Repurpose), was aufgrund der Individualität der Knoten, welche anwendungsspezifisch gefertigt werden, nicht praktikabel ist. Die thermische Verwertung der Rohre (R9 Recover gem. Abbildung 2.3), stellt die am wenigsten kreislauffähige EoL-Option der Bauteile der Tragstruktur und auch aller R-Strategien, dar. Das nächstkreislauffähigere EoL ist Recycling (R8), welches die Schließung eines stofflichen Kreislaufs bedeutet und nachfolgend als EoL_{new} (dargestellt in Abbildung 5.17 in orange) dargestellt ist.

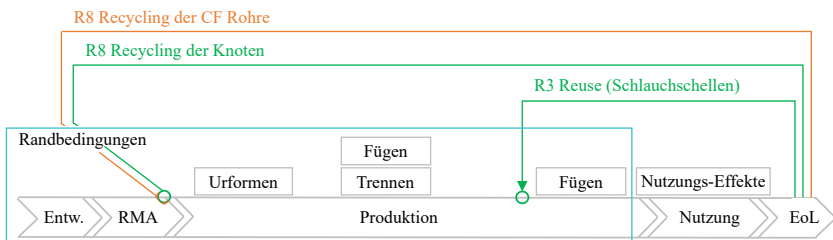


Abbildung 5.17: Eingezeichneter EoL_{new}-Pfad inkl. der kreislaufführungsrelevanten Unterprozesse der Tragstruktur in Leichtbauweise V1 gem. Schritt 2.2 der RE-Methode.

5.3.3 Phase 3: Reverse-Engineering

In Schritt 3.1 der RE-Methode werden die Prozess-Merkmale zu den Unterprozessen ergänzt, welche zwischen dem angestrebten Einkopplungspunkt in den Lebenszyklus (dargestellt als orangener Halbkreis in der Lebenszyklusphase RMA) und dem EoL liegen, wie in Abbildung 5.18 dargestellt.

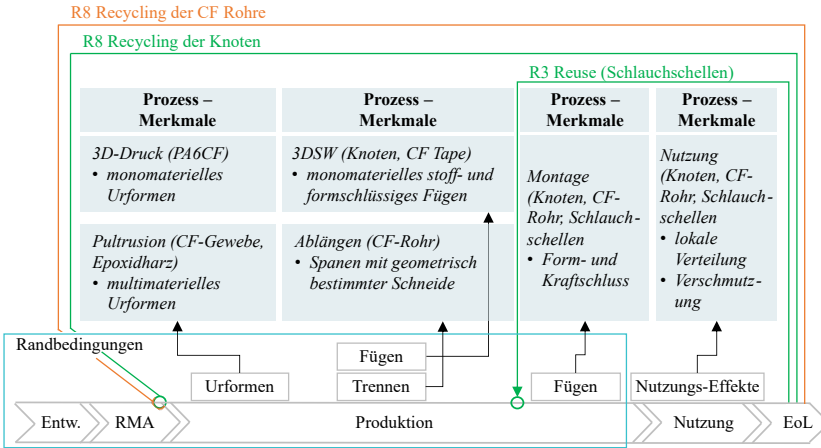


Abbildung 5.18: Prozess-Merkmale zu den Unterprozessen der Tragstruktur in Leichtbauweise V1 gem. Schritt 3.1 der RE-Methode.

Gem. Schritt 2.2 gilt es jene Prozess-Merkmale zu identifizieren, welche die angestrebte Kreislaufführung verhindern. Beginnend vom EoL ist zur Etablierung der stofflichen Kreislaufführung die Beseitigung der Verschmutzungen notwendig, da diese das Recycling stören. Die form- und kraftschlüssige Verbindung mittels Schlauchschellen gilt es aufzulösen, um die Bauteile (sortenrein) ihrer jeweiligen Kreislaufführung zuzuführen.

Wie in Abbildung 5.19 dargestellt, lassen sich die Prozess-Merkmale betreffend des Urformens durch 3D-Druck, des Fügens mittels 3DSW, der Nutzung und der Montage rückabwickeln, mit Ausnahme der orange markierten Prozess-Merkmale:

- Ablängen (CF-Rohr): Das Ablängen der Rohre ist nicht rückabwickelbar, stellt jedoch kein Hindernis für das angestrebte stoffliche Recycling dar.
- Pultrusion (CF-Gewebe, Epoxidharz): Das multimaterielle Urformen lässt sich nicht rückabwickeln, sodass Matrix und Fasern in stofflich verwertbarer Form vorliegen. Ursache hierfür ist die duomere Matrix (Epoxidharz), die eine Kreislaufführung verhindert. Duomere sind nicht schmelzbar, da das kovalente Netzwerk die Kettenmobilität unterbindet und diese durch Wärmezufuhr lediglich zersetzt werden [185, 186]. Zwar besteht die Möglichkeit, den Matrixwerkstoff mittels thermochemischer Verfahren (Pyrolyse) abzubauen und weitgehend von den Fasern zu separieren, doch ist dieses Verfahren sehr energieintensiv und daher häufig unwirtschaftlich [187]. Zudem wird die organische Fraktion aufgrund ihrer komplexen chemischen Zusammensetzung in der Regel lediglich energetisch verwertet, was R9 (Recover) entspricht und im Sinne der Stoffkreisläufe (siehe Abbildung 2.3) nicht kreislauffähig gilt.

Da es sich beim multimateriellen Urformen um einen (in der Praxis) irreversiblen Prozess handelt, welcher die angestrebte Kreislaufführung verhindert (gekennzeichnet in Abbildung 5.19 mit einem roten Kreuz) muss in Schritt 3.3 ein alternatives Material oder ein alternativer Prozess abgeleitet werden.

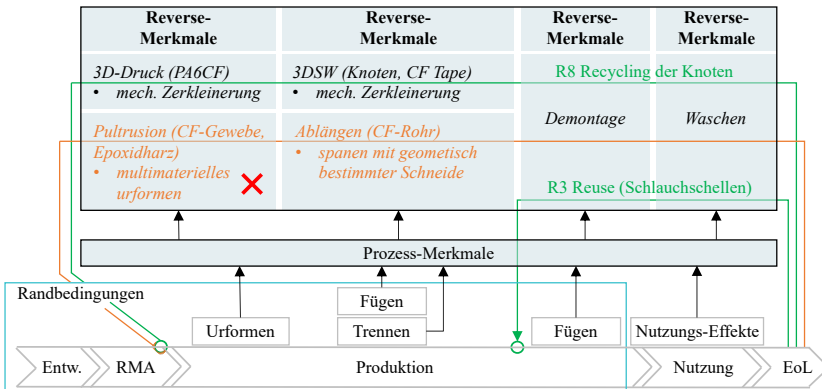


Abbildung 5.19: Reverse-Merkmale zu den Prozess-Merkmalen der Tragstruktur in Leichtbauweise V1 gem. Schritt 3.3 der RE-Methode.

Damit das multimaterielle Urformen rückabwickelbar ist, gilt es einen Matrixwerkstoff einzusetzen, der zusammen mit den CF-Fasern, durch die Prozesskette des mechanischen Recyclings (schreddern, waschen, compoundieren) recycelt werden kann. Aufgrund der bereits bestehenden Kreislaufführung der Knoten (bestehend aus PA6 und CF) wird auch für die Rohre PA6 als Matrixwerkstoff gewählt. Der Produktionsprozess der Tragstruktur bleibt damit unverändert, lediglich das Epoxidharz (siehe Abbildung 5.14) wird in der Leichtbauweise V2 durch PA6 ersetzt. Zur Bewertung der Auswirkungen der Materialsubstitution auf die Kreislauffähigkeit wird in Schritt 3.4 die LCG der Leichtbauweise V2 quantifiziert. Die Ergebnisse der LCGA sind in Tabelle 5.7, zusammen mit der Auswertung der LCA und LCC, dargestellt. Durch die Befähigung der Rohre zur Kreislaufführung wird die relative ökologische LCG um 13 % (von 79 % auf 66 %) gesenkt, die ökonomische um 25 % (von 66 % auf 41 %). Damit erfüllt die Tragstruktur in Leichtbauweise V2 die quantitativen Bedingungen des Schritts 3.4 der RE-Methode und kann aus CE-Perspektive positiv bewertet werden.

5.3.4 Phase 4: Erfolgskontrolle

Um sicherzustellen, dass die Anpassung des Produktsystems zugunsten der CE, nicht zulasten der ökologischen oder ökonomischen Gesamtbilanz gehen, erfolgt in Phase 4 der RE-Methode die Bewertung der Gesamtbilanzen. Durch die Substitution des Epoxidharzes mit PA6 reduziert sich das LCA $I(X)_{\text{total}}$ von 9.100,73 kgCO₂-e auf 9.033,88 kgCO₂-e was zu 89,2 % auf die Reduktion der Gesamtmasse (Dichte Epoxidharz: 1,2 g/cm³, Dichte PA6: 1,14 g/cm³) und den damit verbundenen Stromverbrauch zurückzuführen ist. 10 % der LCA-Gesamtreduktion resultieren aus gesteigerten Gutschriften $E(I)_C$, durch die Substitution von Primärmaterial. Die LCC $C(X)_{\text{total}}$ der Leichtbauweise V2 beläuft sich auf 5.416,01 € und konnte ebenso gesenkt werden (von V1 mit 5.453,15 €). Zu 16,4 % kann diese Reduktion auf den verringerten Stromverbrauch in der Nutzungsphase $E(C)_{\text{Use}}$ und zu 73,7 % auf die Gutschriften $E(C)_c$ für die Substitution von Primärmaterial zurückgeführt werden.

Die Reduktionen in der Nutzungsphase $E(I,C)_{\text{Use}}$ resultieren aus den Annahmen zur Betriebsdauer (siehe funktionelle Einheit) und der linearisierten traglastabhängigen Leistungsaufnahme während die Reduktion der LCG $E(I,C)_{\text{LCG}}$ unabhängig dieser Variablen und damit unabhängig der Anwendungsintensität sind.

Sowohl LCA als auch LCC erfüllen die Bedingungen der Phase 4, weshalb das neue Produktsystem X_{newV2} abschließend implementiert werden kann.

Tabelle 5.7: Bewertung der Tragstruktur X_{newV2} in Leichtbauweise V2 mittels LCA, LCC und LCGA gem. Schritt 3.4 und gem. Schritt 4.1 der Methode.

Lebenszyklusphase		Klimawandel (kgCO ₂ -e)	Lebenszykluskosten (€)
		I (X_{newV2}) LCA	C (X_{newV2}) LCC
Herstellung	E(I;C) _{RMA} RMA inkl. Transport	39,78	99,35
	E(I;C) _P Produktion	10,28	16,05
	E(I;C) _{RMA+P} Summe der Herstellung	50,07	115,40
	E(I;C) _{Use} Nutzung und Transport	8.999,84	5.362,65
EoL	E(I;C) _{EoL} EoL (ohne Gutschriften)	0,90	5,87
	E(I;C) _c Gutschriften	-16,93	-67,91
	E(I;C) _{EoL+c} Summe EoL inkl. Gutschriften	-16,03	-62,04
	E(I;C) _{total} Total	9.033,88	5.416,01
	E(I;C) _{LCG} absolut LCG	33,1	47,49
	E(I;C) _{%LCG} relative LCG	66%	41%

5.4 Sensitivitätsanalyse

Zur Überprüfung der Robustheit der ökologischen und ökonomischen Ergebnisse werden die zentralen Annahmen der Fallbeispiele (Fahrradhelm und Roboter-Tragstruktur) systematisch variiert. Die Ergebnisse der LCA, LCC und LCCA für das Fallbeispiel des Einweggetränkebechers basieren auf den Arbeiten von [34, 55, 173]. Da das zugrunde liegende LCA-Modell nicht zugänglich ist, wurde in diesem Fallbeispiel keine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Gemäß DIN EN ISO 14044 (siehe Kapitel 2.2.1, vierte Phase einer LCA) dient die Sensitivitätsanalyse der Einschätzung, inwieweit Unsicherheiten in den Daten und methodischen Entscheidungen die Schlussfolgerungen beeinflussen. Die Parameter (siehe Tabelle 5.8) werden als sensitivitätsrelevant eingestuft und jeweils in einem konservativen und einem optimistischen Szenario variiert. Variation um $\pm 15\%$ wurde in Anlehnung an übliche Unsicherheitsbereiche gewählt.

Tabelle 5.8: Variationsparameter der Sensitivitätsanalyse.

Parameter	Basiswert	konservativ	optimistisch
Strommix und Preis	DE: Electricity grid mix Sphera, 0,25€/kWh	DE: Electricity from heavy fuel oil, 0,29€/kWh	DE: Electricity gridmix (2040), 0,21€/kWh
Recycling - aufwände	siehe anwendungsspezifisches LCI	+15%	-15%
Transport - aufwände	siehe anwendungsspezifisches LCI	+15%	-15%

Die Basiswerte entsprechen den Daten, die für LCA, LCGA und LCC in den Anwendungsbeispielen genutzt wurden. Die konservative Variation beinhaltet die Variation des Strompreises für die LCC und des Strommixes für die LCA und LCGA, wobei der genutzte Datensatz die Stromerzeugung aus einem fossilen Energieträger widerspiegelt und somit einen erhöhten CO₂-Fußabdruck

bedingt. Darüber hinaus wurden die Recycling- als auch die Transportaufwände um jeweils 15 % gesteigert und deren jeweilige Auswirkungen quantifiziert. Für die optimistische Variation der Parameter wird ein verringerter Strompreis (0,21€/kWh) genutzt und ein Datensatz gewählt, welcher den erwarteten Strommix im Jahr 2040 widerspiegelt. Dieser enthält im Vergleich zum Basiswert einen höheren Anteil an Windenergie, Biomasse und Erdgas und bedingt somit einen verringerten CO₂-Fußabdruck. Des Weiteren wurden die Recycling- als auch die Transportaufwände um jeweils 15 % gesenkt und deren jeweilige Auswirkungen quantifiziert.

Durch die Betrachtung von drei Parametern mit jeweils zwei Szenarien ergeben sich sechs neue Bewertungen mit jeweils $I(X)_{\text{total}}$, $I(X)_{\% \text{LCG}}$, $C(X)_{\text{total}}$ und $C(X)_{\% \text{LCG}}$ für das Produktsystem der Ausgangslage X_0 und die Neuentwicklung X_{new} . In nachstehender Tabelle 5.9 finden sich die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Fahrradhelm, in Tabelle 5.10 jene der Roboter-Tragstruktur, wobei jeweils die relative Änderung in Bezug auf die Bewertung des Referenz-Produktsystems angegeben ist. Die absoluten Werte zu den Sensitivitätsanalysen finden sich im Anhang in Tabelle 8.11.

Tabelle 5.9: Sensitivitätsanalyse der LCA, LCC und LCGA des Fahrradhelms.

		konservativ (+15%)		optimistisch (-15%)	
		X_0	X_{new}	X_0	X_{new}
Strommix u. Preis	$I(X)_{\text{total}}$	31%	83%	-18%	-47%
	$I(X)_{\% \text{LCG}}$	-1%	13%	2%	-18%
	$C(X)_{\text{total}}$	6%	9%	-6%	-11%
	$C(X)_{\% \text{LCG}}$	0%	2%	0%	-3%
Recycling- aufwände	$I(X)_{\text{total}}$	4%	1%	-4%	-2%
	$I(X)_{\% \text{LCG}}$	0%	0%	0%	0%
	$C(X)_{\text{total}}$	0%	1%	-1%	-2%
	$C(X)_{\% \text{LCG}}$	0%	0%	0%	0%
Transport- aufwände	$I(X)_{\text{total}}$	1%	1%	-1%	-1%
	$I(X)_{\% \text{LCG}}$	0%	0%	0%	0%
	$C(X)_{\text{total}}$	1%	1%	-2%	-1%
	$C(X_0)_{\% \text{LCG}}$	0%	0%	0%	0%

Die konservative Variation des Strommixes führt zu einem Anstieg der LCA des Fahrradhelms ($I(X_{\text{new}})_{\text{total}}$) um 83 %, während die LCA der Ausgangslage (X_0) lediglich um 31 % ansteigt. Dies kann durch den hohen Anteil der elektrischen Energie an den ökologischen Produktionsaufwänden beider Bauteilvarianten begründet werden, wobei der elektrische Anteil am neuen Produktsystem deutlich größer ist, was am geringen Anteil der materialbedingten Emissionen des PLA liegt. Die ökologische LCG von X_0 sinkt um 1 % in der konservativen Betrachtung des Strommixes, was darin liegt, dass die Produktionsaufwände stärker vom Strommix beeinflusst werden als Gutschriften I. Dieselben Abhängigkeiten zeigen sich bei den Lebenszykluskosten $C(X)_{\text{total}}$. Die Variation der Recycling- und Transportaufwände hat hingegen nur einen marginalen Einfluss auf die Gesamtergebnisse.

