Fraunhofer

Abschlussbericht

Cyclometric

Software und Methoden für die nachhaltige und kreislauforientierte Entwicklung in der frühen Konzeptphase

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BETREUT VOM

PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BETREUT VOM

PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm »Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit« gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Projektpartner

- Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO
- Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP
- Universität Stuttgart – Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT)
- Universität Stuttgart – Institut für Akustik und Bauphysik (IABP)
- Universität Stuttgart – Institut für Flugzeugbau (IFB)
- Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung (DITF)
- Technologie Hochschule Reutlingen (NXT)
- Schweizer Design Consulting GmbH
- Forward Engineering GmbH
- Ingenieurgesellschaft für Intelligente Lösungen und Systeme mbH
- DXC Technology Deutschland GmbH
- Lotus Tech Innovation Centre GmbH

CYCLOMETRIC

Software und Methoden für die nachhaltige und kreislauforientierte Entwicklung in der frühen Konzeptphase

Abschlussbericht

Inhalt

Management Summary 5

Präambel 6

1 Einleitung 8

1.1 Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie 9

1.2 Relevanz der kreislauforientierten Produktentwicklung in der Automobilindustrie 11

Literatur 13

1.3 Zielsetzung des Projektes 16

2 Grundlagen der Kreislaufwirtschaft 17

Literatur 20

3 Circular Systems Engineering und softwarebasierte Entscheidungsunterstützung 22

3.1 Bewertung und Umsetzung von Kreislauffähigkeit im kreislaufwirtschaftlichen Engineering 23

3.1.1 Bewertungssystematik für kreislaufwirtschaftliche End of Life-Strategien 24

3.1.2 Vernetzungsmodell einer kreislauforientierten Bewertungs- und Entscheidungslogik 28

Literatur 30

3.2 Beschreibungssprache für kreislauforientierte Lebenszyklen 32

3.2.1 Modellierung technischer Produktgestalten 33

3.2.2 Modellierung von Lebenszyklen 34

3.2.3 Zustandsklassen im Lebenszyklus 35

3.2.4 Konsistente Modellierung probabilistischer Lebenszyklen 36

3.2.5 Ertüchtigung zur Ökobilanzierung 37

3.2.6 Resultat und Implementierung der Beschreibungssprache 38

Literatur 38

3.3 Ökobilanzielle Bewertung in der kreislauforientierten Automobilentwicklung 40

3.3.1 Zirkularität und Ökobilanz 41

3.3.2 Datenverfügbarkeit und komplexe Entscheidungsprozesse 41

3.3.3 Systemgrenzen und mehrfache Lebenszyklen 41

3.3.4 Allokation im Kontext der Kreislaufwirtschaft 42

3.3.5 End-of-Life Formeln: Zusätzliche Komplexität durch Zirkularität 43

3.3.6 Konzeptentwicklung für die frühe Einbindung einer LCA in die Produktentwicklung 44

3.3.7 Fazit zur ökobilanziellen Bewertung in der kreislauforientierten Automobilentwicklung 49
Literatur 50
3.4 CycloP – Das Softwaretool für kreislaufwirtschaftliche Produktentwicklung 52
3.4.1 Entwicklung, Funktionen und Systemarchitektur von *CycloP* 53
3.4.2 Lebenszyklusmodellierung mit *CycloP* 56
3.4.3 Szenario-Generierung 61
3.4.4 *CycloP* Xtend 64
3.4.5 Life Cycle Assessment (LCA) - Modul 67
3.4.6 Rollenkonzept für das Entscheidungsunterstützungstool *CycloP* 68
Literatur 77
3.5 Zirkuläre Produktion 79
3.5.1 Entwicklung eines zirkuläres Produktionssystems 80
3.5.2 Anforderungen an zirkuläre Produktionssysteme 82
3.5.3 Definition generischer Prozesse für zirkuläre Produktionssysteme 84
3.5.4 Wertstrommodellierung für eine zirkuläre Wertschöpfung 86
3.5.5 Reflexion von Synergie- und Symbiose-Effekten 88
3.5.6 Anwendungen des zirkulären Produktionssystems 88
Literatur 91
3.6 Sprachbasierte Anforderungsdefinition und multikriterielle Bewertung 93
3.6.1 Stand des Wissens 93
3.6.2 Sprachbasierte Anforderungsdefinition 94
3.6.3 Multikriterielle Analyse und Bewertung 97
3.6.4 Sensitivitätsanalyse 98
Literatur 100
3.7 Kreislauforientierte Konstruktions- und Fügeprinzipien 101
3.7.1 Alternative Fügeprinzipien 101
3.7.2 Sammlung allgemeiner Verschluss- und Füge-Prinzipien 104
3.7.3 Übertragung der ausgewählten Prinzipien auf die Demonstrator-Mittelkonsole 107
4 Entwicklung einer kreislauforientierten, smarten Mittelkonsole 113
4.1 Kreislauforientierte Design Methode 114
4.1.1 Methodischer Ansatz 115
4.1.2 Wheel of Circularity 117

Literatur ... 119
4.2 Konzeption und Design einer kreislauforientierten Mittelkonsole ... 120
Literatur ... 129
4.3 Kreislauforientierte Leichtbaukonstruktion ... 130
4.3.1 Prototypische Umsetzung - kreislauforientierte Leichtbaukonstruktion ... 132
4.3.2 Auswahl von Fertigungskonzepten und Werkstoffen ... 132
4.3.3 Fertigungsprozess Mittelkonsole ... 134
4.4 Prototypische Umsetzung - Simulation Data Management einer Mittelkonsole ... 137
Literatur ... 142
4.5 Prototypische Umsetzung – Einsatz textiler Materialien ... 143
4.6 Ökobilanzielle Bewertung der smarten Mittelkonsole ... 152
4.6.1 Ziel- und Untersuchungsrahmen (Goal and Scope) ... 152
4.6.2 Datensammlung und -aufbereitung (LCI) ... 153
4.6.3 Wirkungsabschätzung (LCIA) ... 157
4.6.4 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse ... 157
4.6.5 Fazit der ökobilanziellen Bewertung der Mittelkonsole ... 163
Literatur ... 163
4.7 Industrieller Transfer ... 164
4.7.1 Forschung und Entwicklung (FuE) in Kooperation mit der Industrie ... 165
4.7.2 Prototypenbau in Kooperation mit der Industrie ... 168
4.7.3 Überprüfung der Technologieakzeptanz in der Industrie ... 169
Literatur ... 170
5 Projektpartner ... 172
6 Autoren:innen und Projektbeteiligte ... 175

Management Summary

Dieser Bericht stellt die Ergebnisse des Projekts CYCLOMETRIC vor. Im Projekt CYCLOMETRIC wurden innovative Methoden und Softwarelösungen für eine nachhaltige und kreislauforientierte Produktentwicklung konzipiert und erprobt. Als Teil der BMBF-Fördermaßnahme „Transformation zur nachhaltigen Wertschöpfung“ adressiert das Projekt die Automobilindustrie als Anwendungsbeispiel, bietet jedoch branchenübergreifende Ansätze und Lösungen für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft in den frühen Produktentwicklungsphasen. Ziel ist es, die Transformation hin zu einer nachhaltigen Wertschöpfung zu fördern und die Innovationsfähigkeit deutscher Unternehmen zu stärken.

Ein zentraler Fokus des Projekts liegt auf der kreislauforientierten Produktentwicklung, die durch ein Modellsystem zur Entscheidungsunterstützung Nachhaltigkeitsaspekte bereits in frühen Entwicklungsphasen integriert. Dabei werden Lebenszyklusbetrachtungen und R-Strategien wie Reuse, Repair und Recycling in den Entwicklungsprozess eingebunden. Ein wesentliches Ergebnis des Projekts ist das Softwaretool *CycloP*, ein modellbasiertes Systems-Engineering-Tool, das technische Produktgestalt und Lebenszyklus integrativ modelliert, analysiert und optimiert. Dabei unterstützt *CycloP* ebenfalls die Ökobilanzierung (LCA), um Nachhaltigkeitsmetriken wie den CO_2-Fußabdruck und die Materialeffizienz zu bewerten. Automatisierte Szenario-Generierung und Sensitivitätsanalysen unterstützen die Entscheidungsfindung und fördern die Entwicklung nachhaltiger Produkte.

Ein weiteres zentrales Thema des Projekts war die kreislauforientierte Leichtbaukonstruktion, die am Beispiel einer nachhaltigen Mittelkonsole aus Naturfaserverbundwerkstoffen demonstriert wird. Zur Unterstützung der Produktentwicklung wurde die Designmethodik „Wheel of Circularity“ eingeführt. Diese systematische Methode hilft, kreislauffähige Produkte (z. B. durch Unterstützung mit CycloP) zu gestalten, und ermöglicht die Entwicklung von Designvarianten für unterschiedliche Zielgruppen und Nutzungsszenarien. Die Lösungen für die Mittelkonsole zeichnen sich durch einen modularen Aufbau mit lösbaren Verbindungstechniken aus, die Reparatur, Wiederverwendung und Recycling erleichtern. Die prototypische Fertigung berücksichtigt eine digitale Prozessdatenerfassung, um die Effizienz und Rückverfolgbarkeit zu erhöhen.

Dieses Buch kombiniert daher theoretische Grundlagen mit praktischen Anwendungen und bietet eine fundierte Analyse der Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie. Es behandelt Themen wie die Bewertung und Umsetzung von Kreislauffähigkeit, die Entwicklung von Konstruktions- und Fügeprinzipien, die ökobilanzielle Bewertung sowie die Entwicklung von Konzepten für eine zirkuläre Produktion. Die Ergebnisse des Projekts sind nicht nur auf die Automobilindustrie beschränkt, sondern auch auf andere Branchen übertragbar. Somit liefert das Projekt CYCLOMETRIC einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Transformation der Wertschöpfung. Die entwickelten Methoden und Werkzeuge fördern die globale Wettbewerbsfähigkeit im Bereich der Kreislaufwirtschaft und bieten eine Grundlage für die Integration nachhaltiger Ansätze in bestehende industrielle Prozesse. Zukünftige Forschung sollte sich auf die Skalierung der Ansätze und deren breitere Anwendung konzentrieren.

Präambel

Das Förderprogramm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zielt darauf ab, nachhaltige Produktions-, Dienstleistungs- und Arbeitsmethoden zu entwickeln, um Wohlstand in Deutschland zu fördern und gleichzeitig den Planeten zu schützen. Das Projekt CYCLOMETRIC ist Teil dieser Initiative und konzentriert sich auf die Fördermaßnahme „Transformation zur nachhaltigen Wertschöpfung – Unternehmen auf dem Weg zur kreislauffähigen Mobilität“, die auch zu diesem BMBF-Programm gehört.

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor:innen.

Das Projekt trägt durch seinen Lösungsansatz zur Gestaltung nachhaltiger und kreislauf-orientierter Produkte, Produktionsprozesse und Geschäftsmodelle bei. Es leistet damit einen wichtigen Beitrag zum Erkennen und Heben möglicher Potenziale kreislaufwirtschaftlicher Ausrichtung bereits in frühen Produktentwicklungsphasen und begleitet diese durchgängig bis in die Produktion. Entscheidungs-, Daten-, Informations- und Wissensbrüche werden vermieden und die bislang punktuelle Berücksichtigung nachhaltiger Aspekte und kreislauf-orientierter Ansätze werden fortlaufend erfolgen. Dafür sind Zusammenhänge theoretisch und praktisch erhoben sowie erforscht und in einem zentralen Produktarchitekturmodell und daran angeschlossenen Analysemodulen kreislaufwirtschaftlicher Aspekte abgelegt. Die Entscheidungs- und Unterstützungsebene ermöglicht eine zielgerichtete Entscheidungs-unterstützung bezüglich der Ausgestaltung in einem multidimensionalen Zielsystem der nachhaltigen, ökonomischen, ökologischen und sozialen Entwicklung. Für konkrete Konstellationen wird damit der Effekt kreislauforientierter Produkt- und Wertschöpfungs-gestaltung transparent und Abwägungsentscheidungen bezüglich der unterschiedlichen Aspekte von Nachhaltigkeit und weiteren unternehmerischen Zielen angeleitet. Zur Anwendung erfolgt die Umsetzung in einem Softwaretool. Das Projekt leistet somit Beiträge zu Methoden und Werkzeugen zur Gestaltung von Produkten und Wertschöpfung in Deutschland, die den Erhalt des Planeten im Trade-Off mit weiteren gesellschaftlich relevanten sowie ökonomisch zu berücksichtigenden Faktoren setzt.