Für die Sensitivitätsanalyse der LCA, LCC und LCGA der Roboter-Tragstruktur V1 und V2 werden ebenso die Parameter (siehe Tabelle 5.8) variiert, mit Ausnahme der Transportaufwände, welche im Anwendungsfall exkludiert sind. Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für die Roboter-Tragstruktur findet sich nachstehend in Tabelle 5.10.

Tabelle 5.10: Sensitivitätsanalyse der LCA, LCC und LCGA der Roboter-Tragstruktur in Bauweise V1 und V2.

		konservativ (+15%)		optimistisch (-15%)	
		X_{newV1}	X_{newV2}	X_{newV1}	X_{newV2}
Strommix u. Preis	$I(X)_{\text{total}}$	110%	110%	-62%	-62%
	$I(X)\%_{\text{LCG}}$	4%	6%	-2%	-5%
	$C(X)_{\text{total}}$	15%	15%	-15%	-15%
	$C(X)\%_{\text{LCG}}$	0%	1%	0%	0%
Recycling- aufwände	$I(X)_{\text{total}}$	0%	0%	1%	0%
	$I(X)\%_{\text{LCG}}$	0%	0%	0%	0%
	$C(X)_{\text{total}}$	0%	0%	0%	0%
	$C(X)\%_{\text{LCG}}$	0%	0%	0%	0%

Es zeigt sich ein vergleichbares Bild bei der Roboter-Tragstruktur, bei welcher die Strommix-Variation die Ergebnisse noch deutlicher beeinflusst, mit einem Anstieg von $I(X)_{\text{total}}$ um 110 % im konservativen Szenario und einer Reduktion

um 62 % im optimistischen Szenario. Die ökonomische Betrachtung variiert exakt um die 15 %ige Parameterveränderung, was die Dominanz der Nutzungsphase an den Lebenszykluskosten zeigt. Die Recyclingaufwände haben auch hier nahezu keinen Einfluss auf die Bewertung.

Der Strommix erweist sich als einflussreichster Parameter für beide Anwendungen. Trotz der teils erheblichen Schwankungen durch Variation des Strommix und dessen Kosten, bleiben die relativen Vorteilhaftigkeiten der jeweiligen Neuentwicklungen gegenüber den Ausgangsproduktsystemen (siehe hierzu die absoluten Werte in Tabelle 8.11) in allen Szenarien bestehen. Die absoluten Werte zeigen, dass die Bedingungen 4.1 und 4.2 in allen untersuchten Szenarien erfüllt bleiben. Die Schlussfolgerungen der vorangegangenen Analysen können somit als robust gegenüber den untersuchten Parameterunsicherheiten angesehen werden.

6 Diskussion

Die vorgestellte RE-Methode kombiniert präskriptive (R-)Strategien mit evaluierenden Methoden (LCA, LCC und LCGA) in einem iterativen Ansatz, gegliedert in vier Phasen mit respektiven Schritten. Ziel der Methode ist es, einen Beitrag zur Erreichung der CE zu leisten, indem durch die RE-Denkweise eingebrachte Veränderungen (sogenannte Prozess-Merkmale) entlang des (Produkt-)Lebenszyklus von RMA bis EoL hinsichtlich ihrer Eignung für die angestrebte Kreislaufführung bewertet werden. Die Methode zeigt damit CE-Schwachstellen auf und fordert (in Schritt 3.3) zur Rückabwicklung der eingebrachten Schwachstellen im Rahmen der angestrebten Kreislaufführung (sog. Reverse-Merkmale) oder zur Findung von alternativen Verfahren oder Materialien in der Herstellung auf, welche die angestrebte Kreislaufführung ermöglichen. Ziel ist die Verbesserung ($LCG_{\text{new}} < LCG_0$) der Kreislauffähigkeit unter der Bedingung, dass die ökologische und ökonomische Gesamtbilanzen nicht verschlechtert werden.

Damit wird eine Lücke geschlossen, die in Kapitel 3.1 identifiziert wurde: Präskriptive Methoden liefern keine quantitativen Ergebnisse; evaluierende Methoden liefern zwar quantitative Ergebnisse, geben jedoch keine konkreten Hinweise darauf, wie die Konstruktion angepasst werden sollte. Während LCA und LCC der CE-Perspektive keine explizite Beachtung schenken, ermöglicht die Einbindung der LCGA in die RE-Methode, die Auswertung der (normbasierten) LCA und LCC im Sinne der CE. Bestehende Ansätze des RE haben entweder keinen Bezug zur CE (bspw. in der Softwareentwicklung), weisen keine strukturierte Vorgehensweise auf oder beinhalten keine quantitativen Methoden. Die Denkweise des RE, durch gezielte Analyse bestehender Konstruktionen ein tiefes Verständnis zu erlangen und dieses Wissen zur gezielten Verbesserung einzusetzen, wurde bislang weder in der Literatur noch in der Praxis systematisch auf die Verbesserung der CE auf Produktebene angewandt. Die vorliegende Methode schließt diese Lücke erstmals.

Die vorgestellte RE-Methode verbindet, transparent und ohne Aggregation, die quantitativen Methoden (mit Fokus auf die CE) mit den präskriptiven Metho-

den und kombiniert diese mit dem RE-Denken zur Identifikation von CE-Hindernissen auf Produktebene. Anhand dreier Fallbeispiele (Einweggetränkebecher, Fahrradhelm und Tragstruktur) wurde die Methode demonstriert und erfolgreich Maßnahmen zur Reduktion der LCG abgeleitet, ohne Trade-Offs zu-
-asten der LCA und LCC einzugehen. Die Erkenntnisse aus den Fallbeispielen sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst sowie nachstehend formuliert:

- Einweggetränkebecher: Validierung der RE-Methode an einem bereits bekannten Fall. Die RE-Methode identifiziert systematisch den Umformprozess und die eingebrachte Anisotropie als hinderliches Merkmal für ein effizientes Recycling und leitet einen thermischen Relaxationsschritt als Reverse-Merkmal ab, was experimentell bereits validiert wurde [170]. Dies zeigt, dass die RE-Methode prozessuale Veränderungen identifiziert. Die ökologische LCG wurde um 63 %, die ökonomische um 79,3 % reduziert. Das LCA wurde um 60,8 % die LCC um 71,9 % reduziert.
- Fahrradhelm: Aufgrund der Materialzusammensetzung aus sechs Kunststoffen, Stahl und Pentan stellt die thermische Verwertung das EoL der Ausgangslage dar. Durch die RE-Methode wird ein stoffschlüssiger Fügeprozess als verhinderndes Merkmal für die stoffliche Kreislaufführung erkannt. Aufgrund der Randbedingung, dass der Helm am EoL vernichtet werden muss, wird eine Materialsubstitution (zur vollständigen Monomaterialbauweise aus PLA) abgeleitet, welche zur stofflichen Kreislaufführung befähigt. Hier zeigt sich die Stärke des systematischen Vorgehens unter Beachtung der Randbedingungen. Die ökologische LCG wurde um 27,4 %, die ökonomische um 31,5 % reduziert. Das LCA wurde um 54,2 %, die LCC um 30,3 % reduziert.
- Robotergreifer: Die alleinige Auswertung der LCA und LCC würde fehlleiten und die Leichtbauweise V1 vollständig positiv bewerten. Erst die LCG offenbart die Verschlechterung der Neuentwicklung aus CE-Perspektive. Durch die Anwendung der RE-Methode wurde eine Materialsubstitution abgeleitet (von Epoxidharz zu PA6), womit die relative LCG reduziert wurde. Die relative LCG der Leichtbauweise V2 zeigt damit zwar eine deutliche Verbesserung gegenüber Variante V1 und beide Leichtbauvarianten übertreffen hinsichtlich LCA und LCC

die Aluminiumbauweise, doch aus Kreislaufperspektive bleibt deren relativer LCG unerreicht. Die relative ökologische LCG wurde um 13,3 %, die relative ökonomische um 24,8 % reduziert. Das LCA und die LCC wurden um 0,7 % reduziert. Die marginale Verbesserung der LCA und LCC ist durch den hohen Anteil der Nutzungsphase (>99%) am Gesamtergebnis bedingt.

In allen drei Anwendungsfällen konnte die RE-Methode, durch die systematische Analyse der eingebrachten Veränderungen und jeweilige Beantwortung der Frage „Ist diese Veränderung hinderlich für die angestrebte Kreislaufführung?“, entweder eine Umkehrmaßnahme (siehe Einweggetränkebecher) oder eine Anpassung des Materialsystems (siehe Fahrradhelm und Robotergreifer) ableiten, wodurch sowohl die ökonomische und ökologische LCG reduzieren, wie auch die LCA und LCC reduziert wurden.

Tabelle 6.1: Ergebnisse der RE-Methode aller Anwendungsbeispiele qualitativ und quantitativ.

	Einweggetränkebecher	Fahrradhelm	Roboter-Tragstruktur
Abbildung des neuen Produktsystems			
identifizierte Füge Technologien und Materialauswahlstrategie	-	stoffschlüssiges Urformen bedingt durch Umspritzen Monomaterialstrategie	Urformen mit duromerer Epoxidharz-Matrix im integralen CF-Verbund teilw. Materialsubstitution
identifizierte, werkstoffliche Veränderung	prozessinduzierte Anisotropie durch Thermoformen	molekulare Bindung der multiplen Fügepartner	kovalente Netzwerke ohne Kettenmobilität
Auswirkung auf die Kreislauffähigkeit	verringerte Effizienz beim Schreddern und Compoundieren	thermische Verwertung aufgrund der unlösbaren Verbindung	thermische Verwertung aufgrund der kovalenten Vernetzung
Reverse-Merkmal	Rückabwicklung Werkstoffzustand (therm. Relaxation)	vollständige Materialsubstitution (8 Werkstoffe → PLA)	selektive Matrixsubstitution (Epoxid → PA6)
EoL: vorher → nachher	R8 → R8	R9 → R8	R9 → R8
quantitative Ergebnisse			
$\Delta E(I)_{\text{total}}$	- 61,0 %	- 54,0 %	- 0,70 %
$\Delta E(I)_{\%LCG}$	- 63,0 %	- 27,0 %	- 13,0 %
$\Delta E(C)_{\%LCG}$	- 79,0 %	- 32,0 %	- 25,0 %
$\Delta E(C)_{\text{total}}$	- 71,9 %	- 30,3 %	- 0,7 %

Eine Einschränkung, die aus dem Ziel der LCG-Minimierung resultiert und bereits aus [34] bekannt ist, ist die Außerachtlassung der grundsätzlichen Fragestellung, ob die Optimierung eines Produktes (wie eines Einweggetränkebechers) im Sinne der CE überhaupt sinnvoll ist. Hierzu lässt sich keine pau-

schale Antwort finden. Jedoch wird eine Methode, die durch Verbesserung eines Produktes auf die Verringerung der LCG abzielt, nicht zur im Sinne der CE beste Lösung kommen, welche R0 Refuse ist. Zu den wesentlichen Einschränkungen der Methode zählt des Weiteren:

- Eine hohe Anforderung an das erforderliche Wissen über die Lebenszyklusphasen und Prozesse (RMA, Herstellung, Nutzung, EoL) eines Produktes, um die Prozess-Merkmale und folglich die Reverse-Merkmale wie auch ggf. alternative Materialien und Prozesse ableiten zu können. Zusätzlich sind die vollständigen Produkt-, Herstell-, und Hintergrunddaten für eine vollumfängliche LCA und LCC notwendig und für deren Qualität entscheidend.
- Für alle drei Anwendungsbeispiele wurde der Wirkungsindikator Klimawandel (CO₂-e) gewählt. DIN EN ISO 14044 empfiehlt die Betrachtung mehrerer Wirkungskategorien, um Problemverlagerungen zwischen Umweltwirkungen sichtbar zu machen. Für die betrachteten Anwendungsbeispiele ist nicht auszuschließen, dass die anderen Wirkungskategorien abweichende Tendenzen aufweisen. Die Richtung der Veränderung (Verbesserung oder Verschlechterung) ist bei den untersuchten Produkten und den vorgenommenen Materialsubstitutionen für den Wirkungsindikator Klimawandel repräsentativ, da die Wirkungen (Energieverbrauch in der Produktion, Gutschriften durch Substitution) auch bei weitem Wirkungsindikator korrelieren. Die Erweiterung auf zusätzliche Wirkungsindikator verändert die Methodik der RE-Methode selbst nicht. Die Bedingungen 4.1 und 4.2 sind auf beliebige Wirkungsindikatoren anwendbar.
- Alle drei Fallbeispiele haben einen starken Polymerbezug. Die Übertragbarkeit auf metallische, keramische oder hybride Produkte ist plausibel (Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 decken die gesamte DIN 8580 ab), jedoch empirisch nicht validiert.
- Die mathematischen Bedingungen der Methode führen zu Pareto-Verbesserung (mindestens ein Akteur wird verbessert, ohne dass ein anderer verschlechtert wird), jedoch handelt es sich nicht (erwiesenerweise) um das Pareto-Optimum (bei dem keine weitere Verbesserung möglich ist ohne einen Akteur zu verschlechtern).

- Die Forderung, dass sowohl LCA als auch LCC nicht steigen dürfen, ist anspruchsvoll. In der Praxis können moderate Kostensteigerungen durch ökologische Verbesserungen gerechtfertigt sein.
- Die Methode adressiert die ökologische und ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit, jedoch nicht die soziale Dimension (gem. Agenda 21). Dies ist eine bewusste Fokussierung, sollte aber als Limitation benannt werden.
- Der Verzicht auf Diskontierung ($r = 0 \%$) bei der LCC ist methodisch durch die Vergleichbarkeit mit der LCA begründet, da Umweltwirkungen in der LCA zeitlich nicht diskontiert werden und eine einheitliche Behandlung zukünftiger Aufwände die Konsistenz beider Methoden sicherstellt. Gleichwohl ist anzuerkennen, dass dieser Ansatz langfristige ökonomische Effekte unterschätzt.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, einen systematischen Reverse-Engineering-Ansatz zur Verbesserung der Zirkularität und Werterhaltung von Produkten zu entwickeln und zu validieren. Nachfolgend werden die in Kapitel 1.2 formulierten Forschungsfragen auf Basis der Methodenentwicklung (Kapitel 4) und der drei Fallbeispiele (Kapitel 5) explizit beantwortet, bevor ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben wird. Die Erkenntnisse zu den Forschungsfragen 1 und 2 werden jeweils anhand der Anwendungsbeispiele dargelegt bevor abschließend eine zusammenfassende Antwort gegeben wird.

Forschungsfrage 1: Welche spezifischen Fügetechnologien und Materialauswahlstrategien können durch RE identifiziert werden, um die Recyclingfähigkeit und Werterhaltung von Produkten am Ende ihres Lebenszyklus zu erhöhen?

- Einweggetränkebecher: Der Becher wird vollständig aus PLA gefertigt und beinhaltet keine Fügetechnologien, weshalb keine direkten Erkenntnisse zu identifizierten Fügetechnologien oder Materialauswahlstrategien gewonnen wurden. Als hinderliches Merkmal wurde ein Umformprozess identifiziert, was zeigt, dass die Methode auch in weiteren Hauptgruppen der DIN 8580 CE-Schwachstellen erkennen kann und damit grundsätzlich auf unterschiedliche Klassen von Fertigungsverfahren anwendbar ist.
- Fahrradhelm: Das stoffschlüssige Urformen (Umspritzen) von drei Polymeren, Stahl und Pentan wurde als hinderlicher Prozessschritt identifiziert, da es eine sortenreine Trennung am EoL ausschließt. Dabei handelt es sich nicht um eine Fügetechnologie. Das Hemmnis liegt jedoch nicht allein am identifizierten Prozessschritt, sondern im Zusammenspiel mit dem Multimaterialsystem. Die in Schritt 3.3 abgeleitete Lösung adressiert daher die Materialauswahl, wodurch derselbe Herstellprozess beibehalten wird – die Änderung der Materialauswahl macht eine Anpassung des Prozessschritts obsolet.

- Tragstruktur: Das multimaterielle Urformen (Pultrusion) mit duromerer Epoxidharz-Matrix wurde als Hemmnis erkannt. Gemäß DIN 8580 handelt es sich nicht um einen Fügeprozess, sondern um ein Urformverfahren, da die Verbindung durch ko-konsolidierende Verbundherstellung entsteht. Die Substitution der Epoxidharz-Matrix durch thermoplastisches PA6 überführt den irreversiblen Verbund in einen stofflich recycelbaren Werkstoff – auch hier löst die Änderung der Materialauswahl die CE-Schwachstelle.

Als Materialauswahlstrategien identifiziert die RE-Methode die Monomaterialisierung (Helm: Reduktion von acht auf einen Werkstoff) und die selektive Matrixsubstitution (Roboter greifer: Epoxidharz durch PA6). Beide adressieren das Hemmnis über die Materialauswahl, während der jeweilige Fertigungsprozess (Umspritzen bzw. Pultrusion) beibehalten wird. Die übergeordnete Strategie besteht in der Schaffung sortenreiner bzw. kreislauffähiger Stoffströme, falls der eingesetzte Fertigungsprozess keine Trennung ermöglicht oder dieser unwirtschaftlich ist. Spezifische Fügetechnologien zur Erhöhung der Recyclingfähigkeit und Werterhaltung wurden nicht identifiziert. Beim Einweggetränkebecher wird keine Fügetechnologie eingesetzt und auch die Materialauswahl nicht verändert, sondern ein zusätzlicher Prozessschritt (thermische Relaxation) als Reverse-Merkmal eingeführt. Dieser Befund, wie auch die Erkenntnisse aus beiden anderen Anwendungsbeispielen, erweitern den Fokus der Forschungsfrage: Die RE-Methode identifiziert Hemmnisse der Recyclingfähigkeit und Werterhaltung am EoL nicht nur bei Fügetechnologien und Materialauswahlstrategien, sondern über die Fertigungshauptgruppen der DIN 8580 hinweg. Dies resultiert aus der Gestaltung der RE-Methode, die in Schritt 3.1 jede entlang des Lebenszyklus eingebrachte Veränderung auf ihre Eignung zur angestrebten Kreislaufführung prüft.

Forschungsfrage 2: Welche werkstofflichen Veränderungen im Lebenszyklus können mittels RE abgeleitet und für die Entwicklung einer effizienteren bzw. ökologischeren Kreislaufführung genutzt werden?

- Einweggetränkebecher: Der Werkstoff selbst bleibt chemisch unverändert; verändert wird sein durch die Herstellung geprägter Zustand. Die

Wirkung auf die Kreislaufführung besteht darin, dass die eingebrachte Richtungsabhängigkeit der Kettenorientierung die Effizienz der Kreislaufführung hemmt. Dieser Veränderungstyp ist in der bestehenden Ecodesign-Literatur (vgl. Kapitel 3.1) nicht explizit beschrieben, da präskriptive Methoden typischerweise Werkstoffauswahl und Konstruktion adressieren, nicht jedoch herstellungsbedingte Zustandsänderungen auf mikrostruktureller Ebene. Auch die Verschmutzung der Oberfläche, in der Nutzungsphase, stellt eine Veränderung des werkstofflichen Zustands dar, die mittels RE identifiziert wurde, wenn sie auch vergleichsweise trivial erscheint.

- Fahrradhelm: Durch Herstellung einer stoffschlüssigen Verbindung gehen die Moleküle der multiplen Fügepartner untereinander neue Bindungen ein. Dies stellt eine werkstoffliche Veränderung dar. Auch jene in der Nutzungsphase, welche Beschädigung und Alterung sind, werden mittels RE identifiziert und bedingen (zusammen mit den Randbedingungen) dass stoffliches Recycling und nicht bspw. die Wiederverwendung angestrebt wird.
- Tragstruktur: Die Substitution einer Werkstoffkomponente überführt den Werkstoffverbund der Rohre in ein stofflich kreislauffähiges Material, während der ursprüngliche Werkstoffverbund lediglich partiell thermisch verwertbar war. Hierdurch wird die Werterhaltung signifikant gesteigert. Die identifizierte werkstoffliche Veränderung betrifft zum einen die Vernetzungsreaktion der Matrix, zur Ausbildung des Netzwerks aus kovalenten Bindungen, zum anderen die chemische Faser-Matrix-Anbindung. Das Epoxidharz vernetzt irreversibel und die Fasern sind in die Matrix eingebunden, was eine Trennung und Rückgewinnung erschwert und mechanisches Recycling verhindert.

Durch die Anwendung konnten drei Typen der werkstofflichen Veränderungen identifiziert werden: Die reine Änderung der Orientierung der Makromolekülketten ohne Wechsel des Werkstoffs, eine Änderung der molekularen Bindung multipler Fügepartner und damit die umfassende Substitution des gesamten Materialsystems und eine gezielte Substitution einer Werkstoffkomponente aufgrund einer irreversiblen Vernetzungsreaktion der Matrix. Alle drei abgeleiteten Lösungen verschieben den EoL-Pfad in Richtung der CE (siehe hierzu

Abbildung 2.3) und bewirken damit eine quantifizierbare Reduktion der LCG und somit eine effizientere Kreislaufführung.

Forschungsfrage 3: Welche Elemente und Strategien aus dem RE können genutzt werden, um die Recyclingfähigkeit und Werterhaltung von polymerbasierten Produkten am Ende ihres Lebenszyklus zu erhöhen?

Die entwickelte RE-Methode greift auf bestehende Elemente und Strategien des Reverse-Engineerings zurück und überführt diese in einen strukturierten, CE-orientierten Kontext. Diese sind:

- Lernen von existenten Objekten: Nach [56] ist RE ein Lern- und Implementierungsprozess, um zu begreifen, wie ein Objekt funktioniert. Dieses Verständnis, von bestehenden Konstruktionen zu lernen, wird als Kern des RE-Ansatzes übernommen und auf den Produktlebenszyklus erweitert. Während [67] RE als Gewinnung von Konstruktions- und Geometriedaten eines physischen Objekts beschreibt, nutzt der entwickelte Ansatz, gem. des Lernprinzips von [60], RE um die Wechselwirkungen zwischen Herstellungsprozessen, Materialien und der Kreislauffähigkeit zu beleuchten. In Phase 1 (Schritt 1.1) wird der vollständige Lebenszyklus des bestehenden Produkts dokumentiert und in Schritt 3.1 analysiert, um aus dem Verständnis der bestehenden Konstruktion CE-Innovationsmöglichkeiten abzuleiten.
- Rückwärtsgerichtetes Problemlösen: Das zentrale Grundprinzip des RE „backward problem-solving“ nach [57] bildet das konzeptionelle Fundament der Methode, indem man vom Ziel, an welchem man enden möchte, rückwärtsgerichtet analysiert. In der entwickelten RE-Methode wird dieses Prinzip in Phase 2 (Zielbild definieren) und Phase 3 (Reverse-Engineering) umgesetzt: (1) Definition einer Vision des angestrebten Endzustands durch den EoL_{new} -Pfad, (2) Rückkehr zur gegenwärtigen Situation durch die Identifikation der Prozess-Merkmale und (3) sukzessive Verwirklichung der Vision durch die Ableitung der Reverse-Merkmale. Der angestrebte EoL_{new} -Pfad wird als Ziel definiert und die Methode arbeitet sich systematisch rückwärts durch die Lebenszyklusphasen, was das Konzept des lateralen Denkens von [145]

aufgreift, um jene Veränderungen zu identifizieren, die diesen Zielpfad verhindern. Die Frage, „Ist diese Veränderung hinderlich für die angestrebte Kreislaufführung?“ operationalisiert das „backward problem-solving“ auf Produktebene. Auch das „Backcasting“ von [79] beschreibt diese Denkweise zur Entwicklung kreislauffähiger Produkte.

- Systematische Zerlegung, Untersuchung und produktarchitekturbasierte Analyse: Die RE-Ansätze von [151] nutzen die systematische Zerlegung technischer Geräte, um die Funktion einzelner Bauteile zu identifizieren. Zusätzlich werden die dem Konstruktions- und Materialauswahlprozess zugrundegelegten Kriterien analysiert und alternative, „nachhaltigere“ Materialien oder Konstruktionen vorgeschlagen. Diese Elemente des RE werden in der RE-Methode in Schritt 3.1 (Identifikation der Prozess-Merkmale), Schritt 3.2 (Identifikation verhindernder Merkmale) und Schritt 3.3 (Ableitung von Reverse-Merkmalen bzw. alternativen Materialien/Prozessen) aufgegriffen. Die Dissertation erweitert diesen Ansatz, dem eine methodische Vorgehensweise mit klar definierten Bewertungskriterien fehlte, durch die Systematisierung entlang der Fertigungshauptgruppen (siehe Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2) und der Integration quantitativer Erfolgskontrolle mittels LCA, LCGA und LCC.

Die Dissertation schließt die drei zentralen Lücken bestehender RE-Ansätze (siehe dazu Kapitel 2.3), indem sie die oben genannten Elemente und Strategien in eine vierphasige, iterative Schrittabfolge überführt und mit präskriptiven DfX-Strategien sowie evaluierenden Methoden (LCA, LCC, LCGA) zu einem präskriptiv-bewertenden Rahmenwerk verbindet.

Aus den in Kapitel 7 diskutierten Limitationen ergeben sich folgende zukünftige Forschungsansätze:

- Transfer auf weitere Werkstoffklassen: Die empirische Validierung an metallischen, keramischen oder hybriden Produktsystemen steht aus. Die Übertragung auf weitere Werkstoffklassen würde die Generalisierbarkeit der Methode stärken und zugleich prüfen, ob die abgeleiteten

Materialstrategien (Monomaterialisierung, Matrixsubstitution) auch in anderen Werkstoffdomänen umsetzbar sind.

- Erweiterung der Wirkungsindikatoren: Zukünftige Arbeiten sollten die RE-Methode unter Beachtung weiterer Wirkungsindikatoren anwenden und untersuchen, ob die Bedingungen 4.1 und 4.2 (siehe Kapitel 4.3) bei Berücksichtigung multipler Wirkungskategorien weiterhin konsistent erfüllbar sind oder Zielkonflikte auftreten.
- Pareto-Optimalität: Die RE-Methode gewährleistet Pareto-Verbesserungen, prüft jedoch nicht auf Pareto-Optimalität. Multikriterielle Optimierungsverfahren könnten den Lösungsraum systematischer explorieren, steigern jedoch auch die Komplexität.
- Soziale Dimension: Vor dem Hintergrund des LkSG und zunehmender Anforderungen an soziale Verantwortung wäre die Integration einer S-LCA in den RE-Ansatz ein sinnvoller Erweiterungsschritt.
- Aufbau einer Datenbank für Prozess- und Reverse-Merkmale: Eine wesentliche Einschränkung der Methode ist die hohe Anforderung an das Fachwissen des Anwenders, um Prozess-Merkmale zu identifizieren und um korrespondierende Reverse-Merkmale abzuleiten. Der Aufbau einer systematischen Datenbank, die fertigungshauptgruppenspezifische Prozess-Merkmale mit bewährten Reverse-Merkmalen, alternativen Materialien und deren Auswirkungen auf die Kreislauffähigkeit verknüpft, könnte die Zugänglichkeit und Skalierbarkeit der Methode erheblich steigern. Darüber hinaus bietet sich die Untersuchung an, inwieweit KI-gestützte Ansätze, beispielsweise auf Basis von Materialwissensdatenbanken oder Natural Language Processing von Fachliteratur, die Ableitung von Reverse-Merkmalen unterstützen oder automatisieren können.
- Digitale Integration und Aufbau einer Datenbank: Der Aufbau einer systematischen Datenbank, die fertigungshauptgruppenspezifische Prozess-Merkmale mit bewährten Reverse-Merkmalen, alternativen Materialien und deren Auswirkungen auf die Kreislauffähigkeit ver-

knüpft, könnte die Skalierbarkeit der Methode erheblich steigern. Darüber hinaus bietet sich die Untersuchung an, inwieweit KI-gestützte Ansätze die Ableitung von Reverse-Merkmalen unterstützen oder automatisieren können.

Die RE-Methode liefert einen systematischen, quantitativ abgesicherten Beitrag zur Kreislaufwirtschaft auf Produktebene. Die Anwendung an drei Beispielen zeigt, dass der Grundgedanke des Reverse-Engineerings – von bestehenden Konstruktionen zu lernen und Kreislaufhemmnisse gezielt zu adressieren – ein wirksames Instrument für die Transformation zu zirkulären Produktsystemen darstellt. Die Verbindung von RE-Denkweise, DIN-8580-basierter Fertigungsanalyse und LCGA schließt die in Kapitel 3 identifizierten Lücken zwischen präskriptiven und evaluierenden EDM.

8 Anhang

Tabelle 8.1: LCI und Hintergrunddaten zur LCA und LCC des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise.

Fluss	LCI-Datensatz	Menge	Einheit	weiterführende Informationen
Transport Schiff Lkw: 600/675 Anteile werden der RMA zugerechnet. 75/675 Anteile der Nutzung und dem Transport zum EoL	RNA: Transport, ocean freighter, average fuel mix USLCI/Sphera GLO: Truck-trailer, Euro 5, 34 - 40t gross weight / 27t payload capacity (with SCR) Sphera <e-ep>	21.000 0,00815 675 0,23595	km €/t*km km €/t*km	21.000 km von Thailand nach Deutschland basierend auf [188]. Transportkosten basierend auf 3425€/20ft. Container mit 20t Zuladung [189]. Strecke von Hamburg nach KA nach Stuttgart, 674,9 km, 3981€ und 25 t Zuladung.
RMA P1 (Granulat)	unterliegt Geheimhaltungsvereinbarung	29,2 0,00280	g €/g	Preis basierend auf [190].
RMA P2 (Granulat)	unterliegt Geheimhaltungsvereinbarung	10 0,0023	g €/g	Preis basierend auf [191].
RMA P3 (Granulat)	unterliegt Geheimhaltungsvereinbarung	10 0,0024	g €/g	Preis basierend auf [191].

RMA P4 (Granulat)	unterliegt Geheimhaltungsvereinbarung	89 0,0032	g €/g	Preis basierend auf [191].
RMA P5 (Granulat)	unterliegt Geheimhaltungsvereinbarung	137,14 0,0014	g €/g	Preis basierend auf [190].
RMA P6 (Granulat)	unterliegt Geheimhaltungsvereinbarung	9,4 0,0017	g €/g	Preis basierend auf [190].
RMA Butane	CN: Butane Sphera	6,86 0,0011	g €/g	Preis basierend auf [192].
RMA Stahl (Stangenmaterial)	DE: Stainless steel sheet (EN15804 A1-A3) Sphera	2 0,0498	g €/g	Preis basierend auf [193].
Produktion Druckluft	RER: Compressed air Sphera	0,47 0,0054	m ³ €/m ³	Eigene Messungen mittels „VA 525 Druckluft Durchflussmesser“ am Fraunhofer ICT. Preis basierend auf [194].