CYCLOMETRIC beschäftigt sich mit der modellbasierten Entscheidungsunterstützung zur proaktiven sowie Lebenszyklus-gerichteten Entwicklung von Produkten und zugehörigen Dienstleistungen am Anwendungsbeispiel von Fahrzeug-Komponenten. Das Projekt leistet somit einen Beitrag zur Sicherung der deutschen Wirtschaft (u. a. im Automobil- und Mobilitätssektor), indem Fahrzeugkomponenten und Komponenten anderer Industrie- und Dienstleistungssektoren kundenzentriert und nachhaltig gestaltet werden können. Insbesondere auch kleine und mittlere Unternehmen – wie zum Beispiel Softwareunternehmen, die sich auf die entsprechenden Lebenszyklusanalyse (LCA) und Product Lifecycle Management (PLM) Lösungen im Kontext der großen industriellen Player spezialisiert haben – werden über den Transfer der Ergebnisse unterstützt und können diese nutzen. Durch die breit angelegte

Relevanz des Themas, sind die Ergebnisse des Projekts nicht nur für den dargelegten Anwendungsfall der Automobilindustrie tauglich, sondern lassen sich in verschiedenen Wirtschaftszweigen etablieren. Durch die zunehmende Servitization der Automobilindustrie wird dabei auch die sektorale Unterscheidung zwischen Produktion und Dienstleistungen überwunden. Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse werden Unternehmen dazu befähigen, frühzeitig den Nutzen von nachhaltigen Produkten und Dienstleistungen sowie kreislauf-orientiertem Design im Vorfeld zu bewerten und somit Chancen, Risiken und Potenziale besser abschätzen zu können. Die Partner verzahnen dabei Produktions-, Dienstleistungs- und Arbeitsforschung, um die komplexen Beziehungen der Entwicklung und Produktion - und damit der Wertschöpfung über alle Lebenszyklusphasen hinweg – erfassen zu können sowie beschreibbar und für Entwickler:innen und Designer:innen begreifbar zu machen. Das Projekt trägt zur globalen Wettbewerbsstellung von deutschen Unternehmen bei und stärkt deren Innovationsfähigkeit im Bereich kreislauforientierter Produktgestaltung und damit zusammenhängender Geschäftsmodelle.

1 Einleitung

Dieser Bericht bietet eine umfassende Analyse der Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie und deren praktische Umsetzung in der Produktentwicklung. Er ist in mehrere Kapitel unterteilt, die sowohl theoretische Grundlagen als auch konkrete Anwendungen behandeln.

Zu Beginn wird in Kapitel 1 in das Thema eingeführt und die Bedeutung der Kreislaufwirtschaft für die Automobilindustrie hervorgehoben (siehe Kapitel 1.1 und 1.2). Es wird die Problemstellung des Projekts sowie die Relevanz der kreislauforientierten Produktentwicklung detailliert erläutert, um die Bedeutung dieses Ansatzes für die Branche zu verdeutlichen. Die Zielsetzung des Projektes (siehe Kapitel 1.3) wird im Weiteren definiert, gefolgt von einer Einführung in die Grundlagen der Kreislaufwirtschaft (siehe Kapitel 2), die die theoretischen Konzepte und Prinzipien vorstellt.

Ein zentraler Tteil ist das Kapitel 3 „Circular Systems Engineering und softwarebasierte Entscheidungsunterstützung“, das verschiedene Aspekte der Kreislaufwirtschaft behandelt. Dazu gehören die Bewertung und Umsetzung von Kreislauffähigkeit (siehe Kapitel 3.1), die Entwicklung von Konstruktions- und Fügeprinzipien (siehe Kapitel 3.7), sowie die Einführung einer Beschreibungssprache für kreislauforientierte Lebenszyklen (siehe Kapitel 3.2). Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der ökobilanziellen Bewertung (siehe Kapitel 3.3), die Methoden zur Analyse der Zirkularität und Umweltwirkungen beschreibt. Zudem wird ein neu entwickeltes Softwaretool *CycloP* vorgestellt (siehe Kapitel 3.4), dass die Produktentwicklung unterstützt. Ergänzt wird dieses Kapitel durch die Entwicklung von Konzepten für eine zirkuläre Produktion (siehe Kapitel 3.5) sowie Methoden zur sprachbasierten Anforderungsdefinition und multikriteriellen Bewertung (siehe Kapitel 3.6).

Das Kapitel 4 widmet sich der Entwicklung einer kreislauforientierten, smarten Mittelkonsole. Hier wird eine spezielle kreislauforientierte Design Methode vorgestellt (siehe Kapitel 4.1), darunter das Konzept des „Wheel of Circularity“. Es folgt die Konzeption und das Design der Mittelkonsole (siehe Kapitel 4.2), einschließlich der Leichtbaukonstruktion (siehe Kapitel 4.3), der Integration von Simulation Data Management (siehe Kapitel 4.4) und dem Einsatz textiler Materialien (siehe Kapitel 4.5). Die ökobilanzielle Bewertung der Mittelkonsole (siehe Kapitel 4.6) analysiert deren Umweltwirkungen, während das Kapitel 4.7 zum industriellen Transfer die Zusammenarbeit mit der Industrie und die Akzeptanz der Technologie beleuchtet.

Die einzelnen Kapitel der genannten Autor:innen bieten detaillierte Einblicke in die verschiedenen Teilbereiche des Projekts. Der Bericht ist insgesamt ähnlich wie ein Sammelband strukturiert und beschreibt das Projekt aus unterschiedlichen Perspektiven, mit verschiedenen Lösungsansätzen und Ergebnissen, um den ganzheitlichen Ansatz von CYCLOMETRIC in seiner Komplexität verständlich und fundiert zu präsentieren.

1.1 Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie

Die Europäische Union hat das Ziel, bis zum Jahr 2050 klimaneutral zu sein und eine Kreislaufwirtschaft zu etablieren [1]. Mit der EU-Verordnung für das Ökodesign nachhaltiger Produkte (ESPR) [2], mit der Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) [3] oder mit der geplanten EU-Richtlinie zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit der Automobilindustrie [4] werden bereits heute Rahmenbedingungen geschaffen, die Unternehmen incentivieren und zum Teil regulatorisch verpflichten, ökologisch nachhaltige und kreislauffähige Produkte auf den Markt zu bringen. Das notwendige ökologische Potenzial erreicht man jedoch nur, wenn bei der Produktentwicklung ökonomische, ökologische und soziale Vor- und Nachteile sowie der Trade-Off zwischen diesen berücksichtigt werden [5]. Wenig genutzte oder falsch angewandte Technologien und Gestaltungsansätze können den angestrebten nachhaltigen Effekt mindern oder sogar ins Gegenteil verkehren (sog. Rebound-Effekte und Trade-Offs). Von zentraler Bedeutung ist dabei die frühe Phase der Produktentwicklung. Schätzungen gehen davon aus, dass sich durch fundierte Entscheidungen in der frühen Phase erwartete Einsparungspotenziale von Rohstoffen und Emissionen im Bereich von knapp 10 % bis 60 % realisieren lassen [6–11]. In diesen frühen Entwicklungsphasen muss jedoch auch der erwartete Lebenszyklus des Produkts mitbetrachtet werden, um diese Potenziale zu heben und die genannten adversen Effekte zu vermeiden. Denn in dieser manifestieren sich die Trade-Off Entscheidungen: Lohnt es sich, ein nachhaltiges Material einzusetzen, das eventuell nicht so lange hält? Oder ist eine robuste Modulstruktur zweckdienlich, die sich gut reparieren lässt, allerdings im Recycling eventuell Nachteile aufweist?

Neuartige auf Nachhaltigkeit ausgelegte Technologien und Produkte entfalten ihr volles Potenzial, wenn ihre Vor- und Nachteile bei der Produktentwicklung berücksichtigt und im Kontext konkreter Geschäfts- und Vertriebsmodelle sowie Nachhaltigkeitsziele bewertet werden. Wenig genutzte oder falsch eingesetzte Technologien können den gewünschten, hinsichtlich der Nachhaltigkeit zu erzielenden Effekt schmälern oder sogar ins Gegenteil verkehren.

Dabei stellt sich vor allem die Integration nachhaltiger Technologien an der richtigen Stelle, im richtigen Umfang und in der korrekten Art und Weise in die Produktarchitektur als Herausforderung dar (siehe Abbildung 1): Nachhaltigkeit weist soziale, ökonomische und ökologische Dimensionen auf und kann ansatzbezogen durch die effiziente oder suffiziente Ressourcennutzung sowie durch eine kreislaufwirtschaftlich ausgerichtete Produkt- und Servicegestaltung realisiert werden [12, 13]. Insbesondere die kreislaufwirtschaftliche Ausrichtung (Cradle-to-Cradle) hat hierbei in den vergangenen Jahren an Bedeutung gewonnen, um durch geteilte Nutzung, Wiederverwendung, Reparatur, Aufbereitung und

Recycling den Lebenszyklus der Produkte und Services oder einzelner Subsysteme, Komponenten und Materialien zu verlängern [12, 14].

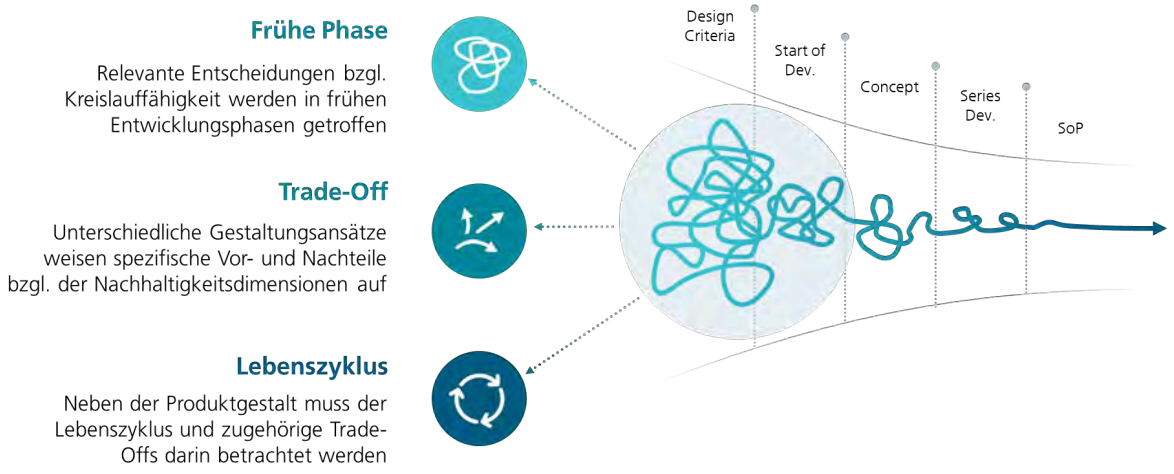


Abbildung 1: Herausforderungen der frühen Phase der kreislauforientierten Entwicklung. (eigene Darstellung)

Während effiziente und suffiziente Nachhaltigkeitsstrategien komplementär zur bisherigen Entwicklungspraxis von Produkten und Services umgesetzt werden konnten, fordert die Kreislauforientierung im Kern eine geänderte Ausrichtung: Sie muss bereits in frühen Entwicklungsphasen berücksichtigt werden, da hier noch hohe Freiheitsgrade bestehen, wenn relevante Lebenszyklusentscheidung des Produkts oder Services über die Architektur und Modularisierung festgelegt werden. Diese beeinflussen die Möglichkeiten zur Kreislauffähigkeit in besonderem Maße. Beispielsweise muss eine Wiederverwendung aufbereiteter Komponenten oder eine Anpassung vorhandener Komponenten durch die Produktarchitektur und eine entsprechende Modularisierung ermöglicht werden. Gleichzeitig erfordert die frühe Berücksichtigung aber auch eine durchgängige Betrachtung der Effekte in und auf die darauffolgenden Entwicklungsschritte und Lebenszyklusphasen des Produkts oder Services. Möglicherweise negative Effekte, alternative Ansatzpunkte zur Realisierung der Nachhaltigkeitsziele oder neu geschaffene Potenziale sollten identifiziert werden.

Die Produktentwickler:innen müssen eine Vielzahl an Abhängigkeiten, zum Beispiel in Bezug auf die Produzierbarkeit, Recyclingfähigkeit, die Nutzungsweise oder das Geschäftsmodell, entwicklungsphasenbezogen berücksichtigen und dies in allen Entwicklungsphasen, insbesondere aber bereits in einer frühen Entwicklungsphase bei geringem Produktwissen, ganzheitlich bewerten können. Zwar existieren Analysemethoden, um kreislaufwirtschaftliche Bewertungen von Produkten und Dienstleistungen unter einzelnen Nachhaltigkeitsaspekten vorzunehmen, diese adressieren zumeist allerdings spätere Entwicklungsphasen, unterstützen die Ableitung von Anpassungen an der Produktgestaltung nur bedingt und können den Trade-Off mit weiteren Nachhaltigkeitsaspekten anderer Analysen nicht verarbeiten. Sie stellen lediglich singuläre Analyseergebnisse dar, die Entwickler:innen gemäß ihrer Gestaltungsaufgabe interpretieren, in den Kontext setzen und verarbeiten müssen. Aufgrund der zeitlich und produktstrukturell zu berücksichtigenden Dimensionen ist daher für Entwickler:innen eine Nicht-Linearität im Denken, im kreativen Problemlösen und im aktiven Gestalten erforderlich,

die aufgrund der mit der Kreislaufwirtschaft einhergehenden kognitiven Komplexität ohne Softwareunterstützung nicht oder nur bedingt objektiv umsetzbar ist. Insbesondere die Automobilindustrie steht dabei aufgrund der komplexen Produkte, Produktions- und Nutzungsweisen vor großen Herausforderungen der Bewertung und Trade-Off-Findung diverser, resultierender Effekte.

Es ist daher eine durchgängige, konsistente Wissens- und Entscheidungsunterstützung notwendig, die Nachhaltigkeitsanalysen für alle Entwicklungsphasen und unterschiedliche Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigt (Durchgängigkeit), deren Bewertungen aggregiert und im Entwicklungsverlauf bei zunehmendem Produktwissen widerspruchs- und gestaltungsbruchfrei fortschreibt (Konsistenz), um von Anfang an die zielgerichtete und effiziente Gestaltung mit Fokus, Nachhaltigkeit beziehungsweise Kreislauforientierung anzuleiten (Wissens- und Entscheidungsunterstützung).

1.2 Relevanz der kreislauforientierten Produktentwicklung in der Automobilindustrie

Das inhärente Ziel der Kreislaufwirtschaft ist die Maximierung der Ressourcenwiederverwendung, u a. durch die Nutzung von Abfallströmen als Ressourcen [12, 14]. Aktuelle Produktionskonzepte im Automobilbereich werden beispielsweise nur bedingt anhand von Kriterien einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft konzipiert und umgesetzt [15]. Es finden lediglich Produkt- und Materialanforderungen Berücksichtigung, obwohl der Produktionsprozess einen signifikanten Einfluss auf die Nachhaltigkeit besitzt. So stehen aktuell Kriterien wie Stückzahlanforderungen, Fertigungsresilienz, Auslastungsgrenzen, Skaleneffekte sowie Bauteilgeometrie-Eigenschaften, Oberflächenqualitäten, Materialqualitäten und Defekte im Fokus, um einen Produktionsprozess oder Produktionsabläufe zu definieren [15].

Um entsprechende Informationen über die Umweltauswirkungen von Produkten und Prozessen im Automobilbereich zu gewinnen, ist der Einsatz von Ökobilanzierungsinstrumenten wie dem Life Cycle Assessment (LCA) entlang von Wertschöpfungsketten hinsichtlich Ressourceneinsatz, Energieverbrauch und Umweltauswirkungen in der Automobilindustrie mittlerweile recht verbreitet [16–18]. Klassischerweise benötigen diese eine aufwendig zu beschaffende Datengrundlage sowie einen entsprechend hohen Wissensstand über die Produktgestalt (vgl. z. B. [19]). Eine vollständige LCA wird in der Praxis oftmals erst in späten Entwicklungsphasen eingesetzt, wobei auch zunehmend Methoden für die lebenszyklusgerechte Auslegung in frühen Entwicklungsphasen in Form von Design-Rules oder Schätzungsverfahren wissenschaftlich entwickelt werden [20–22]. Die fehlende Anknüpfung an die folgenden Produktentwicklungsphasen, interne PLM-Systeme und LCA-Methoden sowie die relativ geringe Bekanntheit haben

bislang allerdings lediglich zu einer geringen Anwendung in der Praxis geführt [23]. Dementsprechend erfolgt in der Praxis eine Zielerreichungsmessung – z. B. durch entsprechende Nachhaltigkeitsberichte diverser Firmen entlang bestimmter Indikatoren oder durch teilweise firmenindividuell eigenentwickelte LCA-Analysen für das jeweilige Produktportfolio (vgl. [24–27]). Die proaktive Gestaltung für Kreislaufwirtschaft beschränkt sich zumeist allerdings auf den Einsatz recyclingfähiger oder recycelter Materialien [28, 21].

In Unternehmen erfolgt die Anwendung von Ökodesign meist unter Einsatz kommerzieller Ökobilanzsoftware, die dem neuesten Stand der Technik entspricht. Typische Beispiele für solche Softwarelösungen sind LCA for Experts (früher GaBi), Umberto oder SimaPro [29–31]. Falls interne Ressourcen oder Kompetenzen fehlen, kann die Durchführung von Ökodesign-Studien auch an externe Beratungsfirmen für Ökobilanzen ausgelagert werden. Zusätzlich gibt es eine Vielzahl spezialisierter Werkzeuge für Ökodesign.

Um eine nahtlose Integration sowie eine Transformation hin zu digitalisierten und digital unterstützten Arbeitsabläufen und Arbeitsumgebungen für eine kreislaufwirtschafts- und nachhaltigkeitsorientierte Produkt- und Systementwicklung auf Basis digitaler Modelle zu etablieren, sind sowohl unternehmensspezifische als auch generell anwendbare kreislauf-orientierte Konzepte und Ansätze notwendig. Aktuell existieren zahlreiche Überlegungen, wie zirkulare Wertschöpfungsstrukturen und Geschäftsmodelle zukünftig das Wirtschaftswachstum vom Ressourcenverbrauch entkoppeln können [32]. Insbesondere produzierende Unternehmen stehen vor der Herausforderung, bestehende linear geprägte Produktionsinfrastrukturen so anzupassen, dass diese für die zirkuläre Wertschöpfung gerüstet sind. Obwohl der Umfang an Literatur im Bereich ressourceneffizienter und zirkularer Produktionsstrukturen zugenommen hat, gibt es noch Raum für Grundlagenarbeit.

Wissenschaftlich wie auch praktisch wird die Debatte über Kreislaufwirtschaft dabei vor allem über die Schließung des Kreislaufs von Ressourcenströmen bzw. einer optimierten und nachhaltigen Energie- und Abfallwirtschaft, geprägt [28]. Ein geringer wissenschaftlicher wie auch praktischer Fokus lag dabei bisher auf der Rückgewinnung und dem Mehrfacheinsatz von Subsystemen und Komponenten in neuen, weiterentwickelten oder veränderten Produkten. Beispiele im Automotive-Sektor wie beispielsweise das „ICARRE 95“-Projekt [33] oder das Mercedes-Benz Gebrauchtteile-Center [34] zeigen dabei exemplarisch und vereinzelt das Potenzial auf. Eine weitgehende Verbreitung kann bislang allerdings vermutlich aufgrund der kognitiv komplexen Berücksichtigung in der Modularisierungsstrategie nicht beobachtet werden. Der Lösungsansatz soll hierzu einen Beitrag leisten.

Europa zählt mit rund 15 Millionen produzierten Fahrzeugen im Jahr 2023 zu den bedeutendsten Standorten der globalen Automobilindustrie [35]. In Deutschland wurden im selben Jahr insgesamt 4,1 Millionen Pkw hergestellt [36]. Aufgrund der ressourcen- und treibhausgasintensiven Wertschöpfungsketten sowie der langen Lebensdauer von Fahrzeugen ist es daher zielführend, die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft (CE) auch in der Fahrzeug-entwicklung zu berücksichtigen.

Die Produktion eines Autos mit einem Gewicht von etwa 1,5 Tonnen erfordert rund 70 Tonnen Material- und Ressourcenverbrauch. Seit den 1980er Jahren ist das Gewicht von Fahrzeugen

um etwa 30 bis 50 Prozent gestiegen [37]. Allein die deutsche Automobilindustrie verbrauchte im Jahr 2018 beispielsweise 10,6 Millionen Tonnen Stahl, eine Million Tonnen Aluminium, 108.000 Tonnen Kupfer, 47.600 Tonnen Zink und 292.000 Tonnen Blei [38].

Durch die Einführung kreislaufwirtschaftlicher Maßnahmen können erhebliche Einsparungen bei Ressourcen und Emissionen erzielt werden. Studien gehen davon aus, dass durch die Umsetzung solcher Maßnahmen in Europa bis zum Jahr 2050 eine Reduktion der CO2-Emissionen um bis zu 60 Prozent möglich ist [39, 40].

Insgesamt lässt sich feststellen, dass einerseits bereits eine gewisse Abdeckung vorhandener Forschungs- und praktischer Arbeiten zur Thematik der Kreislaufwirtschaft vorhanden ist, diese andererseits aber noch Lücken in bestimmten Bereichen und insbesondere in der durchgängigen, konsistenten und vorausschauenden Betrachtung, während der Produktentwicklung aufweist. Der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens vorgeschlagene Lösungsansatz adressiert genau diese beiden Aspekte und trägt damit zur wissenschaftlichen und praktischen Weiterentwicklung kreislaufwirtschaftlicher und nachhaltiger Themenbereiche in der Produkt- und Serviceentwicklung sowie Produktion bei.

Literatur

1. Europäische Kommission (2025) Der europäische Grüne Deal. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de. Accessed 04 Apr 2025
2. European Commission (2022) Proposal for Ecodesign for Sustainable Products Regulation. https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-ecodesign-sustainable-products-regulation_en. Accessed 16 Aug 2024
3. LBBW (2024) Nachhaltige Produkte sind ein Wettbewerbsvorteil. https://www.lbbw.de/artikelseite/verantwortung-zeigen/weleda-nachhaltige-produkte-wettbewerbsvorteil_7ay8qgnu6_d.html. Accessed 19 Aug 2024
4. Tran Y, Meyer E, Bloch L et al. (2024) Studie zur Nachhaltigkeit im Mittelstand – Bestandsaufnahme und Handlungskompass, Potsdam
5. Fraunhofer IAO (2025) CYCLOMETRIC - Nachhaltige Produktentwicklung neu gedacht. https://cyclometric.de/. Accessed 19 Mar 2025
6. Fuchs S, Mohr S, Orebäck M et al. (2022) Product sustainability: Back to the drawing board. https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/product-sustainability-back-to-the-drawing-board. Accessed 08 Sep 2024
7. Briem A-K (2023) Projektvorstellung "Cyclometric", Stuttgart
8. Briem A-K, Hong SH, Leinemann T et al. (2023) Thinking and designing sustainably from the very beginning – Potentials and challenges of integrating LCA in early product development and innovation processes, Lille
9. Diaz A, Schöggl J-P, Reyes T et al. (2021) Sustainable product development in a circular economy: Implications for products, actors, decision-making support and lifecycle information management. Sustainable Production and Consumption 26:1031–1045. https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.12.044

10. Grochowski EM, Müller A-K, Merli G et al. (2015) Produktentstehungsprozess in den frühen Phasen unter Berücksichtigung der Herausforderungen im Forschungscampus ARENA2036
11. Ventura A, Heller K, Loh A et al. (2023) Six Strategies for Designing Sustainable Products. https://www.bcg.com/publications/2023/six-strategies-to-lead-product-sustainability-design. Accessed 08 Sep 2024
12. Braungart M, McDonough W (2016) Cradle to Cradle: Einfach intelligent produzieren, Ungekürzte Taschenbuchausgabe, 4. Auflage. Piper, München and Berlin and Zürich
13. ISO/TC (1993) Environmental management(ISO/TC)
14. Europäisches Parlament (2015) Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile. https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile. Accessed 23 Jul 2021
15. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), www.bmuv.de (2024) Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie
16. Bjørn A, Owsianiak M, Molin C et al. (2018) LCA History. In: Hauschild MZ, Rosenbaum RK, Olsen SI (eds) Life Cycle Assessment. Springer International Publishing, Cham, pp 17–30
17. Sjöqvist N, Ibrahem A (2021) Life Cycle Assessment in the Automotive Industry : Considerations for First-Tier Suppliers
18. Grenz J, Ostermann M, Käsewieter K et al. (2023) Integrating Prospective LCA in the Development of Automotive Components. Sustainability 15:10041. https://doi.org/10.3390/su151310041
19. Halstenberg FA, Lindow K, Stark R (2017) Utilization of Product Lifecycle Data from PLM Systems in Platforms for Industrial Symbiosis. Procedia Manufacturing 8:369–376. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.047
20. Broch F (2017) Integration von ökologischen Lebenswegbewertungen in Fahrzeugentwicklungsprozesse. Dissertation, Technische Universität Braunschweig
21. Eddy DC, Krishnamurty S, Grosse IR et al. (2015) A predictive modelling-based material selection method for sustainable product design. Journal of Engineering Design 26:365–390. https://doi.org/10.1080/09544828.2015.1070258
22. Buchert T, Pförtner A, Bonvoisin J et al. (2016) Model-Based Sustainable Product Development. In: Proceedings of the DESIGN 2016: Excellence in Design. Design Society
23. Stark R, Pförtner A (2015) Integrating ontology into PLM-tools to improve sustainable product development. CIRP Annals 64:157–160. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.018
24. Tolón-Becerra A, Bienvenido F (2008) Conceptual Modeling in a Meta-model of Sustainability Indicators. In: Lovrek I, Howlett RJ, Jain LC (eds) Knowledge-based intelligent information and engineering systems: 12th international conference, KES 2008, Zagreb, Croatia, September 3-5, 2008; proceedings, vol 5179. Springer, Berlin, pp 716–723
25. PE International AG (2014) Best Practice LCA: Impact Assessment. http://www.gabi-software.com/uploads/media/Webinar_LCIA_methods_-_an_overview_final.pdf