Produktion Strom	DE: Electricity grid mix Sphera	2,17 0,25	kWh €/kWh	Eigene Messungen mittels „Fluke Energy Logger 1730“ am Fraunhofer ICT. Preis basierend auf [195].
Produktion Wasser	DE: Tap water from groundwater Sphera	0,0026 2	m ³ €/m ³	Eigene Messungen mittels „Reisser VW16405“ am Fraunhofer ICT. Preis basierend auf [196].
EoL thermische Verwertung	Waste incineration (plastics)	293,6 0,000145	g €/g	Vollständige Verbrennung. Gutschriften für die stoffliche Verwertung der Stahl-Achse (>1 Gew.-%) werden nicht vergeben. Preis basierend auf [197]
EoL-Gutschriften Rückgew. elektrischer Energie	DE: Electricity grid mix Sphera	-0,31 0,25	kWh €/kWh	Resultiert aus thermischer Verwertung. Preis basierend auf [195].
EoL-Gutschriften Rückgew. thermischer Energie	DE: Thermal energy from biogas Sphera	-0,73 0,17	kWh €/kWh	Resultiert aus thermischer Verwertung. Preis basierend auf [198].

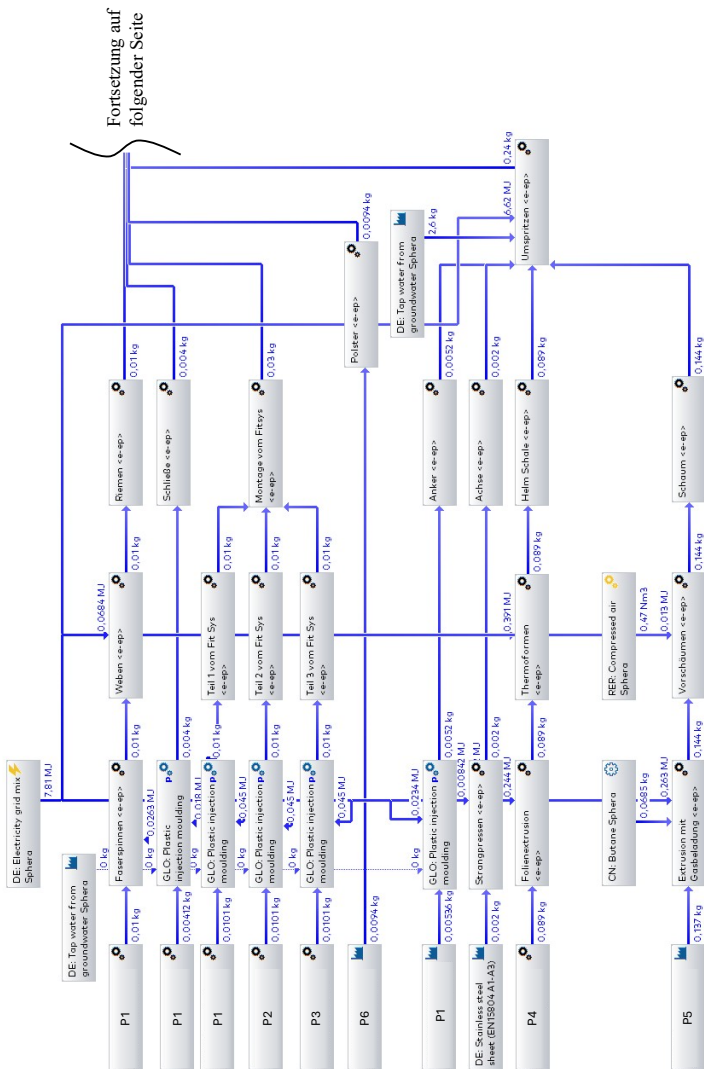


Abbildung 8.1: LCA-Modellierung des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise mithilfe der Software Sphera LCA for Experts. Teil 1 von 2.

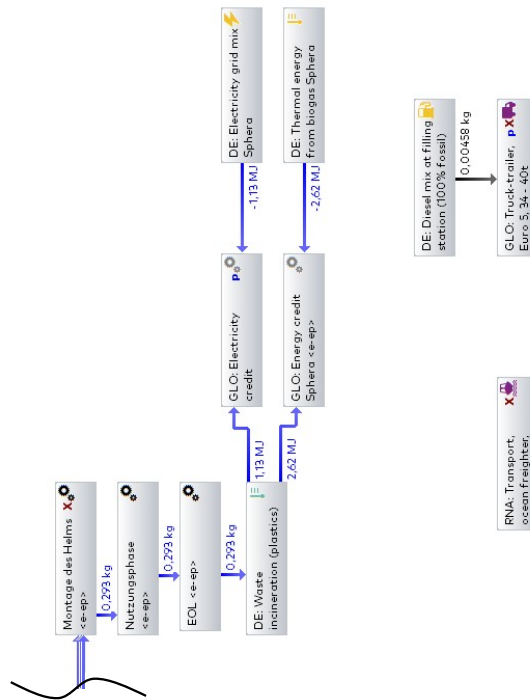


Abbildung 8.2: LCA-Modellierung des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise mithilfe der Software Sphera LCA for Experts. Teil 2 von 2.

Tabelle 8.2: LCC-Modellierung des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise.

Lebenszyklus-phase	Wertstrom	Menge	spezifische Kosten	Kosten
Transport	Schiff	21.000 km 293,60 g	0,0082 €/t*km	0,050 €
	LKW ^{*1,2}	675 km 293,60 g	0,2359 €/t*km	0,047 €
	Kosten Transport			0,097 €
	^{*1}	600/675 Anteil zugehörig der RMA		0,042 €
	^{*2}	75/675 Anteil zugehörig der Nutzung		0,005 €
RMA	P1	29,20 g	0,0028 €/g	0,082 €
	P2	10,00 g	0,0023 €/g	0,023 €
	P3	10,00 g	0,0024 €/g	0,024 €
	P4	89,00 g	0,0032 €/g	0,288 €
	P5	137,14 g	0,0014 €/g	0,189 €
	P6	9,40 g	0,0017 €/g	0,016 €
	Butan	6,86 g	0,0011 €/g	0,007 €
	Stahl	2,00 g	0,0498 €/g	0,100 €
	Gesamtmasse		293,60 g	
Kosten RMA (ohne Transport)			0,729 €	
Kosten RMA (mit Transport) C(X ₀) _{RMA}			0,821 €	
Produktion	elektrische Energie	2,17 kWh	0,25 €/kWh	0,543 €
	Wasser	0,0026 m3	2,00 €/m3	0,005 €
Kosten Produktion C(X ₀) _P			0,548 €	
Nutzung	Kosten Nutzung (ohne Transport)			0,000 €
	Kosten Nutzung (mit Transport) C(X ₀) _{use}			0,005 €
EoL	Kosten für Verbrennung	293,60 g	0,000145 €/g	0,043 €
	Kosten EoL (ohne Recycling) C(X ₀) _{EoL}			0,043 €
	elektrische Energie	-0,31 kWh	0,25 €/kWh	-0,078 €
	thermische Energie	-0,73 kWh	0,17 €/kWh	-0,124 €
	Gutschriften EoL C(X ₀) _c			-0,202 €
	Kosten EoL (mit Gutschriften) C(X ₀) _{EoL+c}			-0,159 €
Kosten des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise C(X ₀) _{total}				1,215 €

Tabelle 8.3: LCI und Hintergrunddaten zur LCA und LCC des Fahrradhelms in Monomaterialbauweise.

Fluss	LCI-Datensatz	Menge	Einheit	weiterführende Informationen
Transport Schiff Lkw: 600/675 Anteile werden der RMA zugerechnet. 75/675 Anteile der Nutzung und dem Transport zum EoL.	RNA: Transport, ocean freighter, average fuel mix USLCI/Sphera	9819 0,00815	km €/t*km	9819 km von Houston (USA) nach Hamburg (DE) basierend auf [199]. Transportkosten basierend auf 3425€/20ft. Container mit 20t Zuladung [189].
	GLO: Truck-trailer, Euro 5, 34 - 40t gross weight / 27t payload capacity (with SCR) Sphera <e-ep>	675 0,23595	km €/t*km	Strecke von Hamburg nach Karlsruhe nach Stuttgart, 674,9 km, 3981€ und 25 t Zuladung.
RMA PLA (Granulat)	Ingeo Polylactide (PLA) biopolymer production	308 0,00252	g €/g	Preis basierend auf [190].
RMA Butane	CN: Butane Sphera	6,06 0,0011	g €/g	Preis basierend auf [192].
Produktion Druckluft	RER: Compressed air Sphera	0,47 0,0054	m ³ €/m ³	Eigene Messungen mittels „VA 525 Druckluft Durchflussmesser“ am Fraunhofer ICT. Preis basierend auf [194].
Produktion Strom	DE: Electricity grid mix Sphera	2,27 0,25	kWh €/kWh	Eigene Messungen mittels

				„Fluke Energy Logger 1730“ am Fraunhofer ICT. Preis basierend auf [195].
Produktion Heißdampf	DE: Tap water from groundwater Sphera	0,0026 2	m ³ €/m ³	Eigene Messungen mittels „Reisser VW16405“ am Fraunhofer ICT. Preis basierend auf [196].
EoL mechanisches Recycling und compoundieren	Plastic recycling (clean scrap)	293,6 0,000344	g €/g	Granulieren, Waschen, Metallabscheidung, Compoundierung und Pelletierung. Preis basierend auf [200].
EoL-Gutschriften durch Substitution von Primärmaterial	Ingeo Polylactide (PLA) biopolymer production	-269	g	85% des ursprünglichen Materials werden recycelt und sowohl ökologisch als auch ökonomisch gutgeschrieben.

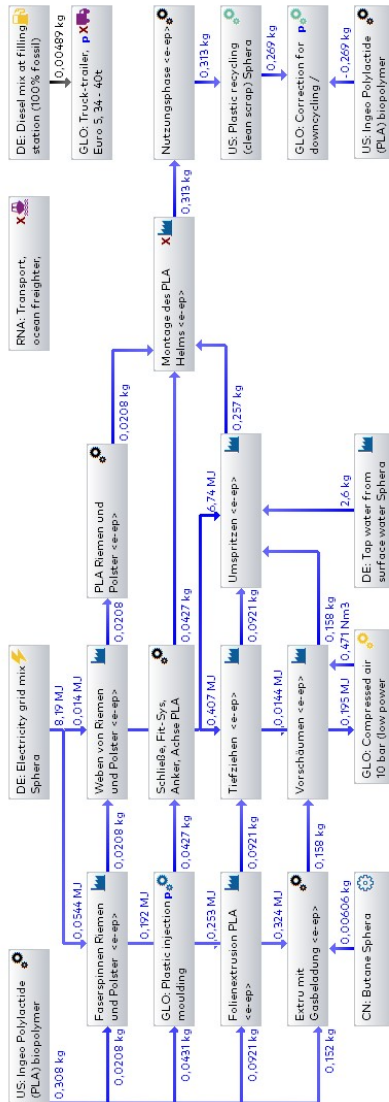


Abbildung 8.3: LCA-Modellierung des Fahrradhelms in Monomaterialbauweise mithilfe der Software Sphera LCA for Experts.

Tabelle 8.4: LCC-Modellierung des Fahrradhelms in Monomaterialbauweise.

Lebenszyklus-phase	Wertstrom	Menge	spezifische Kosten	Kosten
Transport	Schiff	9.819 km 313,25 g	0,0082 €/t*km	0,025 €
	LKW ^{*1,2}	675 km 313,25 g	0,2359 €/t*km	0,050 €
	Kosten Transport			0,075 €
	^{*1} 600/675 Anteil zugehörig der RMA			0,044 €
	^{*2} 75/675 Anteil zugehörig der Nutzung			0,006 €
RMA	PLA	307,19 g	0,0025 €/g	0,773 €
	Butan	6,06 g	0,0000 €/g	0,000 €
	Gesamtmasse	313,25 g		
	Kosten RMA (ohne Transport)			0,773 €
Kosten RMA (mit Transport) C(X _{new}) _{RMA}			0,817 €	
Produktion	elektrische Energie	2,27 kWh	0,25 €/kWh	0,568 €
	Wasser	0,0026 m3	2,000 €/m3	0,005 €
	Kosten Produktion C(X _{new}) _p			0,573 €
Nutzung	Kosten Nutzung (ohne Transport)			0,000 €
	Kosten Nutzung (mit Transport) C(X _{new}) _{use}			0,006 €
EoL	waschen, schreddern, compoundieren	313,25 g	0,00034 €/g	0,108 €
	Kosten EoL (ohne Gutschriften) C(X _{new}) _{EoL}			0,108 €
	Gutschrift 85 % der RMA	85%	-0,773 €	-0,657 €
	Gutschriften EoL C(X _{new}) _c			-0,657 €
	Kosten EoL (mit Gutschriften) C(X _{new}) _{EoL+c}			-0,549 €
Kosten des Fahrradhelms in Multimaterialbauweise C(X _{new}) _{total}				0,847 €

Tabelle 8.5: LCI und Hintergrunddaten zur LCA und LCC der Tragstruktur in Aluminiumbauweise

Fluss	LCI-Datensatz	Menge	Einheit	weiterführende Informationen
Transport	-	-	-	Nicht berücksichtigt.
RMA Aluminium-profile	DE: Aluminium extrusion profile primary	6,42 8,80	kg €/kg	Berechnung aus CAD-Modell. Preis basierend auf [201].
RMA Schrauben und Nutensteine	DE: Fixing material screws galvanized	0,92 28,09	kg €/kg	Eigene Messung am ICT. Preis basierend auf [202].
RMA Gelenkverbinder ¹	normierter Bauteilpreis	28,86 ¹ 21,69 ²	€/kg €/kg	Preis basierend auf [203] ¹ , [204] ² .
90° Winkelverbinder ²	DE: Aluminium alloy ingot (AlSi11) primary Sphera	1,67 ¹ 0,43 ²	kg kg	Eigene Messung am ICT.
Produktion Gelenkverbinder ¹	DE: Thermal energy from natural gas Sphera	0,87 ¹ 0,22 ²	kWh kWh	Basierend auf die-cast Datensatz. Nur LCA relevant.
90° Winkelverbinder ²	DE: Electricity grid mix Sphera	1,64 ¹ 0,42 ²	kWh kWh	
Produktion Montage (manuell)	Annahme	30 41,96	% €	30% der RMA-Kosten veranschlagt aufgrund der Kleinteiligkeit.

Nutzung	DE: Electricity grid mix Sphera	27845 0,25	kWh €/kWh	Basierend auf 0,596 kW und 46720h. Preis basierend auf [195].
EoL Demontage (manuell)	Annahme	15 20,98	% €	½ der Montagekosten wird veranschlagt.
EoL Sekundär-aluminiumherstellung	Aluminium recycling Greifer <e-ep> DE: Electricity grid mix Sphera	6,42 0,91 9,61	kg €/kg kWh	Die abgelängten Profile werden recycelt. Preis basierend auf [205]. Basierend auf Recyclingdatensatz. Nur LCA relevant.
EoL-Gut-schriften Sekundär-aluminium	DE: Aluminium extrusion profile (AlMgSi1) primary Sphera	-5,45 -2,82	kg €/kg	85% Substitutionsquote der RMA. Preis basierend auf [206] vom 02.02.2026.
EoL-Gut-schriften Reuse: Gelenkverbinder ¹ Winkelverbinder ² Nutensteine und Schrauben ³	Annahme GLO: Correction for downcycling / Credits	50 -24,10 ¹ -4,66 ² -12,92 ³	% € € €	Reuse: 50% der RMA-Kosten und RMA-Umweltwirkungen werden gutgeschrieben.