26. Daimler (2021) Mercedes-Benz models with environmental certificates. https://www.daimler.com/sustainability/product/environmental-certificates/. Accessed 23 Jul 2021
27. AUDI AG (2025) Integrated and well thought out. https://www.audi.com/en/company/sustainability/life-cycle-assessment.html. Accessed 23 Jul 2021
28. Kwant C de, Rahi AF, Laurenti R (2021) The role of product design in circular business models: An analysis of challenges and opportunities for electric vehicles and white goods. Sustainable Production and Consumption 27:1728–1742. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.030
29. sphera (2021) GaBi: Ökobilanz Software. https://gabi.sphera.com/deutsch/index/. Accessed 23 Jul 2021
30. iPoint (2021) Ökobilanz (LCA)-Software: Umberto LCA+. https://www.ifu.com/de/umberto/oekobilanz-software?gclid=Cj0KCQjw0emHBhC1ARIsAL1QGNerrdJpMNiDfiGd93emDvo_yDFyusuH0tfhn6IOT84brsXwJA6KVqEaAnt8EALw_wcB. Accessed 23 Jul 2021
31. SimaPro (2021) SimaPro: The world's leading LCA software. https://simapro.com/. Accessed 23 Jul 2021
32. Braun A-T, Schöllhammer O, Rosenkranz B (2021) Adaptation of the business model canvas template to develop business models for the circular economy. Procedia CIRP 99:698–702. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.093
33. Europäische Kommision (2021) Industrial Platform Demonstrator to achieve 95% recycling of the "end-of-life vehicle": ICARRE 95. LIFE 3.0 - LIFE Project Public Page. https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=3950. Accessed 23 Jul 2021
34. Daimler (2025) Mercedes-Benz Gebrauchtteile Center: MB GTC B2C Shop. https://www.mbgtc.de/startseite/. Accessed 23 Jul 2021
35. Impey B (2025) Themenseite: Automobilindustrie Europa. https://de.statista.com/themen/5357/automobilindustrie-europa/#topicOverview. Accessed 28 Oct 2025
36. ZDFheute (2025) Automobilindustrie: Größter Industriezweig Deutschlands. https://www.zdfheute.de/politik/deutschland/automobilindustrie-export-umsatz-deutschland-100.html. Accessed 28 Oct 2025
37. VCÖ - Mobilität mit Zukunft (2017) Wie viele Ressourcen werden bei der Pkw–Produktion verbraucht? https://vcoe.at/service/fragen-und-antworten/wie-viele-ressourcen-werden-bei-der-pkw-produktion-verbraucht. Accessed 28 Oct 2025
38. Braun N, Hopfensack L, Fecke M et al. (2021) Chancen und Risiken im Automobilsektor für die Umsetzung einer klimaneutralen und ressourceneffizienten zirkulären Wirtschaft: Vorstudie im Rahmen des Verbundvorhabens Circular Economy als Innovationsmotor für eine klimaneutrale und ressourceneffiziente Wirtschaft (CEWI)
39. (2018) The Circular Economy - a Powerful Force for Climate Mitigation: Transformative innovation for prosperous and low-carbon industry, Stockholm
40. Stuchtey MR (2016) Circular Economy: Werte schöpfen, Kreisläufe schließen - Dr. Martin R. Stuchtey 25. Januar 2016, Berlin, Berlin

1.3 Zielsetzung des Projektes

Das Forschungsprojekt CYCLOMETRIC verfolgt das Ziel, ein innovatives System zur lebenszyklus- und kreislauforientierten Wissens- und Entscheidungsunterstützung zu entwickeln. Dieses System soll als Modell- und Software-Prototyp realisiert werden und aus spezifischen Modulen zur Analyse, Bewertung und Vorhersage bestehen. Ziel ist es, Entwicklern eine umfassende Unterstützung bei der proaktiven Gestaltung von Produkten und Komponenten zu bieten, die sowohl den gesamten Lebenszyklus als auch die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft berücksichtigen.

Das System soll es ermöglichen, nachhaltige Produkte vorausschauend und zielgerichtet zu entwickeln, indem es die kognitive Komplexität für Entwickler:innen reduziert und verschiedene Aspekte der Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft integriert. Dabei wird vorhandenes Wissen, beispielsweise aus Vorgängerprodukten, genutzt, um fundierte Entscheidungen zu treffen. Dies soll die Entscheidungsgrundlage und -fähigkeit der Entwickler:innen in allen Phasen der Produktentwicklung verbessern und die Gestaltung ökonomisch und ökologisch nachhaltiger Produkte fördern.

Ein zentraler Bestandteil des Projekts ist die Entwicklung eines multikriteriellen Zielsystems, das eine transparente Auswahl nachhaltiger Produktvarianten ermöglicht. Dieses Zielsystem soll Dimensionen wie Produzierbarkeit, Recyclingfähigkeit, Wiederverwendbarkeit, Emissionen und Umweltauswirkungen sowie Kosten berücksichtigen und modular erweiterbar sowie anpassbar sein. Der Fokus liegt dabei auf einem ressourceneffizienten Einsatz in der Entwicklung lebenszyklus- und kreislauforientierter Produkte und Prozesse. Insbesondere in der Automobilbranche soll das Projekt zur Entwicklung nachhaltigerer, lebenszyklus-orientierter Fahrzeuge und zur zielgerichteten Integration neuer Technologien beitragen.

Darüber hinaus wird ein Metamodell zur kreislauforientierten Beschreibung von Produkt-architekturen sowie eine Methode für kreislauforientiertes Engineering, einschließlich Ökobilanzierung, erforscht. Die damit verbundenen Daten und Datenstrukturen sollen konzeptionell und, soweit möglich, technisch mit digitalen Modellen (Model-based Systems Engineering, MBSE) verknüpft werden. Diese digitalen Modelle sollen als „single source of truth“ für produkt- und prozessbezogene Daten dienen und in der Produkt- und System-entwicklung eingesetzt werden.

Abschließend sollen Nachhaltigkeitsanforderungen der Kreislaufwirtschaft in den Systems-Engineering-Prozess integriert werden, und zwar auf verschiedenen Entwicklungsebenen und in unterschiedlichen Entwicklungsphasen. So wird das Projekt CYCLOMETRIC einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen und zukunftsorientierten Produktentwicklung leisten.

2 Grundlagen der Kreislaufwirtschaft

Im Folgenden wird eine kurze Einführung in die wesentlichen Begriffe und Bestandteile im Kontext einer Kreislaufwirtschaft gegeben.

Die Kreislaufwirtschaft ist ein Wirtschaftsmodell, das darauf abzielt, die Verschwendung von Ressourcen zu reduzieren und den Wert von Produkten und Materialien zu erhalten [1–3] Walker [4] definiert: „[...] Circular Economy (CE) wird implementiert, um Nachhaltigkeit zu erreichen, aber Nachhaltigkeit ist breiter als CE [...]“. Der Unterschied zwischen Kreislaufwirtschaft (CE) und Nachhaltigkeit verschwimmt jedoch auch im Projektkontext sowie in der Realität, da beide Konzepte in der (automobilen) Entwicklungspraxis oft als gleich angesehen werden. Produkte werden dahingehend gestaltet, dass sie am Ende ihres Lebenszyklus wiederverwendet, repariert oder recycelt werden können, mit dem Ziel, Abfall zu reduzieren und die Ressourceneffizienz zu steigern. Diese Methoden helfen dabei, die Nachhaltigkeitsleistung von Produkten zu beurteilen, zu messen und zu verbessern. Die Kreislaufwirtschaft bildet einen spezifischen Ansatz innerhalb des breiteren Rahmens der Nachhaltigkeit. Die Herausforderung liegt darin, diese effektiv in den Prozess der Produktentwicklung zu integrieren, was im Rahmen des Life Cycle Engineering (LCE) geschieht, das sich mit den technischen Aspekten der Produktentwicklung befasst, um den Produktlebenszyklus zu optimieren und die Nachhaltigkeit zu fördern [5]. In diesem Zusammenhang werden Produkteigenschaften unter Berücksichtigung mehrerer Produktlebenszyklen priorisiert [6–8]. Typische Produkteigenschaften in diesem Zusammenhang sind „Zuverlässigkeit“, „Langlebigkeit“ oder „Recyclingfähigkeit“ [9, 10].

Die Fokussierung auf ein zirkuläres Design wird als eine Reihe von „Design for X“ (DfX) Ansätzen gesehen [11], die eine Anpassung an die Kreislaufwirtschaft fördern [11–15]. DfX ist ein Designansatz, bei dem „X“ für ein bestimmtes Ziel steht. Beispiele hierfür sind Fertigung (Design for Manufacturing), Service (Design for Service), Qualität (Design for Quality) oder Cost (Design for Cost). Der Zweck besteht darin, ein bestimmtes Produkt oder technologisches Design zu bewerten. Der Bewertungsprozess umfasst die Festlegung von Prinzipien, die das Design und die Art und Weise, wie es konzipiert und umgesetzt wird, festlegen. Da sich jede DfX-Maßnahme nur auf eine Zielsetzung konzentriert, kann dieser Ansatz nicht für eine Betrachtung des Gesamtkontextes einer LCE als Ganzes verwendet werden. Der Ansatz vieler einzelner und voneinander abhängiger DfX-Methoden steigert die Komplexität kreislauforientierter Entwicklung und den Bedarf an Informationen derart, dass seine Anwendung in frühen Entwicklungsphasen nicht praktikabel ist. Dies würde wiederum zu mehreren voneinander abhängigen und damit hochkomplexen Designentscheidungen führen.

Denn jedes Produkt erfordert eine individuelle Bewertung. Designrichtlinien werden hergeleitet und Näherungswerte festgelegt, um potenzielle Einflüsse auf das Produktdesign zu schätzen. Bei allen erwähnten Ansätzen liegt jedoch die Schwierigkeit darin, dass die Designrichtlinien

lediglich eine Reihe von Kriterien und Empfehlungen bieten, die helfen, bessere Designmöglichkeiten zu identifizieren. Sie sind nicht detailliert genug, um zirkuläre Designentscheidungen bei komplexen Produkten mit zahlreichen Wechselwirkungen zu unterstützen, wo eine Entscheidung mehrfache Nebenwirkungen auf die Zirkularität und Nachhaltigkeit haben kann [16, 17].

Kreislaufwirtschaftsstrategien können als ein Startpunkt für systemisches Denken innerhalb einer Entwicklung, die auf Nachhaltigkeit ausgerichtet ist, betrachtet werden. Während Nachhaltigkeit oder Kreislauffähigkeit zunächst lediglich als Ziele für anzustrebende Merkmale fungieren, liefern Kreislaufstrategien handfeste Handlungsoptionen. Diese ermöglichen es, grundlegende Entscheidungen zur Umsetzung beim Entwicklungsobjekt vorzunehmen und verknüpfen das Zielsystem mit der realen Architektur [9, 18].

Abbildung 2 präsentiert eine Klassifizierung von Kreislaufstrategien [9, 19, 20]. Die Darstellung zeigt, welche Nachhaltigkeitsziele durch einzelne Strategien angesprochen werden (z. B. verlängerte Lebensdauer) und wie diese Ziele generisch umgesetzt werden können (z. B. Produktsanierung). Der Grad der Zirkularität gibt Aufschluss über den Umfang der geschlossenen Kreisläufe, von Energie- und Materialzyklen bis hin zur erneuerten oder intensiveren Verwendung von bereits im Umlauf befindlichen Systemen oder Komponenten. Die Strukturierung der Kreislaufstrategien ist jedoch einem kontinuierlichen Diskurs unterworfen und kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen.

In ähnlicher Weise bieten Potting et al. [9] einen strukturierten Rahmen für **R-Strategien** zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft. Sie unterscheiden zwischen Materialeffizienz (**Rückgewinnung, Recycling**), verlängerten Produktlebenszyklen (**Repurposing, Remanufacturing, Refurbishment, Repair, Reuse**) und smarter Produktentwicklung (**Reduce, Rethink**, Abfallvermeidung). Das Deutsche Institut für Normung [21] führt einen ähnlichen Ansatz ein, der darauf abzielt, Geschäftsprozesse an zirkulären Prinzipien auszurichten. Diese Standards decken verschiedene Bereiche ab, darunter modularer Aufbau, Produktvereinfachung, Reduzierung giftiger Substanzen, digitale Produktpässe und Plattformen für den Informationsaustausch.

Darüber hinaus gibt es mehrere Möglichkeiten, Nachhaltigkeitsaspekte bei der Entwicklung und Anpassung eines Produkts zu messen und nachzuverfolgen [3, 22] Hierbei handelt es sich um die Lebenszyklusbewertung eines Produkts, wobei die ökologischen Effekte über die gesamte Betriebsdauer erfasst werden. In jeder Phase des Lebenszyklus des Produkts, von der Beschaffung der Rohstoffe über die Herstellung und Nutzung bis hin zur Entsorgung, werden der Verbrauch von Ressourcen, Emissionen und Abfall einbezogen. Die **Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA)** ermöglicht die Identifizierung und Bewertung der Umweltauswirkungen von Produkten und zeigt Optimierungspotenziale [6]. Trotzdem kommt dieser Ansatz lediglich zur Bestätigung der Umweltauswirkungen eines Produkts zum Einsatz und wird nicht während der Planungsphase verwendet. Zusätzlich zur Ökobilanz existieren auch die Bewertung der Recyclingfähigkeit, die Stoffstromanalyse, die Ökodesign-Methode, **Cradle to Cradle (C2C)** und die Analyse zur Schonung von Ressourcen [2, 3].

Grad der Zirkularität

Entmaterialisierung und digitale Produktnutzung	C_{11}	Digitalize	De-Zirkulation desselben und gleicher Produkte	Übertragung der Funktionalität physischer Produkte in eine gleichwertige, digitale Dienstleistung
	C_{10}	Dematerialize	De-Zirkulation desselben Produkts	Substitution von Produkten durch ein bestehendes, anderes Produkt mit gleichwertiger Funktionalität
Nachhaltigere Nutzung oder Herstellung des Produkts	C_9	Refuse	De-Zirkulation von Teilen desselben Produkts	Umgestaltung des Produkts durch Aufgabe seiner Funktion oder durch Angebot der gleichen Funktion mit einem radikal anderen Produkt
	C_8	Rethink	De-Zirkulation von gleichen oder andersartigen Produkten	Intensivierung der Produktnutzung (z. B. durch gemeinsame Nutzung von Produkten oder durch die Vermarktung von Multifunktionsprodukten)
	C_7	Reduce	De-Zirkulation von Rohstoffen	Steigerung der Effizienz in allen Lebenszyklusphasen durch geringeren Verbrauch von natürlichen Ressourcen und Materialien
Verlängerte Lebensdauer des ursprünglichen Produkts und seiner Teile	C_6	Re-use	Zirkulation als selbes, unverändertes Produkt	Wiederverwendung eines ausrangierten Produkts, das noch in gutem Zustand ist und seine ursprüngliche Funktion erfüllt, durch einen anderen Verbraucher
	C_5	Repair	Zirkulation als selbes, verändertes Produkt	Reparatur und Wartung defekter Produkte, so dass sie wieder mit ihrer ursprünglichen Funktion verwendet werden können
	C_4	Refurbish	Zirkulation als gleiches, verbessertes Produkt	Ein altes Produkt wiederherstellen und es auf den neuesten Stand bringen
Verlängerte Lebensdauer von Produktkompo-nenten oder anderen Produkten	C_3	Remanufacture	Re-Zirkulation mit gleicher Funktion in andersartigem Produkt	Verwendung von Teilen eines ausrangierten Produkts in einem neuen Produkt mit der gleichen Funktion
	C_2	Repurpose	Re-Zirkulation mit neuer Funktion in andersartigem Produkt	Verwendung ausrangierter Produkte oder ihrer Teile in einem neuen Produkt mit anderer Funktion
Rückgewinnung von Material und/oder Energie	C_1	Recycle	Re-Zirkulation als Rohmaterial	Verarbeitung von Materialien, um die gleiche (hochwertige) oder eine niedrigere (minderwertige) Qualität zu erhalten
	C_0	Recover	Re-Zirkulation als Energie	Verbrennung von Materialien mit Energierückgewinnung
Rückführung des Produktes in die Natur	C_{-1}	Rotting	Re-Zirkulation als organischer Abfall	Kompostieren/Verrotten eines Produktes

Innovation im Geschäftsmodell

Innovationen auf Gesamtproduktebene

Sozio-organisatorische Wandel

Innovation in den Kerntechnologien

Abbildung 2: Übersicht der Kreislaufstrategien (in Anlehnung an [9, 19])

Während diese Ansätze einzelne Aspekte der Thematik „Kreislaufwirtschaft“ adressieren, hat sich in der Entwicklungsmethodik diesbezüglich in den vergangenen Jahren das Systems Engineering zunehmend etabliert. **System Engineering** ist ein interdisziplinärer Ansatz und ein Mittel zur Realisierung erfolgreicher Systeme. Es fokussiert sich darauf, sicherzustellen, dass alle Aspekte eines Projekts oder Systems gut integriert und aufeinander abgestimmt sind [24]. Die generelle Herausforderung beim System Engineering ist die Handhabung und Synchronisation vielfältiger Anforderungen (Kundenanforderungen, technische Anforderungen etc.) um komplexe Systeme effektiv zu entwickeln und zu verwalten. Der Ansatz konzentriert sich auf den gesamten Lebenszyklus eines Systems, von der Konzeptualisierung über die Entwicklung, Implementierung und den Betrieb bis hin zur Stilllegung.

Circular System Engineering ist eine spezifische Ausrichtung des Systems Engineering, die den Schwerpunkt auf Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft legt [25]. Es integriert Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in die Planung, Entwicklung und den Betrieb von Systemen, um sowohl die Effizienz der Ressourcennutzung zu maximieren als auch die Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus eines Systems hinweg zu minimieren.

Es wird besonderer Wert daraufgelegt, dass Produkte und Materialien so gestaltet sind, dass sie am Ende ihrer Lebensdauer leicht demontiert, wiederverwendet, recycelt oder sicher biologisch abgebaut werden können. Ziel des Circular System Engineering ist es, mittels einer Kreislaufwirtschaft geschlossene Kreisläufe für Materialien und Energie zu schaffen und somit zur Reduzierung von Abfall und zur Schonung natürlicher Ressourcen beizutragen.

Literatur

1. European Parliament (2023) Circular economy: definition, importance and benefits. https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits. Accessed 08 Apr 2025
2. Ekins P, Domenech Aparisi T, Drummond P et al. (2020) The Circular Economy: What, Why, How and Where, Paris, France
3. Oliveira CT de, Oliveira GGA (2023) What Circular economy indicators really measure? An overview of circular economy principles and sustainable development goals. Resources, Conservation and Recycling 190:106850. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106850
4. Walker AM, Opferkuch K, Roos Lindgreen E et al. (2022) What Is the Relation between Circular Economy and Sustainability? Answers from Frontrunner Companies Engaged with Circular Economy Practices. Circ Econ Sustain 2:731–758. https://doi.org/10.1007/s43615-021-00064-7
5. Jeswiet J (2014) Life Cycle Engineering. In: Laperrière L, Reinhart G, Chatti S et al. (eds) CIRP encyclopedia of production engineering: With 85 tables. Springer, Berlin, pp 757–758
6. Hauschild MZ (2018) Introduction to LCA Methodology. In: Hauschild MZ, Rosenbaum R, Olsen SI (eds) Life cycle assessment: Theory and practice. Springer, Cham, pp 59–66

7. Wanyama W, Ertas A, Zhang H-C et al. (2003) Life-cycle engineering: Issues, tools and research. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 16:307–316. https://doi.org/10.1080/0951192031000089255
8. Laurent A, Molin C, Owsianiak M et al. (2019) The role of life cycle engineering (LCE) in meeting the sustainable development goals – report from a consultation of LCE experts. Journal of Cleaner Production 230:378–382. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.129
9. Potting J, Hekkert M, Worrell E et al. (2017) Circular Economy: Measuring innovation in the product chain, The Hague
10. Weck OL de (2011) Engineering systems: Meeting human needs in a complex technological world. Engineering systems. MIT Press, Cambridge, Mass.
11. Bovea MD, Pérez-Belis V (2018) Identifying design guidelines to meet the circular economy principles: A case study on electric and electronic equipment. J Environ Manage 228:483–494. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.014
12. Kuo T-C, Chiu M-C, Hsu C-W et al. (2019) Supporting sustainable product service systems: A product selling and leasing design model. Resources, Conservation and Recycling 146:384–394. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.007
13. Moreno M, los Rios C de, Rowe Z et al. (2016) A Conceptual Framework for Circular Design. Sustainability 8:937. https://doi.org/10.3390/su8090937
14. Bhamra TA (2004) Ecodesign: The search for new strategies in product development. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 218:557–569. https://doi.org/10.1177/095440540421800509
15. Favi C, Marconi M, Germani M et al. (2019) A design for disassembly tool oriented to mechatronic product de-manufacturing and recycling. Advanced Engineering Informatics 39:62–79. https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.11.008
16. Ellen Macarthur Foundation (2024) Material Circularity Indicator. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/material-circularity-indicator. Accessed 25 Apr 2024
17. Block L, Werner M, Herrmann F et al. (2020) Umbruch in der Fahrzeugentwicklung - Systemdenken als Schlüsselfaktor. ATZ Elektron 15:40–45. https://doi.org/10.1007/s35658-020-0191-5
18. Ropohl G (1975) Systemtechnik: Grundlagen und Anwendung ; mit 5 Tabellen. Hanser, München
19. Kadner S, Kobus J, Hansen E et al. (2021) Circular Economy Roadmap für Deutschland, München, London
20. Fraunhofer IAO (2022) Lebenszyklusorientierte Entwicklung von Fahrzeug-Komponenten, Stuttgart
21. DIN (2023) Circular Thinking in Standards: Wie Normung eine Circular Economy unterstützen kann. https://www.din.de/resource/blob/952460/817ac05b868cad6959d3358b58127050/flyer-circular-economy-data.pdf. Accessed 25 Aug 2023
22. Moraga G, Huysveld S, Mathieux F et al. (2019) Circular economy indicators: What do they measure? Resources, Conservation and Recycling 146:452–461. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045

3 Circular Systems Engineering und softwarebasierte Entscheidungsunterstützung

Im folgenden Kapitel werden zentrale Aspekte der Kreislauffähigkeit aus der Perspektive des Circular Systems Engineering behandelt. Dabei stehen kreislauforientierte Konstruktions- und Fügeprinzipien im Fokus, die eine effiziente Demontage, Wiederverwendung und Recycling ermöglichen. Zur methodischen Unterstützung der Produktentwicklung wird eine Beschreibungssprache für Lebenszyklen vorgestellt, die eine systematische Analyse und Kommunikation entlang der Wertschöpfungskette unterstützt. Zudem werden Möglichkeiten zur ökobilanziellen Bewertung in der Automobilentwicklung vorgestellt, die Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus analysiert und nachhaltige Entscheidungen fördert. Diese Ergebnisse resultieren im Softwaretool *CycloP*, das die Planung zirkulärer Prozesse erleichtert, Materialflüsse optimiert und die Wiederverwertbarkeit von Komponenten bewertet. Zudem wird die Entwicklung eines zirkulären Produktionssystems vorgestellt. Abschließend werden Ergebnisse zur sprachbasierten Anforderungsdefinition und multikriteriellen Bewertung von frühen Kreislaufanforderungen vorgestellt.

3.1 Bewertung und Umsetzung von Kreislauffähigkeit im kreislaufwirtschaftlichen Engineering

Autoren: Helge Spindler; Thomas Potinecke

Die Fähigkeit eines Produkts, im Rahmen eines geschlossenen Systems wiederverwendet, repariert, aufgearbeitet oder recycelt zu werden - also die Kreislauffähigkeit - stellt die Produktentwicklung vor die Herausforderung, durch eine entsprechende Produktgestaltung die Lebens- und Nutzungsdauer eines Produkts zu verlängern, Abfälle weitgehend zu vermeiden, und den Rohstoffverbrauch zu senken.

„Circular systems engineering is the paradigm of designing, developing, operating, maintaining, and retiring systems through sustainable systems principles that foster value retention over multiple engineering cycles.“ [1]

Dafür muss die Produktgestaltung u. a. die Optionen einer Reparatur, einer Wiederverwendung oder eines Recyclings, sowie die Verwendung von langlebigen, leicht trennbaren oder auch erneuerbaren Materialien einschließen.