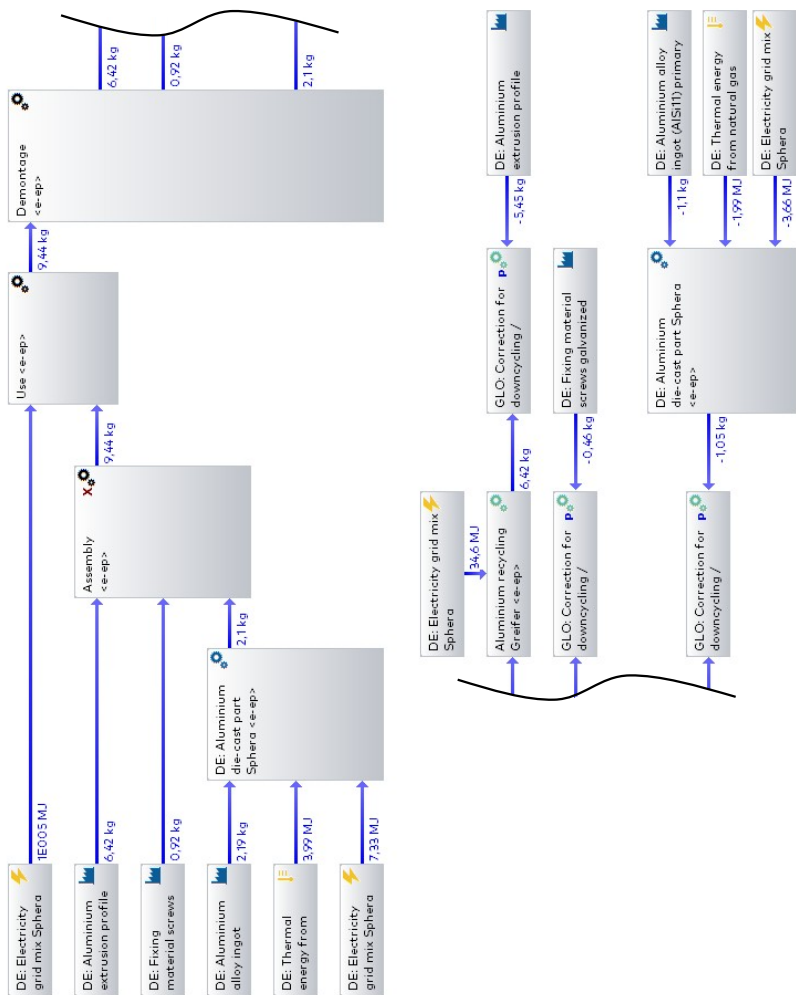


Abbildung 8.4: LCA-Modellierung der Tragstruktur in Aluminiumbauweise mithilfe der Software Sphera LCA for Experts.

Tabelle 8.6: LCC-Modellierung der Tragstruktur in Aluminiumbauweise.

Lebenszyklus-phase	Wertstrom	Menge	spezifische Kosten	Kosten
Transport	Wird nicht berücksichtigt.			0,00 €
RMA	Aluminiumprofile	6,42 kg	8,80 €/kg	56,50 €
	Nutensteine u. Schrauben	0,92 kg	28,09 €/kg	25,84 €
	Gelenkverbinder	1,67 kg	28,86 €/kg	48,20 €
	90° Winkelverbinder	0,43 kg	21,69 €/kg	9,33 €
	Gesamtmasse	9,44 kg		
		Kosten RMA	$C(X_{0AL})_{RMA}$	139,86 €
Produktion	Montagekosten (30% RMA)	30%	139,86 €	41,96 €
		Kosten Produktion	$C(X_{0AL})_P$	41,96 €
Nutzung	elektrische Energie	27.845 kWh	0,25 €/kWh	6.961,28 €
	Nennleistung Roboter bei 9,44 kg: 0,596 kW			
	Betriebsstunden (12,8h, 365d,10y): 46.720 h			
		Kosten Nutzung	$C(X_{0AL})_{use}$	6.961,28 €
EoL	Demontagekosten (15 % RMA)	15%	139,86 €	20,98 €
	Sekundäraluminiumproduktion	6,42 kg	0,91 €/kg	5,81 €
		Kosten EoL (ohne Gutschriften)	$C(X_{0AL})_{EoL}$	26,79 €
	Gelenkverbinder	50%	-48,20 €	-24,10 €
	90° Winkelverbinder	50%	-9,33 €	-4,66 €
	Nutensteine u. Schrauben	50%	-25,84 €	-12,92 €
	Sekundäraluminium (85 % Subq.)	5,46 kg	-2,82 €/kg	-15,39 €
		Gutschriften EoL	$C(X_{0AL})_c$	-57,07 €
		Kosten EoL (mit Gutschriften)	$C(X_{0AL})_{EoL+c}$	-30,28 €
Kosten des Tragstruktur in Aluminiumbauweise				$C(X_{0AL})_{total}$
				7.112,822 €

Tabelle 8.7: LCI und Hintergrunddaten zur LCA und LCC der Tragstruktur in Leichtbauweise V1.

Fluss	LCI-Datensatz	Menge	Einheit	weiterführende Informationen
Transport	-	-	-	Nicht berücksichtigt.
RMA PA6 CF15 Filament	Polyamide (6) with 15% Carbon fiber <LZ>	1,2 36,97	kg €/kg	Berechnung aus CAD-Modell. Preis basierend auf [207].
RMA CF Tape	Carbon fiber with PA6 <LZ>	0,252 36,30	kg €/kg	Eigene Messung am ICT. Angebotspreis ICT.
RMA CF Rohre		1,17 32,63	kg €/kg	Berechnung aus CAD-Modell. Preis basierend auf [208].
Carbonfaser	DE: Carbon fiber (CF; PAN-based; HT) - 08 Fraunhofer	0,676	kg	Basierend auf Datensatz zur Pultrusion:
Matrix	DE: Epoxy Resin (EP) Mix Sphera	0,484	kg	Pultrusion m epox <e-ep>
RMA Schlauchschellen	DE: Stainless steel sheet (EN15804 A1-A3)	0,42 25,63	kg €/kg	Berechnung aus CAD-Modell und Herstellerdaten. Preis basierend auf [209].
Produktion der Knoten	DE: Electricity grid mix Sphera	24,5 0,25	kWh €/kWh	Berechnet. Preis basierend auf [195].
3D-Druck „Bambu X1“		13,01	kWh/kg	Eigene Messung am ICT auf mithilfe des „Fluke

3DSW		35	kWh/kg	Energy Logger 1730“. s. o.
Produktion CF Rohre	DE: Electricity grid mix Sphera	0,07	kWh	Basierend auf Datensatz zur Pultrusion. Nur LCA-relevant, da LCC-Daten die Herstellung beinhaltet.
Druckluft	GLO: Compressed air 10 bar (medium power consumption) Sphera <e-ep>	0,267	m ³	
Produktion Montage (manuell)	Annahme	10 10,26	% €	10% der RMA-Kosten veranschlagt.
Nutzungsphase	DE: Electricity grid mix Sphera	21,475 0,25	kWh €/kWh	Basierend auf 0,46 kW und 46720h. Preis basierend auf [195].
EoL Demontage (manuell)	Annahme	5 5,13	% €	½ der Montagekosten wird veranschlagt.
EoL Knoten schreddern, waschen, compoundieren	US: Plastic recycling (clean scrap) Sphera	1,46 0,11 0,24	kg €/kg €/kg	Masse Knoten und Wicklung. Preis basierend auf [210]. Preis basierend auf [210];[200].
EoL CF Rohre schreddern, thermische Verwertung, Deponierung	EU-28: Shredding of CFRP FhG ICT	1,17 0,31 0,667	kg €/kg Kg	Preis basierend auf [211] bei 38,5% Marge [212].

	DE: Inert matter (Glass) on land-fill Sphera DE: Polyamide (PA) 6.6 in waste incineration plant (0% H2O content) Sphera <t-agg>	0,485	kg	Deponierung der Fasern.
EoL-Gut-schriften Knoten Sekundär-Rohstoffe	GLO: Correction for downcycling / Credits Sphera <e-ep> Polyamide (6) with 15% Carbon fiber <LZ>	1,46 -24,03 -0,943	kg €/kg kg	65% Substitutionsquote der RMA-Kosten und Umweltwirkungen.
EoL-Gut-schriften CF Rohre thermische Verwertung	DE: Electricity grid mix Sphera DE: Thermal energy from natural gas Sphera	1,17 -0,17 -0,54 -1,02	kg €/kg kWh kWh	Preis basierend auf [211] bei 38,5% Marge [212]. Gemäß Datensatz EU-28: DE: Polyamide (PA) 6.6 in waste incineration plant (0% H2O content) Sphera <t-agg>
EoL-Gut-schriften Reuse: Schlauchschellen	Annahme GLO: Correction for downcycling / Credits	50 -5,33	% €	Reuse: 50% der RMA-Kosten und RMA-Umweltwirkungen werden gutgeschrieben.

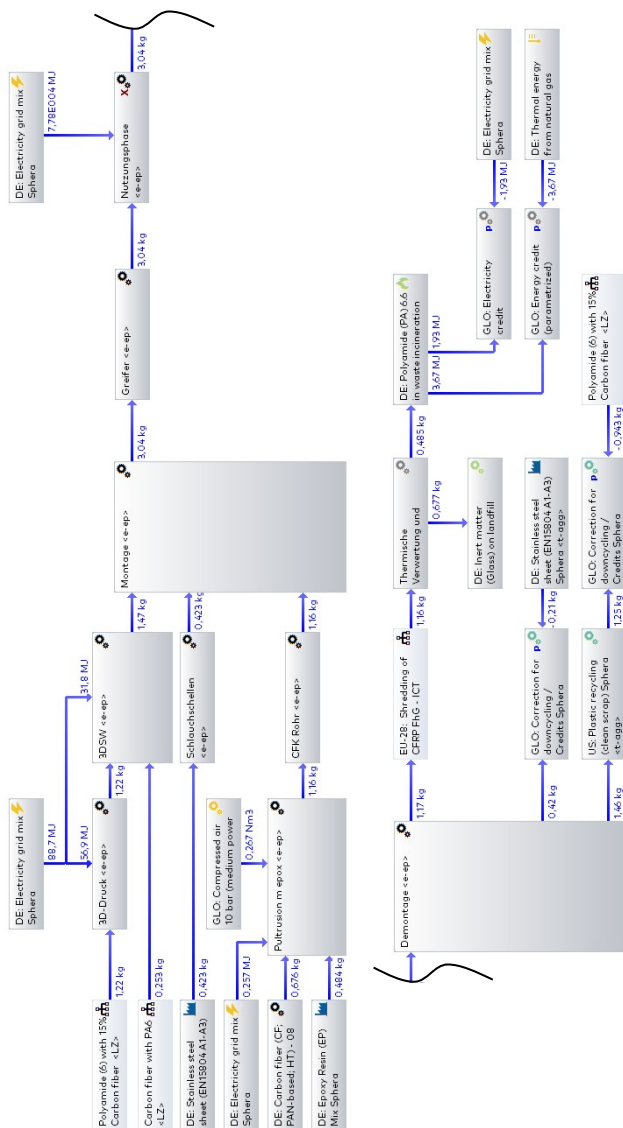


Abbildung 8.5: LCA-Modellierung der Tragstruktur in Leichtbauweise V1 mithilfe der Software Sphera LCA for Experts.

Tabelle 8.8: LCC-Modellierung der Tragstruktur in Leichtbauweise V1

Lebenszyklusphase	Wertstrom	Menge	spezifische Kosten	Kosten
Transport	Wird nicht berücksichtigt.			0,00 €
RMA	PA6 CF15 Filament	1,20 kg	36,97 €/kg	44,52 €
	CF Tape	0,25 kg	36,30 €/kg	9,14 €
	CF Rohre	1,17 kg	32,63 €/kg	38,27 €
	Schlauchschellen	0,42 kg	25,63 €/kg	10,66 €
	Gesamtmasse	3,04 kg		
Kosten RMA $C(X_{\text{newV1}})_{\text{RMA}}$			102,58 €	
Produktion	Strom für 3D-Druck + 3DSW	24,5 kWh	0,25 €/kWh	6,12 €
	Montagekosten (10 % RMA)	10%	102,58 €	10,26 €
Kosten Produktion $C(X_{\text{newV1}})_P$			16,38 €	
Nutzung	elektrische Energie	21.475 kWh	0,25 €/kWh	5.368,74 €
	Nennleistung Roboter bei 3,04 kg: 0,46 kW			
	Betriebsstunden (12,8h, 365d,10y): 46.720 h			
Kosten Nutzung $C(X_{\text{newV1}})_{\text{use}}$			5.368,74 €	
EoL	Demontagekosten (5 % RMA)	5%	102,58 €	5,13 €
	mech. Recycling der Knoten	1,46 kg	0,11 €/kg	0,15 €
	waschen und compondieren	1,46 kg	0,24 €/kg	0,35 €
	thermische Verwertung Rohre	1,17 kg	0,31 €/kg	0,36 €
	Kosten EoL (ohne Gutschriften) $C(X_{\text{newV1}})_{\text{EoL}}$			5,99 €
	Gutschrift rPA6 CF + CF Tape	1,46 kg	-24,03 €/kg	-34,98 €
	65 % vom Filamentpreis	65% von 36,97€/kg		
	Gutschriften aus thermischer Verwertung	1,17 kg	-0,19 €/kg	-0,23 €
	Gutschrift Schlauchschellen 50 %	0,42 kg	-12,81 €/kg	-5,33 €
	Gutschriften EoL $C(X_{\text{newV1}})_c$			-40,54 €
Kosten EoL (mit Gutschriften) $C(X_{\text{newV1}})_{\text{EoL}+c}$			-34,55 €	
Kosten des Tragstruktur in Leichtbauweise V1 $C(X_{\text{newV1}})_{\text{total}}$			5.453,15 €	

Tabelle 8.9: LCI und Hintergrunddaten zur LCA und LCC der Tragstruktur in Leichtbauweise V2.

Fluss	LCI-Datensatz	Menge	Einheit	weiterführende Informationen
Transport	-	-	-	Nicht berücksichtigt.
RMA PA6 CF15 Filament	Polyamide (6) with 15% Carbon fiber <LZ>	1,2 36,97	kg €/kg	Berechnung aus CAD-Modell. Preis basierend auf [207].
RMA CF Tape	Carbon fiber with PA6 <LZ>	0,252 36,30	kg €/kg	Eigene Messung am ICT. Angebotspreis ICT.
RMA CF Rohre		1,15 30,51	kg €/kg	Berechnung aus CAD-Modell. Preis basierend auf eigener Abschätzung.
Carbonfaser	DE: Carbon fiber (CF; PAN-based; HT) - 08 Fraunhofer	0,683	Kg	Basierend auf Datensatz zur Pultrusion:
Matrix	DE: Polyamide 6 granulate (PA 6) Sphera	0,464	kg	Pultrusion m epox <e-ep>
RMA Schlauchschellen	DE: Stainless steel sheet (EN15804 A1-A3)	0,42 25,63	kg €/kg	Berechnung aus CAD-Modell und Herstellerdaten. Preis basierend auf [209].

Produktion der Knoten	DE: Electricity grid mix Sphera	24,5 0,25	kWh €/kWh	Berechnet. Preis basierend auf [195].
3D-Druck „Bambu X1“		13,01	kWh/kg	Eigene Messung am ICT auf mit- hilfe des „Fluke Energy Logger 1730“.
3DSW		35	kWh/kg	s. o.
Produktion CF Rohre	DE: Electricity grid mix Sphera	0,07	kWh	Basierend auf Datensatz zur Pultrusion. Nur LCA-relevant, da LCC-Daten die Herstellung beinhaltet.
Druckluft	GLO: Com- pressed air 10 bar (medium power consump- tion) Sphera <e- ep>	0,27	m ³	
Produktion Montage (manuell)	Annahme	10 9,93	% €	10% der RMA- Kosten veran- schlagt.
Nutzungs- phase	DE: Electricity grid mix Sphera	21.451 0,25	kWh €/kWh	Basierend auf 0,46 kW und 46720h. Preis basierend auf [195].
EoL Demontage (manuell)	Annahme	5 4,97	% €	½ der Montage- kosten wird ver- anschlagt.
EoL Knoten und Rohre schreddern, waschen, compoundie- ren	US: Plastic recy- cling (clean scrap) Sphera	2,6 0,11 0,24	kg €/kg €/kg	Masse Knoten und Wicklung. Preis basierend auf [210]. Preis basierend auf [210];[200].