Das Ziel der Kreislauffähigkeit führt unter anderem zu einer Komplexität der Produkte und zu mehr Wechselwirkungen von Anforderungen. Auch Wechselwirkungen und Zielkonflikte zwischen kreislaufbezogenen Produktanforderungen und herkömmlichen Anforderungen, wie Stakeholder- und Kundenbedürfnisse oder Aspekte der Produzierbarkeit, erfordern bereits in den frühen Entwicklungsphasen grundlegende Entscheidungen zur Kreislaufstrategie [2, 3].

Unternehmen können unterschiedliche Kreislaufstrategien, sogenannte R-Strategien (siehe Kapitel 2), für ihre Produkte verfolgen, die eine Produktentwicklung mitberücksichtigen muss [4–6]. Insbesondere, wenn sich in der Nutzungsphase eines Produkts mehrere Produktlebenszyklen aufeinanderfolgen, stellt sich somit zum Ende eines jeden Lebenszyklus die Frage, welche Kreislaufstrategie ab diesem Zeitpunkt für ein Produkt oder eine Komponente in Frage kommt, angemessen, machbar und sinnvoll ist, sowie bei der Produktentwicklung zusätzlich zur originären funktionalen Problemlösung zu berücksichtigen ist. Um solche Entscheidungen in der Produktentwicklung schon treffen zu können, wird eine Unterstützung benötigt, um die Kreislauffähigkeit handhabbar und bewertbar zu machen [7, 8]. Ein besonderes Augenmerk muss der Analyse und Bewertung der Nachhaltigkeitsauswirkungen (ökologisch, ökonomisch, sozial) von avisierten Kreislaufstrategien gewidmet werden (siehe Kapitel 3.3) [9, 10].

Die Analyse und Bewertung von potenziell in Frage kommenden Kreislaufstrategien und deren Vorteilhaftigkeit für die Produktgestaltung ist für ein Unternehmen als Orientierungsrahmen und Entscheidungsunterstützung für eine kreislauforientierte System- und Produktentwicklung

(Circular Systems Engineering) notwendig. Ein Lösungsansatz wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

Methodischer Ansatz

Eine Bewertung einer kreislauforientierten Produktentwicklung und ihrer Implikationen bzw. Wechselwirkungen in einem zirkulären Wertschöpfungssystem ist zugunsten einer Komplexitätsreduzierung im Forschungsprojekt nicht als eine singuläre aggregierte Methodik konzipiert. Vielmehr stützt sich die Bewertung einer kreislauforientierten Entwicklung auf modulare, interagierende Kernaspekte, die im Folgenden angeführt sind:

(1) Bewertungssystematik zu Kreislaufstrategien und damit zusammenhängender Kreislauffähigkeit eines Produktkonzepts
(2) Kreislauforientierte Bewertungs- und Entscheidungslogik auf Basis eines Vernetzungsmodells
(3) Ökobilanzierung von Produktdesignvarianten für die jeweils zu betrachtende kreislaufwirtschaftliche End of Life-Strategie (siehe Kapitel 3.3)

3.1.1 Bewertungssystematik für kreislaufwirtschaftliche End of Life-Strategien

Der Ausgangspunkt der Bewertungssystematik zu Kreislaufstrategien als einem Rahmen für eine Produktentwicklung ist das Kreislaufpotenzial der untersuchten Strategien. An diesem muss sich die Kreislauffähigkeit des Produkts orientieren. Die Systematik (siehe Abbildung 3) unterstützt Entscheidungen in der Frage, welche Kreislaufstrategie sich am Ende eines Produktlebenszyklus im Vergleich zu anderen als vorteilhafter erweisen kann. Methodisch betrachtet umfasst die entwickelte Bewertungssystematik eine Anforderungssystematik und kreislauforientierte Bewertungsmetriken.

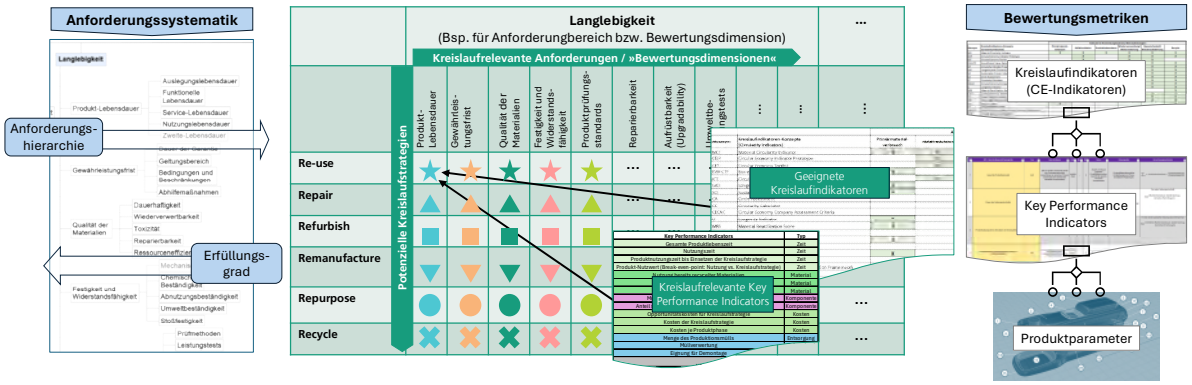


Abbildung 3: Zusammenwirken von Anforderungssystematik und Systematik zu Bewertungsmetriken (eigene Darstellung)

3.1.1.1 Kreislauforientierte Bewertungsmetriken

Das Kreislaufpotenzial kann bspw. durch die Anwendung von kreislaufwirtschaftlichen Indikatoren (Circular Economy Indicators; CE-Indicators) bzw. Indikatorenkonzepten beschrieben werden. Die Begriffe „Kreislaufpotenzial“ und „Kreislauffähigkeit“ sind in der

Literatur aber nicht einheitlich definiert. Deshalb müssen geeignete CE-Indikatoren(-konzepte) fallspezifisch ausgewählt werden, um für ein Unternehmen relevante Aspekte eines Kreislaufpotenzials in Abhängigkeit von der jeweiligen Kreislaufstrategie handhabbar zu machen.

Die Vielfalt unterschiedlichster CE-Indikatoren(-konzepte) in Wissenschaft und industrieller Praxis zeigt sich in einer im Projekt erstellten strukturierten Übersicht zu CE-Indikatoren(-konzepten) (siehe Abbildung 4). Darin sind Indikatorenkonzepte, Bewertungstools oder Bewertungs-Frameworks identifiziert, die sich auf die Unternehmens- bzw. Produktebene anwenden lassen. Die Unterschiedlichkeit existierender CE-Indikatoren(-konzepte) wird in der Übersicht hinsichtlich ihrer Eignung für bestimmte Kreislaufstrategien, der Anwendungsbreite und der Restriktionen durch eine systematische Kategorisierung reflektiert.

		Reduktion d. Verwendung v. Primär-materialien	Reduktion v. Abfällen	Langlebigkeit aufrechterhalten o. steigern	Wiederverwendung (Re-Use) o. Weiterverteilung (Redistribute)	Reparierbarkeit (Repair) o. Wiederaufarbeitung (Remanufacture)	Recycle
MCI	Material Circularity Indicator	x	x	x	x	X	x
CEIP	Circular Economy Indicator Prototype		x		x	X	x
CET	Circular Economy Toolkit		x		x	X	
EVR-CTF	Eco-efficient Value Ratio Circular Transition Framework	x			x	X	x
ICT	Circularity Indicator Project		x		x	X	x
LaCI	Longevity and Circularity Indicators	x			x	X	x
SCI	Sustainable Circular Index	x			x	X	x
CA	Circle Assessment				x	X	x
CC	Circularity Calculator						
CECAC	Circular Economy Company Assessment Criteria						
	Longevity Indicator						

Abbildung 4: Beispiele existierender kreislaufwirtschaftlicher Indikatoren und ihrer Anwendungsfelder (Maceno, Pilz und Oliveira, 2022)

Hierfür wird auf in der Literatur bereits beschriebene Klassifizierungsansätze bzgl. CE-Indikatoren(konzepte) zurückgegriffen (vgl. [11–15] siehe Abbildung 4). Beispielhafte CE-Indikatoren(konzepte) sind der Material Circularity Indicator (MCI) [16], der Product Circularity Indicator (PCI) [17], Product-Level Circularity Metric (PCM) [18] oder der Circularity Potential Indicator (CPI) [19]. Die kategorisierte Übersicht schafft eine Grundlage für die Auswahl fallspezifisch geeigneter CE-Indikatoren(-konzepte), die ein angestrebtes Kreislaufpotenzial bzw. Teilbereiche davon beschreiben sollen.

Allerdings lassen sich auch aus gängigen CE-Indikatoren(-konzepten) nur bedingt die für eine betrachtete Kreislaufstrategie erforderlichen technisch-funktionalen Eigenschaften eines kreislauforientierten Produkts für Designer:innen und Ingenieure:innen ableiten. Dies ist u. a. dem teilweise hohen Aggregationsgrad von CE-Indikatoren(-konzepten) geschuldet. Deshalb dienen sie im Projektkontext eher als Richtschnur zur Einschätzung des Kreislaufpotenzials im Rahmen einer gewählten Kreislaufstrategie und somit als „übergeordnete Zielgröße“ im Entscheidungsprozess der Produktentwicklung.

3.1.1.2 Anforderungssystematik für Kreislaufstrategien

Die übergeordneten Hauptdimensionen der Kreislaufwirtschaft sind Rückführung (Recirculation), Nutzung (Utilization), und Beständigkeit (Endurance) [20] und Unternehmen können dazu ihre kreislaufwirtschaftlichen Ziele definieren. Kreislaufstrategien bieten hierfür Optionen, ein Produktkonzept an diesen kreislaufwirtschaftlichen Zielen und Grundprinzipien auszurichten. Wie bereits in diesem Kapitel aufgezeigt, lassen sich diese Ziele über geeignete CE-Indikatoren beschreiben und messbar machen. Aber um der Produktentwicklung eine klare Orientierung darüber an die Hand zu geben, welche konkreten Produkteigenschaften zu welchem kreislaufwirtschaftlichen Ziel beitragen können, bedarf es eines „Brückenschlags“ zwischen diesen übergeordneten Zielen und den technisch-funktionalen Produkteigenschaften, welche die Produktentwicklung beeinflussen kann.

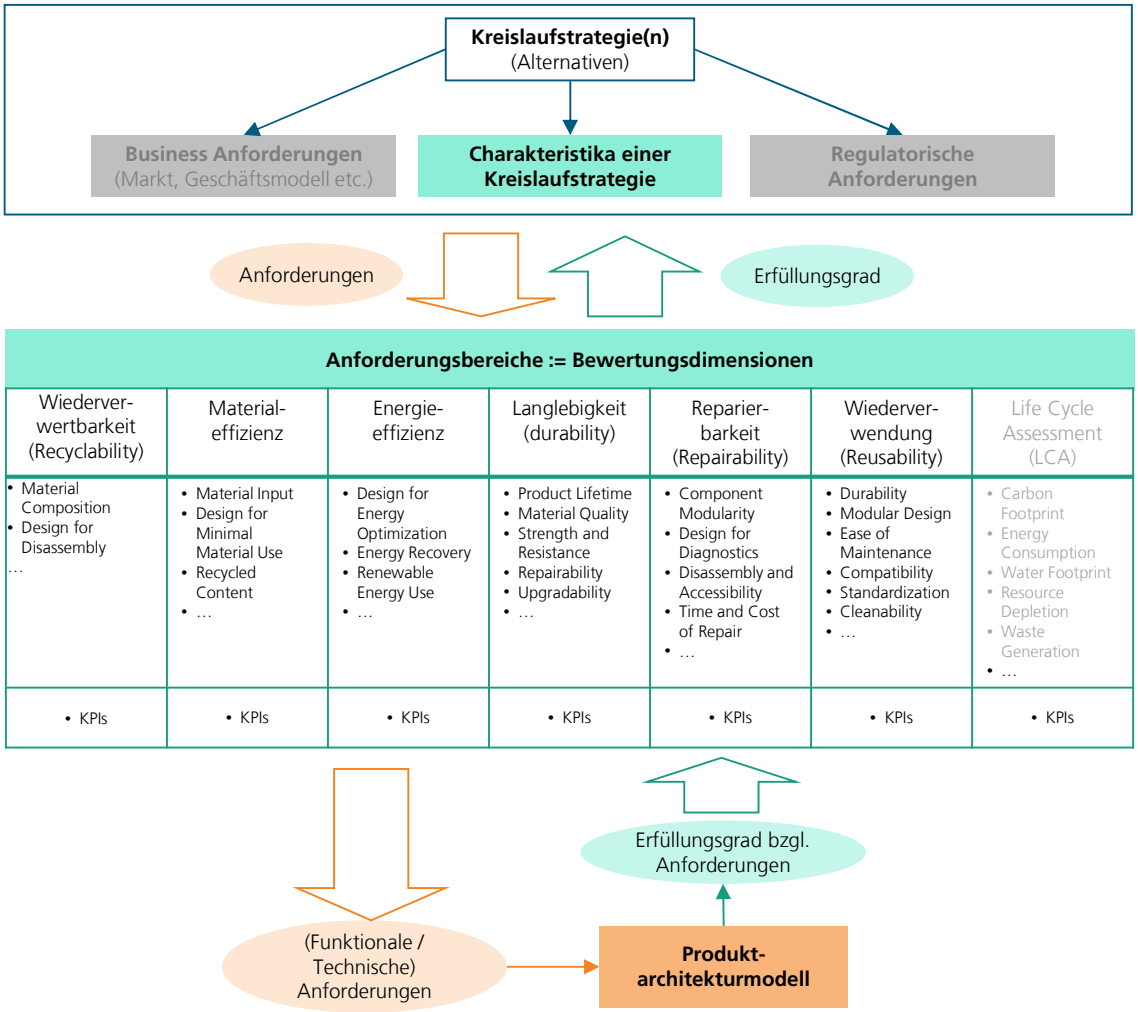


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Anforderungssystematik für Kreislaufstrategien als Grundlage der Bewertungssystematik (eigene Darstellung)

Um die „Lücke“ zwischen kreislaufwirtschaftlichen Zielen und konkreten Eigenschaften eines kreislauforientierten Produkts zu schließen, bilden im Forschungsprojekt die übergeordneten Anforderungsbereiche einer avisierten Kreislaufstrategie den Ausgangspunkt der Anforderungssystematik (siehe Abbildung 5). Diese Anforderungsbereiche umfassen bspw. Wiederverwertbarkeit (recyclability), Materialeffizienz (material efficiency), Langlebigkeit

(durability), Reparierbarkeit (repairability) oder auch Wiederverwendbarkeit (reusability). Diese kreislauforientierten Anforderungsbereiche („obere“ Ebene) werden mittels einer mehrstufigen Systematik („top-down“) in untergeordnete kreislaufrelevante Anforderungen überführt, in untergeordnete Anforderungen heruntergebrochen bis auf eine „untere“ Ebene, auf der kreislauforientierte Anforderungen in konkrete technisch-funktionalen Produkteigenschaften „übersetzt“ werden können. Letztere werden fall- und produktspezifisch definiert.

Die „obere“ Ebene der übergeordneten kreislauforientierten Anforderungen ist damit systematisch verbunden mit der „unteren“ Ebene nachgelagerter Anforderungen. Diese wiederum bilden für die Produktentwicklung die Grundlage für die Zuordnung von technisch-funktionalen Produkteigenschaften, die somit im Gegenzug einen Beitrag zur Erfüllung der korrespondierenden kreislauforientierten Anforderungen leisten.

Nachdem die Anforderungen einer avisierten Kreislaufstrategie in Richtung der Produktebene heruntergebrochen sind („top-down“; siehe Abbildung 5), lässt sich anhand der entwickelten Bewertungssystematik der Erfüllungsgrad der kreislauforientierten Anforderungen durch die entwickelten technisch-funktionalen Produkteigenschaften über die Ebenen der Anforderungssystematik hinweg („bottom-up“) bestimmen.

Zu diesem Zweck werden die in der Anforderungssystematik enthaltenen Anforderungsbereiche einer Kreislaufstrategie zusätzlich auch als „Bewertungsdimensionen“ definiert bzw. interpretiert. Diese Bewertungsdimensionen werden ebenfalls hierarchisch untergliedert und auf jeder Ebene, soweit möglich, mit geeigneten bewertungsrelevanten Indikatoren, Kennzahlen, Metriken oder Key Performance Indicators versehen. Ziel ist dabei, kreislaufrelevante Anforderungen und Anforderungsbereiche quantitativ oder qualitativ handhabbar und bewertbar zu machen, sowie die gewählten kreislaufrelevanten Bewertungsmetriken als nachverfolgbare Zielvorgaben für die Produktgestaltung zu nutzen. Damit entsteht eine Systematik kreislaufrelevanter Anforderungen („top-down“), die mit einer weitgehend kongruenten Systematik an „begleitenden“ Bewertungskriterien bzw. -metriken verknüpft ist (siehe Abbildung 6).

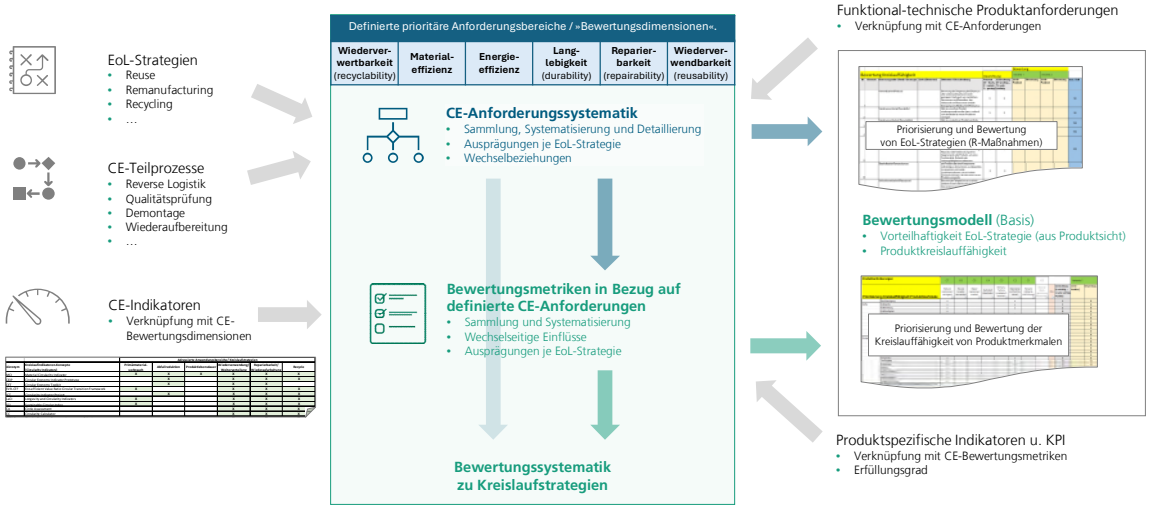


Abbildung 6: Zusammenspiel der Bewertungssystematik zu Kreislaufstrategien und der Bewertung von Produktkonzepten bzgl. Kreislauffähigkeit im Kontext gewählter Kreislaufstrategien (eigene Darstellung)

Durch die Verbindung der zuvor beschriebenen Anforderungssystematik mit kreislaufrelevanten Bewertungsmetriken (siehe Abbildung 6) ist eine durchgängige Struktur zur Bewertung der Eignung bzw. Vorteilhaftigkeit einer spezifischen Kreislaufstrategie für ein entwickeltes zirkuläres Produktkonzept entwickelt worden. Auf Produktebene liefert die Bewertungssystematik auch einen Beitrag für die Produktentwicklung, um die Kreislauffähigkeit eines Produktkonzepts im Kontext einer Kreislaufstrategie bewerten zu können (siehe Abbildung 6).

3.1.2 Vernetzungsmodell einer kreislauforientierten Bewertungs- und Entscheidungslogik

Autor:innen: Nada Ruzicic; Nils Küster; Anja Braun; Thomas Potinecke

Ein Vernetzungsmodell zur systematischen Analyse zirkulärer Wertschöpfungssysteme ist in Form einer Interdependenzmatrix erstellt. Diese Matrix erfasst zentrale Bewertungs- und Optimierungskriterien sowie deren wechselseitige Abhängigkeiten, um die Komplexität und Dynamik kreislauffähiger Systeme im Sinne der Circular Economy analytisch greifbar zu machen. Es sind relevante Einflussfaktoren strukturiert abgebildet und damit können deren Auswirkungen auf die Gestaltung und Steuerung zirkulärer Wertschöpfungssysteme wissenschaftlich fundiert untersucht werden.

Im Zuge einer Weiterentwicklung des Modells sind mehrere funktionale Erweiterungen und strukturierende Elemente integriert, um die Anwendbarkeit der Matrix zu verbessern und deren Analysepotenzial zu erhöhen:

- Einflussfaktoren: Die Matrix enthält eine Auswahl zentraler Einflussgrößen für die Implementierung zirkulärer Prozesse. Diese sind mit spezifischen Indikatoren oder Zustandsgrößen versehen, um eine differenzierte Bewertung und Vergleichbarkeit der Systemelemente zu ermöglichen. Die Interdependenzen zwischen den Faktoren machen strukturelle Spannungsfelder und Synergien sichtbar.
- Lösungsentwicklung: Zur gezielten Berücksichtigung von Unsicherheiten und Entscheidungskonflikten sind „Entweder-oder“-Optionen modelliert. Diese ermöglichen eine szenarienbasierte Bewertung alternativer Handlungsstrategien und dienen als Grundlage für robuste Entscheidungsprozesse (siehe Abbildung 7).
- Integration von Summenfunktionen: Um die Ausprägung der Abhängigkeiten quantifizierbar zu machen, sind Funktionen zur Berechnung von Minimal-, Maximal- und Durchschnittswerten implementiert. Dadurch lassen sich Einflussbereiche identifizieren und priorisieren.
- Visualisierung: Zur intuitiven Interpretation der Interdependenzen ist ein farbcodierter Wertebereich eingeführt. Die Intensität der Wechselwirkungen wird dabei mittels eines Farbverlaufs von Rot (geringe Relevanz) bis Grün (hohe

Relevanz) visualisiert, was die Lesbarkeit und analytische Aussagekraft der Matrix erheblich verbessert.

Kategorie	Sub-kategorie	von links nach oben lesen grün = positiv, blau = neutral , rot = negativ	Anteil aufbereiteter Material	Erläuterungen und Beispiele	Minimierung Emissionen Aufbereitung	Erläuterungen und Beispiele	Minimierung Aufbereitungskosten	Erläuterungen und Beispiele	Positive Einflüsse [e]	Negative Einflüsse [n]	Positive- oder negative Einflüsse [#]	Summe mit positiven #	Summe mit negativen #	Durchschnitt Hauptwert
Design	materialspezifische Eigenschaften	Minimierung Emissionen der Materialien	%	Regierung	e	Materialie	0	Hat keiner	9	1	0	8	8	8
		Minimierung Toxizität	%	Weniger t	e	Toxische N	0	Hat keiner	13	0	0	13	13	13
		Nachwachsender Rohstoff	n	Nachwach	e	Die Herste	%	Nachwach	8	1	5	12	2	7
		Abnutzungseigenschaften des Materials	%	Materialie	%	Materialie	%	Materialie	6	1	7	12	-2	5
		R-fördernde Aufbereitungseigenschaften	e	R-fördern	e	R-fördern	e	R-fördern	12	0	4	16	8	12
	Designspezische Weiterverwertung und Reperaturfähigkeit	Modularität des Produkts	0	Hat keiner	e	Durch die	e	Durch den	22	0	1	23	21	22
		Abnutzungseigenschaften des Produkts (Anzahl Verschleißteile, Designspezifischer Verschleiß,...)	e	Produkte	e	Produkte	e	Produkte	5	2	12	15	-9	3
		Verbindungstechnik (R-freundlich)	e	Durch die	e	Verbindun	e	Verschrau	21	0	0	21	21	21
		Wiederverwertbarkeit Bauteile	0	Hat keiner	e	Bauteile, d	e	Anstatt ne	16	0	0	16	16	16
		Reperaturfähigkeit	0	Hat keiner	e	Reparatur	e	Durch die	15	0	0	15	15	15

Legende:

- e: Wirkt verstärkend, erhöhend.
- 0: Neutral – kein Einfluss, kein Zusammenhang.
- %: Kann Einfluss haben oder nicht (fallspezifisch); ob es einen Einfluss hat hängt von den Prozessen, dem Produkt und den Rahmenbedingungen ab.
- #: Kann verstärkend oder reduzierend wirken (system-/prozessabhängig); Faktor 1 wirkt auf Faktor 2. Ob Faktor 1 Faktor 2 verstärkt oder vermindert bzw. der Einfluss positiv oder negativ ist, hängt jedoch von den Rahmenbedingungen, Prozessen, Materialien etc. ab.
- &: Wirkt indirekt (über andere Faktoren / Aspekte); Option wurde entfernt und fallbezogen durch die Optionen 0, % oder e ersetzt.

Abbildung 7: Vernetzungsmodell zur systematischen Analyse zirkulärer Wertschöpfungssysteme in Form einer Interdependenzmatrix (eigene Darstellung)

Die erweiterte Interdependenzmatrix stellt ein leistungsfähiges Analysewerkzeug dar, das sowohl eine fallspezifische Priorisierung von Einflussfaktoren und Maßnahmen als auch eine unterstützende Entscheidungsfindung in komplexen zirkulären Systemen ermöglicht. Sie leistet somit einen substanziellen Beitrag zur wissenschaftlichen Fundierung und praktischen Operationalisierung der Circular Economy.