<i>EoL-Gut-</i> <i>schriften</i> Knoten Sekundär- Rohstoffe	GLO: Correc- tion for downcy- cling / Credits Sphera <c-ep> Polyamide (6) with 15% Car- bon fiber <LZ>	1,46 -24,03 -1,69	kg €/kg kg	65% Substituti- onsquote der RMA-Kosten und Umweltwir- kungen.
<i>EoL-Gut-</i> <i>schriften</i> Reuse der Schlauch- schellen	Annahme GLO: Correc- tion for downcy- cling / Credits	50 -5,33	% €	Reuse: 50% der RMA-Kosten und RMA-Um- weltwirkungen werden gutge- schrieben.

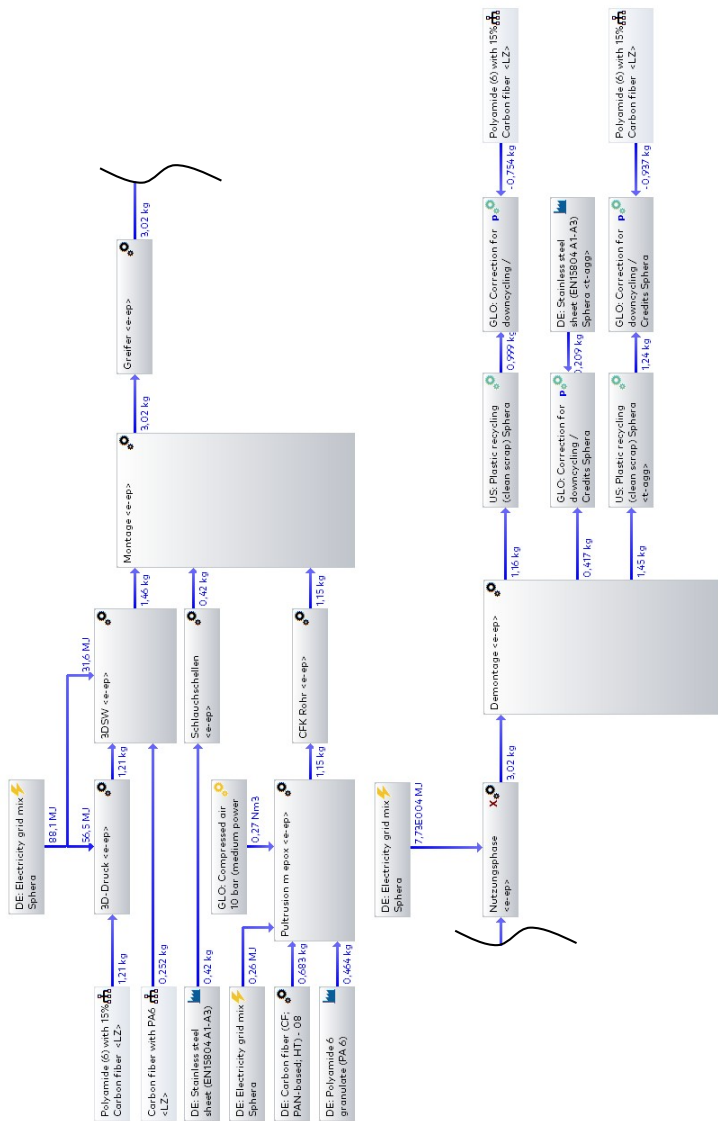


Abbildung 8.6: LCA-Modellierung der Tragstruktur in Leichtbauweise V2 mithilfe der Software Sphera LCA for Experts.

Tabelle 8.10: LCC-Modellierung der Tragstruktur in Leichtbauweise V2.

Lebenszyklusphase	Wertstrom	Menge	spezifische Kosten	Kosten
Transport	Wird nicht berücksichtigt.			0,00 €
RMA	PA6 CF15 Filament	1,20 kg	36,97 €/kg	44,52 €
	CF Tape	0,25 kg	36,30 €/kg	9,14 €
	CF-Rohr (PA)	1,15 kg	30,51 €/kg	35,03 €
	Schlauchschellen	0,42 kg	25,63 €/kg	10,66 €
	Gesamtmasse	3,02 kg		
Kosten RMA $C(X_{\text{newV2}})_{\text{RMA}}$			99,35 €	
Produktion	Strom für 3D-Druck + 3DSW	24,5 kWh	0,25 €/kWh	6,12 €
	Montagekosten (10 % RMA)	10%	99,35 €	9,93 €
Kosten Produktion $C(X_{\text{newV2}})_P$			16,05 €	
Nutzung	elektrische Energie	21.451 kWh	0,25 €/kWh	5.362,65 €
	Nennleistung Roboter bei 3,02 kg: 0,46 kW			
	Betriebsstunden (12,8h, 365d,10y): 46.720 h			
Kosten Nutzung $C(X_{\text{newV2}})_{\text{use}}$			5.362,65 €	
EoL	Demontagekosten (5 % RMA)	5%	99,35 €	4,97 €
	mech. Recycling der Knoten und Rohre	2,60 kg	0,11 €/kg	0,28 €
	waschen und compondieren	2,60 kg	0,24 €/kg	0,62 €
	Kosten EoL (ohne Gutschriften) $C(X_{\text{newV2}})_{\text{EoL}}$			5,87 €
	Gutschrift rPA6 CF + CF Tape + CF-Rohre	2,60 kg	-24,03 €/kg	-62,58 €
	65 % vom Filamentpreis	65 % von 36,97 €/kg		
	Gutschrift Schlauchschellen 50 %	0,42 kg	-12,81 €/kg	-5,33 €
	Gutschriften EoL $C(X_{\text{newV2}})_c$			-67,91 €
	Kosten EoL (mit Gutschriften) $C(X_{\text{newV2}})_{\text{EoL}+c}$			-62,04 €
Kosten des Tragstruktur in Leichtbauweise V2 $C(X_{\text{newV2}})_{\text{total}}$			5.416,014 €	

Tabelle 8.11: Absolute Werte der Sensitivitätsanalysen

Fahrradhelm		Basiswert		konservativ (+15%)		optimistisch (-15%)	
		DE: Electricity grid mix Sphera		Electricity from heavy fuel oil (HFO)		Electricity grid mix (2040) (EU Energy trends report)	
		0,25€/kWh		0,29€/kWh		0,21€/kWh	
		X_0	X_{new}	X_0	X_{new}	X_0	X_{new}
Strommix	LCA	2,74	1,26	3,6	2,3	2,26	0,67
	öko. LCG	90%	63%	89%	76%	92%	45%
	LCC	1,22 €	0,85 €	1,29 €	0,93 €	1,15 €	0,76 €
	Ökn. LCG	85%	53%	85%	55%	85%	50%
Recycling- aufwände	LCA	2,74	1,26	2,85	1,27	2,63	1,24
	öko. LCG	90%	63%	90%	63%	90%	63%
	LCC	1,22 €	0,85 €	1,22 €	0,86 €	1,21 €	0,83 €
	Ökn. LCG	85%	53%	85%	53%	85%	53%
Transport	LCA	2,74	1,26	2,76	1,27	2,72	1,25
	öko. LCG	90%	63%	90%	63%	90%	62,60%
	LCC	1,22 €	0,85 €	1,23 €	0,86 €	1,20 €	0,84 €
	Ökn. LCG	85%	53%	85%	53%	85%	53%

Roboter-Tragstruktur		Basiswert		konservativ (+15%)		optimistisch (-15%)	
		DE: Electricity grid mix Sphera		Electricity from heavy fuel oil (HFO)		Electricity grid mix (2040) (EU Energy trends report)	
		0,25€/kWh		0,29€/kWh		0,21€/kWh	
		X_{newV1}	X_{newV2}	X_{newV1}	X_{newV2}	X_{newV1}	X_{newV2}
Strommix	LCA	9100,73	9033,88	19077,41	18944,84	3474,06	3442,77
	öko. LCG	79%	66%	83%	72%	77%	61%
	LCC	5.453,15 €	5.416,01 €	6.259,38 €	6.221,33 €	4.645,92 €	4.610,70 €
	Ökn. LCG	66%	41%	66%	42%	66%	41%
Recycling- aufwände	LCA	9100,73	9033,88	9100,99	9034,01	9199,49	9033,74
	öko. LCG	79%	66%	79%	66%	79%	66%
	LCC	5.453,15 €	5.416,01 €	5.454,05 €	5.416,89 €	5.452,25 €	5.415,13 €
	Ökn. LCG	66%	41%	66%	41%	66%	41%

9 Literaturverzeichnis

- [1] UNEP: Bend the trend. Pathways to a liveable planet as resource use spikes. Global resources outlook, Bd. 2024. Nairobi, Kenya: International Resource Panel 2024
- [2] Fabian Lindner: Ökologische Nachhaltigkeit und materieller Wohlstand - Ein Zielkonflikt? Nachhaltige Soziale Marktwirtschaft. Gütersloh 2023
- [3] Europäische Kommission: Ursachen des Klimawandels, Brüssel 2024. https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_de, abgerufen am: 17.07.2024
- [4] The Global Risks Report 2020, World Economic Forum, Geneva 2020
- [5] Europäische Kommission: VN-Konferenz über Klimaänderungen 2016 in Marrakesch (Marokko) (COP22). Entschließung des Europäischen Parlaments vom 6. Oktober 2016 zur Umsetzung des Pariser Übereinkommens und zur Konferenz der Vereinten Nationen über Klimaänderungen 2016 in Marrakesch (Marokko) (COP 22) (2016/2814(RSP)) C 215/46, 2016
- [6] Russo, D., Regazzoni, D. u. Montecchi, T.: Eco-design with TRIZ laws of evolution. *Procedia Engineering* 9 (2011), S. 311–322
- [7] Alfred Götze: Etymologisches Wörterbuch der deutschen Sprache. Berlin: De Gruyter 1951
- [8] Carlowitz: *Sylvicultura Oeconomica*. Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung Zur Wilden Baum-Zucht. Leipzig 1713
- [9] Die Erfindung der Nachhaltigkeit. Leben, Werk und Wirkung des Hans Carl von Carlowitz. München: oekom-Verl. 2013
- [10] Spindler, E.: Geschichte der Nachhaltigkeit Vom Werden und Wirken eines beliebten Begriffes
- [11] Meadows, D. L., Meadows, D. H., Zahn, E. u. Milling, P.: Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. DVA informativ, Bd. 1. Stuttgart: Dt. Verl.-Anst 1972
- [12] Talbot, L. M.: A World Conservation Strategy. no. 5288 vol. 128 (1980), S. 493–510

- [13] McCormick, J.: The Origins of the World Conservation Strategy. *Environmental Review* 10 (1986) 3, S. 177–187
- [14] WCED - World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development. New York 1987
- [15] Tremmel, J.: Generationengerechtigkeit – eine Ethik der Zukunft. 2024
- [16] Vereinte Nationen: Agenda 21. Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung. Rio de Janeiro 1992
- [17] Neuhoﬀ, K., von Lüpke, H. u. Piantieri, C.: Das Kyoto-Protokoll feiert 20. Geburtstag. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung 2017
- [18] IWR: Globales Klima: Warum das Kyoto-Modell mit CO₂-Obergrenzen nicht funktioniert und warum der CERINA-Plan eine Alternative ist, Münster 2021. <https://www.iwr-institut.de/de/presse/presseinfos-klima/klima-kyoto-funktioniert-nicht-daher-investieren-statt-co2-be-grenzen>
- [19] Simonis, U. E. u. Sommer, J.: Das „Doha Climate Gateway“. Eng oder weit oﬀen? Berlin 2013
- [20] Vereinte Nationen: Pariser Abkommen zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen. Paris 2015
- [21] Pohle, P., Brönner, M., Gerique, A., Kieslinger, J. u. Lederer, L.: Rechtliche und politische Rahmenbedingungen als Grundlage für sozial-ökologische Transformationen. Die Themenfelder Nachhaltigkeit, ländliche Räume, Klima- und Gewässerschutz, Biodiversität, Wald, Landwirtschaft und Energie. *Mitteilungen der Fränkischen Geographischen Gesellschaft* 67 (2021), S. 117–175
- [22] Vereinte Nationen: Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. Ergebnisdokument des Gipfeltreffens der Vereinten Nationen. New York 2015
- [23] Urata, S., Kuroda, K. u. Tonegawa, Y.: Sustainable Development Disciplines for Humanity. Singapore: Springer Nature Singapore 2023
- [24] Die Bundesregierung: Bericht über die Umsetzung der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. Freiwilliger Staatenbericht Deutschlands zum HLPF 2021. Berlin 2021

- [25] Vereinte Nationen Environment Programme: The 17 Goals, 2015.
<https://sdgs.un.org/goals>, abgerufen am: 02.12.2024
- [26] Pauli, M. (Hrsg.): Zirkuläre Bauwirtschaft. essentials. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2023
- [27] Lin, D.: Estimating the Date of Earth Overshoot Day 2024. Nowcasting the World's Footprint & Biocapacity for 2024. 2024
- [28] Global Footprint Network: Earth Overshoot Day 2024 falls on August 1st. Ending Overshoot: Humanity's Critical Race. Geneva 2024
- [29] Frosch, R. A. u. Gallopoulos, N. E.: Strategies for Manufacturing. *Scientific American* 261 (1989) 3, S. 144–152
- [30] Lyle, J. T.: Regenerative design for sustainable development. Wiley series in sustainable design. New York, NY: Wiley 1994
- [31] Stahel, W. u. Reday-Mulvey, G.: Jobs for tomorrow: the potential for substituting manpower for energy. Vantage Press 1981
- [32] Georgescu-Roegen, N.: The Entropy Law and the Economic Process. s.l.: Harvard University Press 1971
- [33] Europäische Kommission: Circular economy action plan. The EU's new circular action plan paves the way for a cleaner and more competitive Europe., Brüssel 2020. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en, abgerufen am: 19.02.2026
- [34] Dieterle, M.: Die Life Cycle Gap Analyse - Herleitung, Definition und exemplarische Anwendung, Karlsruher Institut für Technologie u. Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie Dissertation. Pfnitztal 2023
- [35] Ellen MacArthur Foundation: The butterfly diagram: visualising the circular economy, 2019. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>, abgerufen am: 15.12.2025
- [36] McDonough, W. u. Braungart, M.: Cradle to cradle. Remaking the way we make things. New York, NY: North Point Press 2002
- [37] Kirchherr, J., Reike, D. u. Hekkert, M.: Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling* 127 (2017), S. 221–232
- [38] R-Strategien als Leitlinien der Circular Economy, RETHINK. Impulse zur zirkulären Wertschöpfung / Enabling the Circular Economy, Mast, J., von Unruh, F. u. Irrek, W., 2022

- [39] Reike, D., Vermeulen, W. J. u. Witjes, S.: The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. *Resources, Conservation and Recycling* 135 (2018), S. 246–264
- [40] Liu, L., Liang, Y., Song, Q. u. Li, J.: A review of waste prevention through 3R under the concept of circular economy in China. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 19 (2017) 4, S. 1314–1323
- [41] Europäische Union: Abfallhierarchie. Directive 2008/98/EG. 2008
- [42] Buchberger, S., Hofbauer, G., Mangold, L. u. Truong, K.: Das Prinzip der Circular Economy als Maxime für Beschaffung und Vertrieb in der Industrie. *Arbeitsberichte – Working Papers*, Bd. 46. 2019
- [43] Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E. u. Hanemaaijer, A.: CIRCULAR ECONOMY: MEASURING INNOVATION IN THE PRODUCT CHAIN. Utrecht: PBL Publishers 2017
- [44] Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K. u. Olsen, S. I.: Life Cycle Assessment. Cham: Springer International Publishing 2018
- [45] EN ISO 14067:2018:2019. *Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung*
- [46] Umweltmanagement 14040:2009. *DIN EN ISO 14040. Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundlagen und Prinzipien*
- [47] 14044:2006. *DIN EN ISO 14044. Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*,
- [48] Bender, B. u. Gericke, K.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2021
- [49] Rossi, M., Germani, M. u. Zamagni, A.: Review of ecodesign methods and tools. Barriers and strategies for an effective implementation in industrial companies. *Journal of Cleaner Production* 129 (2016), S. 361–373
- [50] Unterschätztes Treibhausgas Methan. Quellen, Wirkungen, Minderungsoptionen, Appelhans, J., Böttcher, C., Keßler, K., Mielke, C., Nowack, A., Purr, K., Schwetje, A., Sorg, D. u. Tambke, J., 2022
- [51] Hino, S.: Inside the Mind of Toyota. Management Principles for Enduring Growth. Oxford: Productivity Press 2005

- [52] DIN EN 60300-3-3:2014. *Lebenszykluskosten und Lebenszyklus. Zuverlässigkeitsmanagement*
- [53] Dieterle, M., Schäfer, P. u. Viere, T.: Life Cycle Gaps: Interpreting LCA Results with a Circular Economy Mindset. *Procedia CIRP* 69 (2018), S. 764–768
- [54] Dieterle, M. u. Viere, T.: Bridging product life cycle gaps in LCA & LCC towards a circular economy. *Procedia CIRP* 98 (2021), S. 354–357
- [55] Dieterle, M. u. Ginter, J.: Life cycle (gap) analysis for advanced material recycling of PLA cups. *Procedia CIRP* 105 (2022), S. 13–18
- [56] Aqeel, A. B., Aziz, M. I., Zaman, U. K. u. Aafaq, N.: Reverse Engineering (2023), S. 268–278
- [57] Messler, R. W.: Reverse engineering. Mechanisms, structures, systems, and materials. New York: McGraw-Hill Education 2014
- [58] Levins, C.: The History of the Jerrican, 2016. <https://airseacontainers.com/blog/the-history-of-the-jerrican/?srsltid=AfmBOorxQ7CB6MxSQZWg2-Egitcb2TZFCeyZqqf9TbsMDWaxREXkG-BY>, abgerufen am: 17.06.2025
- [59] Gaskill, M.: Reverse-Engineering the B-29 Into the Soviet Tupolev TU-4, 2018. <https://www.warhistoryonline.com/world-war-ii/reverse-engineering-b29-soviet-tu4.html>, abgerufen am: 17.06.2025
- [60] Kadavy, D.: Design for hackers. Reverse-engineering beauty. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd 2011
- [61] Erickson, J.: Hacking. The art of exploitation. San Francisco, Calif., Boston, Mass.: No Starch Press; Safari Books Online 2008
- [62] Eilam, E.: Reversing. Secrets of reverse engineering. Indianapolis, Ind.: Wiley 2005
- [63] Huang, A.: The hardware hacker. Adventures in making and breaking hardware. San Francisco, CA: No Starch Press 2019
- [64] Hainaut, J.-L., Chandelon, M., Tonneau, C. u. Joris, M.: Contribution to a theory of database reverse engineering. *Proceedings Working Conference on Reverse Engineering. IEEE Comput. Soc. Press* 1993, S. 161–170

- [65] Rekoff, M.: On Reverse Engineering. IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS 1985 (1985) Vol.15 No.2, 244-252
- [66] Chikofsky, E. J. u. Cross, J. H.: Reverse engineering and design recovery: a taxonomy. IEEE Software 7 (1990) 1, S. 13–17
- [67] Kumar, A., Jain, P. u. Pathak, P. M.: DAAAM Scientific Book. Reverse Engineering in Product Manufacturing: An Overview. Chapter 39. 2013
- [68] Wang, W.: Reverse engineering. Technology of reinvention. Boca Raton, Fla.: CRC-Press 2011
- [69] Gameros, A., Chiffre, L. de, Siller, H. R., Hiller, J. u. Genta, G.: A reverse engineering methodology for nickel alloy turbine blades with internal features. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 9 (2015), S. 116–124
- [70] Kyaw, A. C., Nagengast, N., Usma-Mansfield, C. u. Fuss, F. K.: A Combined Reverse Engineering and Multi-Criteria Decision-Making Approach for Remanufacturing a Classic Car Part. Procedia CIRP 119 (2023), S. 222–228
- [71] Yanamandra, K., Chen, G. L., Xu, X., Mac, G. u. Gupta, N.: Reverse engineering of additive manufactured composite part by toolpath reconstruction using imaging and machine learning. Composites Science and Technology 198 (2020), S. 108318
- [72] Qie, Y., Bickel, S., Wartzack, S., Schleich, B. u. Anwer, N.: A function-oriented surface reconstruction framework for reverse engineering. CIRP Annals 70 (2021) 1, S. 135–138
- [73] Engel, B. u. Al-Maceni, S. S. H.: An Integrated Reverse Engineering and Failure Analysis Approach for Recovery of Mechanical Shafts. Procedia CIRP 81 (2019), S. 1083–1088
- [74] Zivkovic, S., Cerce, L., Kostic, J., Majstorovic, V. u. Kramar, D.: Reverse Engineering of Turbine Blades Kaplan's type for Small Hydroelectric Power Station. Procedia CIRP 75 (2018), S. 379–384
- [75] Li, L., Li, C., Tang, Y. u. Du, Y.: An integrated approach of reverse engineering aided remanufacturing process for worn components. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 48 (2017), S. 39–50
- [76] Saiga, K., Ullah, A. S., Kubo, A. u. Tashi: A Sustainable Reverse Engineering Process. Procedia CIRP 98 (2021), S. 517–522

- [77] Blumenthal, D., Schvartz, M., Guénard Lampron, V. u. Masson, M.: Sensory reverse engineering: A framework for sustainable product development used on vegan chocolate mousse. *Food Quality and Preference* 133 (2025)
- [78] Elashwah, M., Afia, N., Abbas, W. u. Ismail, T.: Designing sustainable reverse supply chain network with optimal collection points locations. *Ain Shams Engineering Journal* 16 (2025) 9, S. 2–12
- [79] van Doorsselaer, K. u. Koopmans, R.: *Ecodesign. A life cycle approach for a sustainable future*. Hanser eLibrary. Munich, Cincinnati: Hanser 2021
- [80] Abele, E., Anderl, R., Birkhofer, H. u. Rüttinger, B. (Hrsg.): *EcoDesign. Von der Theorie in die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2007
- [81] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. KrWG (2012). In: BGBl. I
- [82] Directive 2008/98/EC. 2008/98/EG. In: *Journal of the European Union*
- [83] Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen. VerpackG. In: BGBl. I, S. 2234
- [84] Europäische Union: Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste. 1994
- [85] Packaging and Packaging Waste Regulation EU 2025/40. PPWR. In: *Journal of the European Union*
- [86] Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten. ElektroG. In: BGBl. I, S. 1739
- [87] (EU) 2023/1542 - über Batterien und Altbatterien. In: *Journal of the European Union*
- [88] Fraunhofer-Gesellschaft für Angewandte Forschung: *Kreislaufwirtschaft: Digitaler EU-Produktpass für Batterien*. Forschung Kompakt. Hannover 2024
- [89] Deutsche Bundestag: *Altfahrzeug-Verordnung*. AltfahrzeugV. 2002
- [90] Europäische Kommission: *ELV Directive*. 2000/53/EC. 2000

- [91] Rat der Europäischen Kommission: Vorschlag für eine Verordnung zur kreislaufforientierten Konstruktion von Fahrzeugen und über die Entsorgung von Altfahrzeugen. COM(2023) 451
- [92] Gesetz über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten zur Vermeidung von Menschenrechtsverletzungen in Lieferketten. LkSG. In: BGBl. I S, S. 2959
- [93] Verordnung (EU) 2024/1781 des Europäischen Parlaments zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2020/1828 und der Verordnung (EU) 2023/1542 und zur Aufhebung der Richtlinie 2009/125/EG. In: Amtsblatt der Europäischen Union
- [94] Hochschule Bielefeld: Produktkategorien und zugehörige Kreisläufe. HSBI / Transfer / Transferaktivitäten / InCamS@BI / Wissensbasis Circular Economy / Produktkategorien und zugehörige Kreisläufe
- [95] Europäische Kommission: The Legislative Framework Ecodesign and Energy Label. o. J.
- [96] Europäische Kommission: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2022) 140 final. Brüssel 2022
- [97] Deutscher Bundestag: Bundes-Immissionsschutzgesetz. BImSchG. 1974
- [98] Deutsche Bundestag: Bundes-Klimaschutzgesetz. KSG. 2019
- [99] Framework for achieving climate neutrality. European Climate Law. In: Journal of the European Union
- [100] Nachmany, M., Fankhauser, S., Setzer, J. u. Averchenkova, A.: Global trends in climate change legislation and litigation. 2017
- [101] Schumer, C., Boehm, S., Jaeger, J., Levin, K., Santo, R., Lebling, K., Riedl, D., Lee, A., Singh, N., Sims, M., Chin, N., Majid, A., Cassius, S., Lamb, W., Gangotra, A., Grant, N., Zhang-Billert, Y. u. Petroni, M.: State of Climate Action 2025. World Resources Institute (2025)
- [102] Ministry of Economics, Energy, Transport and Regional Development, State of Hessen: Ecodesign for a resource-efficient economy

- [103] *DIN-Fachbericht ISO/TR 14062:2003, Umweltmanagement - Integration von Umweltaspekten in Produktdesign und -entwicklung; Deutsche und englische Fassung ISO/TR_14062:2002*
- [104] Schäfer, M. u. Löwer, M.: Ecodesign—A Review of Reviews. *Sustainability* 13 (2021) 1, S. 315
- [105] Yu, S., Yang, Q., Tao, J. u. Xu, X.: Incorporating Quality Function Deployment with modularity for the end-of-life of a product family. *Journal of Cleaner Production* 87 (2015), S. 423–430
- [106] Vallet, F., Eynard, B., Millet, D., Mahut, S. G., Tyl, B. u. Bertoluci, G.: Using eco-design tools: An overview of experts' practices. *Design Studies* 34 (2013) 3, S. 345–377
- [107] Casamayor, J. L. u. su, D. (Hrsg.): A review of environmental impact assessment tools (EIAT) to assist sustainable product design. 2010
- [108] Fussler, C. u. James, P.: Driving eco-innovation. A breakthrough discipline for innovation and sustainability. London: Pitman publ 1996
- [109] Brezet, H. u. Hemel, C. (Hrsg.): Ecodesign. A promising approach to sustainable production and consumption. United Nations publication. Paris: UNEP 1997
- [110] Wimmer, W. (Hrsg.): Proceedings First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. IEEE 1999
- [111] Frehse, B.: Philips Fast-Five, 2025. https://www.ide.ovgu.de/Toolkit/Alle+Tools/Philips+Fast_Five-p-430.html, abgerufen am: 01.12.2025
- [112] Chemical substances which shall be declared and substances that must not be present in Volvo Group products placed on the market. Black List, Volvo, 2025
- [113] Chemical substances which shall be declared and substances that must not be present in Volvo Group products placed on the market. Grey List, Volvo, 2025
- [114] Chemical substances which shall be declared and substances that must not be present in Volvo Group products placed on the market. Red List, Volvo, 2025

- [115] Luttrupp, C. u. Lagerstedt, J.: EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *Journal of Cleaner Production* 14 (2006) 15-16, S. 1396–1408
- [116] Huang, G. Q.: Design for X. Dordrecht: Springer Netherlands 1996
- [117] Andreassen, M. M. u. Mortensen, N. H. (Hrsg.): Basic thinking patterns and working methods for multiple DFX, Bd. 8. 1997
- [118] Bauer, S. (Hrsg.): DESIGN FOR X – ANSÄTZE ZUR DEFINITION UND STRUKTURIERUNG. 2003
- [119] Hubka, V.: Theorie technischer Systeme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. Hochschultext. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag GmbH 1984
- [120] Ponn, J. u. Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011
- [121] Rieg, F. u. Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. München, Wien: Hanser 2012
- [122] IKEA: IKEA Circular Product Design Guide. Guide to designing products with circular capabilities. 2024, S. 1–18.
https://www.ikea.com/global/en/images/IKEA_Circular_product_design_guide_2024_0925_f56183ff98.pdf, abgerufen am: 20.11.2025
- [123] 2022-12. *DIN 8580. Manufacturing processes - Terms and definitions, division*
- [124] Meerkamm, H. (Hrsg.): DfX - Vielfalt der Anforderungen versus Zielorientierung. Coburg: Fachhochschule Coburg 1999
- [125] Mesa, J. A.: Design for circularity and durability: an integrated approach from DFX guidelines. *Research in Engineering Design* 34 (2023) 4, S. 443–460
- [126] Wang, Y. u. Zhang, L.: Challenges in integrating advanced technologies and tools in the aerospace industry: implications for Design for X methodology. *Aerospace Manufacturing and Design* 25(1) (2019), S. 56–68
- [127] Sassanelli, C., Urbinati, A., Rosa, P., Chiaroni, D. u. Terzi, S.: Addressing circular economy through design for X approaches: A systematic literature review. *Computers in Industry* 120 (2020), S. 103245
- [128] Projekt LCA to go, Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM, 2016

- [129] Impact Assessment Methodology [Software]. Sustainable Mindes 2013
- [130] OneClickLCA. <https://oneclicklca.com/> 2025
- [131] EarthSmart. Advancing your Sustainability. EarthShift Global
- [132] Janik, A. u. RYSZKO, A. (Hrsg.): Towards measuring circularity at product level–Methodology and application of material circularity indicator. Silesian University of Technology 2017
- [133] Figueirinhas, D., Vakulenko, Y., Pålsson, H. u. Hellström, D.: Advancing circularity metrics: Revisiting the Ellen MacArthur Foundation’s Material Circularity Indicator. Resources, Conservation and Recycling 226 (2026), S. 108682
- [134] Rubel, H., Meyer zum Felde, A., Oltmanns, J., Lanfer, C. u. Bayer, L.: CIRCelligence by BCG. It’s Time to Close Our Future Resource Loops. 2020
- [135] Marossky, N., Dose, J., Fleischer, G. u. Ackermann, R. (Hrsg.): Challenges of Data Transfer between CAD- and LCA Software Tools. Berlin 2007
- [136] Ostad-Ahmand-Ghorabi, Hesamedin, Collado-Ruiz, D. u. Wimmer, W. (Hrsg.): Towards integrating LCA into CAD. 2009
- [137] Leibrecht, S.: Fundamental Principles for CAD-based Ecological Assessments (9 pp). The International Journal of Life Cycle Assessment 10 (2005) 6, S. 436–444
- [138] SolidWorks: SOLIDWORKS Sustainability – Übersicht, 2024. https://help.solidworks.com/2024/german/SolidWorks/sldworks/c_Sustainability_Overview.htm?id=30.0, abgerufen am: 02.12.2025
- [139] Chen, Z., Tao, J. u. Yu, S.: A Feature-based CAD-LCA Software Integration Approach for Eco-design. Procedia CIRP 61 (2017), S. 721–726
- [140] Hottgenroth Software: ECO-CAD Vollversion, 2025. <https://www.hottgenroth.de/M/SOFTWARE/Architektur-Gebaeuderessourcen/ECO-CAD/Seite.html,225071,157922>, abgerufen am: 03.12.2025
- [141] CircularLCA: CircularLCA – Ökobilanzierung und Gebäuderessourcenpass. Ökobilanzierung (LCA) und Zirkularität einfach gemacht, 2025. <https://circularlca.de/>, abgerufen am: 03.12.2025

- [142] Steubel, P.: TRIZ: Alles Wichtige über die Methode zur Problemlösung!, 2025. <https://asana.com/de/resources/what-is-triz>, abgerufen am: 03.12.2025
- [143] Moehrle, M. G.: What is TRIZ? From Conceptual Basics to a Framework for Research. *Creativity and Innovation Management* 14 (2005) 1, S. 3–13
- [144] Kobayashi, H.: A systematic approach to eco-innovative product design based on life cycle planning. *Advanced Engineering Informatics* 20 (2006) 2, S. 113–125
- [145] Bono, E. de: *Serious creativity. Using the power of lateral thinking to create new ideas.* New York, N.Y: HarperBusiness 1993
- [146] Buonamici, F., Carfagni, M., Furferi, R., Governi, L., Lapini, A. u. Volpe, Y.: Reverse engineering modeling methods and tools: a survey. *Computer-Aided Design and Applications* 15 (2018) 3, S. 443–464
- [147] DS 133: Proceedings of the 35th Symposium Design for X (DFX2024). The Design Society 2024
- [148] Geng, Z. u. Bidanda, B.: Review of reverse engineering systems – current state of the art. *Virtual and Physical Prototyping* 12 (2017) 2, S. 161–172
- [149] Dempere, L. A.: Understanding Sustainability Through Reverse Engineering. *IEEE Technology and Society Magazine* 29 (2010) 3, S. 37–44
- [150] Hasz, K. u. Lavorata, J. (Hrsg.): *Reverse Engineering as a Tool for Enhancing Sustainability Understanding in a First-Year Design Course.* Montreal, Quebec: ASEE Conferences 2025
- [151] Morris, J. u. Steiner, M.: Quantifying sustainability through reverse engineering a multi-disciplinary senior capstone experience. *The International journal of engineering education* 26 (2010), S. 384–390
- [152] Schultz, A.: *Methode zur integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen und-technologien.* Magdeburg 2002
- [153] Miah, J. H., Koh, S. u. Stone, D.: A hybridised framework combining integrated methods for environmental Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing. *Journal of Cleaner Production* 168 (2017), S. 846–866

- [154] Özkan, A., Günkaya, Z., Tok, G., Karacasulu, L., Metesoy, M., Banar, M. u. Kara, A.: Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis of Magnesia Spinel Brick Production. *Sustainability* 8 (2016) 7, S. 662
- [155] Burchart-Korol, D., Krawczyk, P., Czaplicka-Kolarz, K. u. Smoliński, A.: Eco-efficiency of underground coal gasification (UCG) for electricity production. *Fuel* 173 (2016), S. 239–246
- [156] Kicherer, A., Schaltegger, S., Tschochohei, H. u. Pozo, B. F.: Eco-efficiency. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (2007) 7, S. 537–543
- [157] Santoyo-Castelazo, E. u. Azapagic, A.: Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production* 80 (2014), S. 119–138
- [158] Cerri, D. u. Terzi, S.: Proposal of a toolset for the improvement of industrial systems' lifecycle sustainability through the utilization of ICT technologies. *Computers in Industry* 81 (2016), S. 47–54
- [159] Ercan, T., Zhao, Y., Tatari, O. u. Pazour, J. A.: Optimization of transit bus fleet's life cycle assessment impacts with alternative fuel options. *Energy* 93 (2015), S. 323–334
- [160] Schwartz, Y., Raslan, R. u. Mumovic, D.: Implementing multi objective genetic algorithm for life cycle carbon footprint and life cycle cost minimisation: A building refurbishment case study. *Energy* 97 (2016), S. 58–68
- [161] Hunkeler, D. (Hrsg.): *Environmental life cycle costing*. EBL-Schweitzer. Boca Raton, Fla.: CRC Press 2008
- [162] Bartelmus, P.: *Nachhaltigkeitsökonomik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2014
- [163] Liberacki, A., Trincone, B., Duca, G., Aldieri, L., Vinci, C. P. u. Carlucci, F.: The Environmental Life Cycle Costs (ELCC) of Urban Air Mobility (UAM) as an input for sustainable urban mobility. *Journal of Cleaner Production* 389 (2023), S. 136009
- [164] Amienyo, D., Doyle, J., Gerola, D., Santacatterina, G. u. Azapagic, A.: Sustainable manufacturing of consumer appliances: Reducing life cycle environmental impacts and costs of domestic ovens. *Sustainable Production and Consumption* 6 (2016), S. 67–76

- [165] 2000. *DIN EN ISO 14042. Umweltmanagement - Ökobilanz - Wirkungsabschätzung*. <https://nautos.de/4C4/search/item-detail/DE45754695>
- [166] Periodic Report Summary 1 - CILECCTA (A user-oriented, knowledge-based suite of Construction Industry Life Cycle Cost Analysis (CILECCTA) software for pan-European determination and costing of sustainable project options). CILECCTA Grant agreement ID: 229061, European Commission under the 7th Framework Programme Cooperation., CILECCTA, 2014
- [167] Europäische Union: Richtlinie 2009/48/EG über die Sicherheit von Spielzeug. EU Directive 48/EG. 2009
- [168] Risse, A.: *Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2012
- [169] Laurent, A., Olsen, S. I. u. Hauschild, M. Z.: Limitations of carbon footprint as indicator of environmental sustainability. *Environmental science & technology* 46 (2012) 7, S. 4100–4108
- [170] Deutsche Bundestag: Verordnung über das Verbot des Inverkehrbringens von bestimmten Einwegkunststoffprodukten und von Produkten aus oxo-abbaubarem Kunststoff. Einwegkunststoffverbotsverordnung. 2021
- [171] 2000. *DIN EN 13432. Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau*. <https://nautos.de/4C4/search>
- [172] Fischer, S.: *Entwicklung eines Verfahrens zur Evaluierung der Kompostierbarkeit von Biokunststoffen in der industriellen und Heimkompostierung*, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Bachelorarbeit. Leipzig 2024
- [173] Ginter, J. J.: *Mechanische Aufbereitung von Post Consumer Poly(lactic acid) am Beispiel von Einweggetränkebechern*, Karlsruher Institut für Technologie Masterarbeit. Karlsruhe 2019
- [174] Instruction Manual YOUDROP. 08.08.2022, Abus, 2022
- [175] Bike Helmet User Manual - *Helmet_Manual_A6_2025_BIKE_SCOTT-Sports_Multi*. *Helmet_Manual_A6_2025_BIKE_SCOTT-Sports_Multi.pdf*, SCOTT

- [176] UVEX SPORTS GmbH & Co. KG: Wann muss ich meinen Helm austauschen? https://www.uvex-sports.com/de/how-to/wintersports/wann-muss-ich-meinen-helm-austauschen?utm_source=chatgpt.com, abgerufen am: 29.11.2024
- [177] Landeshauptstadt Stuttgart: Abfall ABC: Entsorgung Fahrradhelm. <https://www.stuttgart.de/de/service/entsorgung/abfall-abc/abfall-abc/fahrradhelm>, abgerufen am: 20.01.2026
- [178] Team Sauberes Karlsruhe: Abfall ABC. Abfallwirtschaft & Stadtreinigung, 2026. <https://tsk.karlsruhe.de/abfall-abc>, abgerufen am: 20.01.2026
- [179] meinKA: Müll entsorgen in Karlsruhe – das darf in die Tonne, 2020. <https://meinka.de/entsorgen-karlsruhe/>
- [180] Stuhlenmiller, F., Weyand, S., Jungblut, J., Schebek, L., Clever, D. u. Rinderknecht, S.: Impact of Cycle Time and Payload of an Industrial Robot on Resource Efficiency. *Robotics* 10 (2021) 1, S. 33
- [181] Liu, A., Liu, H., Yao, B., Xu, W. u. Yang, M.: Energy consumption modeling of industrial robot based on simulated power data and parameter identification. *Advances in Mechanical Engineering* 10 (2018) 5
- [182] Ostfalia Hochschule für Angewandte Wissenschaft: Energieeffizienter Roboterbetrieb. Leitfaden für Planer und Betreiber, Wolfenbüttel
- [183] Universität von Sydney: The looming 840,000 ton waste problem that isn't single-use plastics. *ScienceDaily* 2023
- [184] Hecker, M. D., Longana, M. L., Thomsen, O. u. Hamerton, I.: Recycling of carbon fibre reinforced polymer composites with superheated steam – A review. *Journal of Cleaner Production* 428 (2023), S. 139320
- [185] Post, W., Susa, A., Blaauw, R., Molenveld, K. u. Knoop, R. J. I.: A Review on the Potential and Limitations of Recyclable Thermosets for Structural Applications. *Polymer Reviews* 60 (2020) 2, S. 359–388
- [186] Eyerer, P. u. Schüle, H.: *Polymer Engineering 1*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2020
- [187] Schmidt, C.: *Faserverstärkte Leichtbauwerkstoffe - Betrachtung von Anwendungsbeispielen unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit*, Hochschule Zwickau Bachelor-Thesis. Zwickau 2020
- [188] fluentcargo: <https://www.fluentcargo.com/routes/thailand/germany>, 2026, abgerufen am: 19.01.2026

- [189]freightos.com: Shipping from Bangkok to Hamburg: Air, Sea & Container Freight, 2026. https://www.freightos.com/routes/route/th-bangkok/de-hamburg?utm_source.com, abgerufen am: 19.01.2026
- [190]Abdelshafy, A., Hermann, A., Herres-Pawlis, S. u. Walther, G.: Opportunities and Challenges of Establishing a Regional Bio-based Polylactic Acid Supply Chain. *Global challenges* (Hoboken, NJ) 7 (2023) 7, S. 2200218
- [191]PlasticPortal: Average plastic prices in Central Europe, 2025. <https://www.plasticportal.eu/polymer-prices>, abgerufen am: 24.06.2025
- [192]chemanalyst: Isopentane Price Trend and Forecast. Average for Quarter Ending Sep 2025. <https://www.chemanalyst.com/Pricing-data/isopentane-1524>, abgerufen am: 19.01.2026
- [193]edelstahl-shop24: Rundstahl 1.4301 / 1.4307 EN 10278 h9 / EN 10060. Rundstahl 1.4301 / 1.4307 EN 10278 h9 / EN 10060. <https://www.edelstahl-shop24.de/rundstahl-1.4301/1.4307-en-10278-h9/en-10060?c=8>, abgerufen am: 19.01.2026
- [194]Kaiser, M.: Kostencheck: Was kostet Druckluft pro m³? Wie viel kostet ein Kubikmeter Druckluft?, 2024. <https://info.atlascopco-kompressoren.de/blog/kostencheck-was-kostet-druckluft-pro-kubikmeter>, abgerufen am: 19.01.2026
- [195]Strom-Report: Strompreise für Gewerbe, 2025. <https://strom-report.com/strompreis-gewerbe/#:~:text=Strompreise%20f%C3%BCr%20Gewerbe,bei%20Abschluss%20eines%20neuen%20Vertrages.>, abgerufen am: 24.06.2025
- [196]Bericht über die großstädtische Trinkwasserversorgung in Deutschland, Bundeskartellamt, Bonn 2016
- [197]Thiel, S., Holm, O., Thomé-Kozmiensky, E., Goldmann, D. u. Friedrich, B. (Hrsg.): *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin: TK Thomé-Kozmiensky Verlag 2019
- [198]Verbraucherzentrale: Fernwärme: Kosten sparen und gleichzeitig das Klima schonen, 2025. <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/heizen-und-warmwasser/fernwaerme-kosten-spahren-und-gleichzeitig-das-klima-schonen-34038>, abgerufen am: 22.01.2026
- [199]Searates: Distance & Time Houston nach Hamburg, 2026. <https://www.searates.com/de/distance-time/>, abgerufen am: 23.01.2026

- [200] Larraín, M., van Passel, S., Thomassen, G., van Gorp, B., Nhu, T. T., Huysveld, S., van Geem, K. M., Meester, S. de u. Billen, P.: Techno-economic assessment of mechanical recycling of challenging post-consumer plastic packaging waste. *Resources, Conservation and Recycling* 170 (2021)
- [201] Alu-profile-Zuschnitt.de: Profil 40x40 mm Nut 8 I-Typ. https://www.alu-profile-zuschnitt.de/systemprofile-kaufen/systemprofil-profile/profil-40x40-mm-nut-8-i-typ?sPartner=Shopping+Feed&number=1102693&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=22234479050&utm_content=&utm_term=&gad_source=1&gad_campaign-id=22228031415&gclid=EAIaIQob-hMlv8SR6bi0jQMvUIP9BR2xHi9REAQYASABEgKS7fD_BwE, abgerufen am: 02.02.2026
- [202] Amazon.de: Preis Nutenstein T6 mit Schraube. https://www.amazon.de/Nutensteine-Kohlenstoffstahl-Nutenstein-Gewindedurchmesser-Spannpratzen/dp/B0BXKDL1XV/ref=asc_df_B0BXKDL1XV?mcid=64419ee2646638bb810f479b79001dae&th=1&tag=googshopde-21&link-Code=df0&hvadid=696916571416&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=13216352972495245403&hvpone=&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcm dl=&hvlocint=&hvlocphy=9218269&hvtargid=pla-2198722284613&hvocijid=13216352972495245403-B0BXKDL1XV-&hvexpln=0, abgerufen am: 02.02.2026
- [203] CNC-Zubehör.de: Preis Gelenkverbinder mit / ohne Klemmhebel - 40x40 Nut 8/10, mit Klemmhebel. <https://www.cnc-zubehoer.eu/Gelenkverbinder-mit-ohne-Klemmhebel-40x40-Nut-8-10-mit-Klemmhebel/AP.GV.40.mH>, abgerufen am: 02.02.2026
- [204] CNC-Zubehör.de: Leichter Winkel, 20 - 80 mm - 40x40, Nut 10. <https://www.cnc-zubehoer.eu/Leichter-Winkel-20-80-mm-40x40-Nut-10/AP.W40x40.N10>, abgerufen am: 02.02.2026
- [205] Luthin, A., Backes, J. G. u. Traverso, M.: A framework to identify environmental-economic trade-offs by combining life cycle assessment and life cycle costing – A case study of aluminium production. *Journal of Cleaner Production* 321 (2021), S. 128902

- [206]aluminiumpreis.eu: Aluminium Preis, 2026. <https://www.aluminium-preis.eu/>, abgerufen am: 02.02.2026
- [207]3DJake: PAHT-CF Carbon Fiber Black, 1,75 mm / 1000 g. Carbonfaserverstärktes Hochleistungs-Filament für extreme Anforderungen in Schwarz. https://www.3djake.de/elegoo/paht-cf-carbon-fiber-black?sai=36877&gad_source=1&gad_campaignid=20672343758&gclid=EAIaIQob-ChMI6KXLmsi9kgMVP4ODBx0a5zR3EAQYBSABEGlJH_D_BwE, abgerufen am: 05.02.2026
- [208]PrinceFibre: Tube 25×22 mm carbon-epoxy, 2026. <https://shop.princefibre.com/product/tube-25x22-mm-carbon-epoxy-4/>, abgerufen am: 05.02.2026
- [209]Druckluft-Fachhandel: 9mm Schlauchschelle 20 - 32mm, Stahl verzinkt (W1), 2026. https://www.druckluft-fachhandel.de/9mm-schlauchschelle-20-32mm-stahl-verzinkt-w1-norma?em_src=kw&em_cmp=Google/&gad_source=1&gad_campaignid=23060659168&gclid=EAIaIQobChMIjfbMv8e9kgMViEFBAh1-PgAcEAQYASABEGl0rvD_BwE, abgerufen am: 05.02.2026
- [210]Vogiantzi, C. u. Tserpes, K.: A Comparative Environmental and Economic Analysis of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Recycling Processes Using Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing. *Journal of Composites Science* 9 (2025) 1, S. 39
- [211]Entwicklungsstudie zur Errichtung einer CFK-Recyclinganlage in Bayern. Abschlussbericht. Augsburg 2012
- [212]PressePortal: ZDF-Magazin "Frontal 21": Spektakuläre Umsatzrenditen mit Hausmüll - zu Lasten der Gebührenzahler Staatliche Kontrolle versagt. Mainz 2014