Die im Rahmen der Interdependenzanalyse gewonnenen Ergebnisse sind mit Fachexpert:innen aus den Bereichen Nachhaltigkeit und Produktion kritisch reflektiert und zu einer verbesserten Übersicht weiterentwickelt. Das Betrachtungsniveau der Einflussfaktoren ist systematisch definiert und bestätigt. Somit ist eine konsistente Anwendung innerhalb der Interdependenzmatrix sichergestellt. Darüber hinaus ist eine Erweiterung der Faktorenübersicht durch die Zuordnung geeigneter Indikatoren und Zustandsmerkmale in die Interdependenzmatrix integriert. Dies gewährleistet eine verbesserte Bewertbarkeit einzelner Einflussgrößen.

In einem iterativen Verfahren sind die weitere Konkretisierung und Ergänzung der bestehende Einflussfaktoren durch zusätzliche Indikatoren und zugehörige Metriken erfolgt. Diese

Erweiterungen dienen der verbesserten analytischen Fundierung der Matrix und ihrer anschlussfähigen Anwendung in angrenzenden Themenfeldern. Zudem erfolgte eine Analyse potenzieller Schnittstellen zu anderen Themenbereichen des Projektvorhabens. Diese sind ebenfalls in den Anhängen zur Interdependenzmatrix dokumentiert.

Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise und Anwendungslogik der Interdependenzmatrix kann der Publikation von [21] entnommen werden.

Literatur

1. David I, Bork D, Kappel G (2023) Circular Systems Engineering
2. Hollander MC den, Bakker CA, Hultink EJ (2017) Product Design in a Circular Economy: Development of a Typology of Key Concepts and Terms. Journal of Industrial Ecology 21:517–525. https://doi.org/10.1111/jiec.12610
3. Mestre A, Cooper T (2017) Circular Product Design. A Multiple Loops Life Cycle Design Approach for the Circular Economy. The Design Journal 20:1620 - 1635. https://doi.org/10.1080/14606925.2017.1352686
4. Diaz A, Reyes T, Baumgartner RJ (2022) Implementing circular economy strategies during product development. Resources, Conservation and Recycling 184:106344. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106344
5. Ünal E, Shao J (2019) A taxonomy of circular economy implementation strategies for manufacturing firms: Analysis of 391 cradle-to-cradle products. Journal of Cleaner Production 212:754–765. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.291
6. Blomsma F, Pieroni M, Kravchenko M et al. (2019) Developing a circular strategies framework for manufacturing companies to support circular economy-oriented innovation. Journal of Cleaner Production 241:118271. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118271
7. Alamerew YA, Brissaud D (2019) Circular economy assessment tool for end of life product recovery strategies. Jnl Remanufactur 9:169–185. https://doi.org/10.1007/s13243-018-0064-8
8. Asif FM, Roci M, Lieder M et al. (2021) A methodological approach to design products for multiple lifecycles in the context of circular manufacturing systems. Journal of Cleaner Production 296:126534. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126534
9. Morales ME, Batlles-delaFuente A, Cortés-García FJ et al. (2021) Theoretical Research on Circular Economy and Sustainability Trade-Offs and Synergies. Sustainability 13:11636. https://doi.org/10.3390/su132111636
10. Hapuwatte BM, Seevers KD, Jawahir IS (2022) Metrics-based dynamic product sustainability performance evaluation for advancing the circular economy. Journal of Manufacturing Systems 64:275–287. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.013
11. Maceno MMC, Pilz TL, Oliveira DR (2022) Life Cycle Assessment and Circular Economy: A Case Study of a Photovoltaic Solar Panel in Brazil. JEAM 10:99–111. https://doi.org/10.5890/JEAM.2022.03.008

12. Oliveira CT de, Dantas TET, Soares SR (2021) Nano and micro level circular economy indicators: Assisting decision-makers in circularity assessments. Sustainable Production and Consumption 26:455–468. https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.11.024
13. Alamerew YA (2020) Circular Economy and Reverse Logistics : An End-of-life Resource Recovery Decision-making Assistant. Dissertation, Université Grenoble Alpes
14. Roos Lindgreen E, Mondello G, Salomone R et al. (2021) Exploring the effectiveness of grey literature indicators and life cycle assessment in assessing circular economy at the micro level: a comparative analysis. Int J Life Cycle Assess 26:2171–2191. https://doi.org/10.1007/s11367-021-01972-4
15. Saidani M, Yannou B, Leroy Y et al. (2019) A taxonomy of circular economy indicators. Journal of Cleaner Production 207:542–559. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014
16. Ellen Macarthur Foundation, ANSYS Granta (2019) Circularity Indicators - An Approach to Measuring Circularity: Methodology
17. Bracquené E, Dewulf W, Duflou JR (2020) Measuring the performance of more circular complex product supply chains. Resources, Conservation and Recycling 154:104608. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104608
18. Linder M, Sarasini S, van Loon P (2017) A Metric for Quantifying Product-Level Circularity. Journal of Industrial Ecology 21:545–558. https://doi.org/10.1111/jiec.12552
19. Saidani M, Yannou B, Leroy Y et al. (2017) Hybrid top-down and bottom-up framework to measure products' circularity performance. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED, vol 1, pp 81–90
20. Boyer RHW, Mellquist A-C, Williander M et al. (2021) Three-dimensional product circularity. Journal of Industrial Ecology 25:824–833. https://doi.org/10.1111/jiec.13109
21. Ruzicic N, Braun A, Ohlhausen P (2024) Interdependency Matrix to Evaluate Influence Factors in Circular Value Creation Systems. In: Human Aspects of Advanced Manufacturing, Production Management and Process Control. AHFE International

3.2 Beschreibungssprache für kreislauforientierte Lebenszyklen

Autor:in: Marie Schwahn, Lukas Block

Die Entwicklung kreislaufwirtschaftlicher, sowie ökologisch und ökonomisch nachhaltiger Produkte stellt Produktentwickler:innen vor große Herausforderungen:

(1) Sie müssen den zu erwartenden Lebenszyklus des Produkts betrachten und in Gestaltungsentscheidungen mitberücksichtigen.
(2) Sie müssen grundlegende Entscheidungen in den frühen Phasen der Entwicklung treffen, da dort noch zahlreiche Freiheitsgrade bestehen (vgl. Kapitel 1.1).

Bislang können diese Herausforderungen aufgrund ihrer hohen systemischen Komplexität in frühen Phasen jedoch nur bedingt weitreichend und objektiv gelöst werden, da Produktentwickler:innen dafür die diversen Wechselwirkungen zwischen der technischen Produktgestalt und dem Lebenszyklus berücksichtigen müssen. Ist beispielsweise die Nutzung eines nachhaltigeren Materials mit einer kürzeren zu erwartenden Lebensdauer zweckdienlich, oder sollte eine Produktstruktur derart gestaltet werden, dass sie vor allem gut zu reparieren ist? Die Herausforderung liegt somit einerseits darin, einzelne kritische Komponenten des Produkts, kritische Phasen des Lebenszyklus und passende R-Strategien - also konkrete Maßnahme zur Behebung eines unerwünschten Produktzustands - wie zum Beispiel einer Reparatur oder einer Wiederverwendung (im Folgenden auch Kreislaufmaßnahmen genannt) zu identifizieren, um die ökologische Nachhaltigkeit zu maximieren und die wirtschaftliche Umsetzbarkeit sicherzustellen. Um dies effizient zu tun, müssen die Auswirkungen von Entwicklungsentscheidungen auf die Kreislauffähigkeit des Produktes im Lebenszyklus bereits in der Entwicklung objektiv messbar gemacht und aufgezeigt werden. Zum anderen müssen Produktentwickler:innen noch mit hohen Unsicherheiten umgehen, da in den frühen Entwicklungsphasen noch nicht genau vorhergesagt werden kann, wie der Lebenszyklus der einzelnen Produktinstanzen des Produkts zum Beispiel im Hinblick auf die Nutzung aussehen wird. Eine Gestaltungsanpassung des Produkts wirkt sich auf jede Produktinstanz und deren individuellen Lebenszyklus aus. Um diese Herausforderungen zu überwinden, bedarf es eines Konzepts zur Unterstützung der Entwicklungstätigkeiten, durch das bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung der Lebenszyklus sowie die Kreislauffähigkeit eines Produkts analysiert und optimiert werden können.

Für ein derartiges Konzept gilt es vornehmlich, die systemische Komplexität zu reduzieren, damit Produktentwickler:innen die diversen Wechselwirkungen zwischen der technischen Produktgestalt und dem Lebenszyklus nachvollziehbar berücksichtigen können. Eine Beschreibungssprache ermöglicht genau dies, indem sie es erlaubt, Lebenszyklen und Abhängigkeitsbeziehungen visuell zu modellieren. Sie schafft eine strukturierte, formalisierte

und analysierbare Darstellung des komplexen Systems aus Produkt, Lebenszyklus und ihren Wechselwirkungen. Aus diesem Grund wurde im Projekt eine Beschreibungssprache für die kreislauforientierte Produktentwicklung entwickelt. Sie muss die strukturierte Betrachtung und Modellierung aller notwendigen Informationen zum Produkt und zum Lebenszyklus ermöglichen. Die Beschreibungssprache besteht somit aus zwei relevanten Teilen:

(3) Einem Metamodell zur Beschreibung der technischen Produktgestalt
(4) Einem Metamodell zur Modellierung des erwarteten Lebenszyklus inklusive Kreislaufmaßnahmen

Ein Metamodell definiert die Struktur, die Regeln und die Semantik einer Beschreibungssprache zur Modellierung von Systemen wiederum als Modell. Während ein Modell ein konkretes System beschreibt, definiert also ein Metamodell im Allgemeinen, wie ein solches Modell auf Basis einer Beschreibungssprache aufgebaut ist. Ein Metamodell kann somit als Art Grammatik der Beschreibungssprache verstanden werden [1, 2].

3.2.1 Modellierung technischer Produktgestalten

Für die Modellierung technischer Produktgestalten existieren in der Praxis und Literatur bereits zahlreiche Beschreibungssprachen und Metamodelle (vgl. [3–7]). Ein Produkt wird hierbei typischerweise als hierarchische Struktur einzelner Komponenten abgebildet (vgl. Abbildung 8).

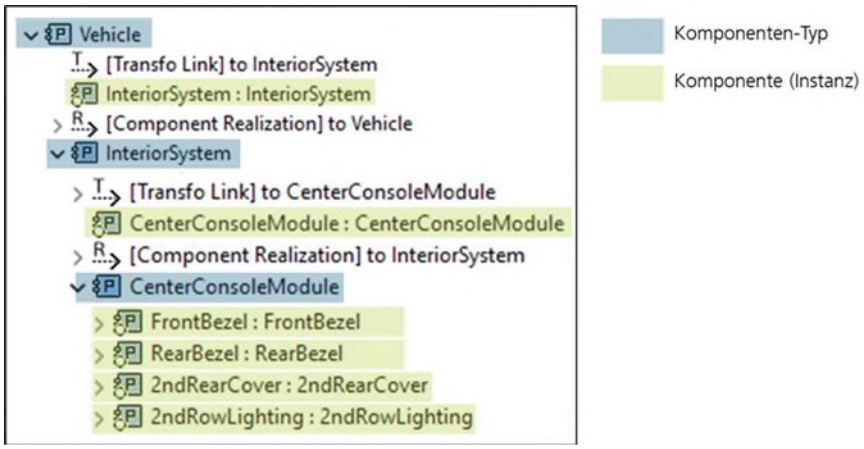


Abbildung 8: Produktstrukturbaum mit hierarchischer Anordnung der Komponenten (Instanzen) und Komponententypen (Capella Diagramm - eigene Darstellung)

Komponenten – in der Modellierungssprache auch *Part* genannt - haben dabei üblicherweise einen Typ – zum Beispiel „Schraube“, „Kabel“ oder „Autotür“. Die modellierte technische Produktgestalt - in der Modellierungssprache als *Physical Product Architecture* benannt - setzt sich aus Instanzen (*Parts*) dieser Komponententypen zusammen. Zum Beispiel kann ein Auto vier Instanzen vom Typ „Autotür“ beinhalten. Für die Umsetzung des geplanten Konzepts müssen diese hierarchischen Strukturen (je nach Ausprägung), um die Möglichkeit erweitert werden, Materialien abzubilden. So sollte für einen Komponententyp eine Liste an Materialien angegeben werden können, aus denen er besteht. Diese Materialien wiederum werden für die

hier erarbeitete Beschreibungssprache über die folgenden Attribute spezifiziert: Materialtyp, Materialklasse, Maßeinheit (z. B. bzgl. Masse oder Volumen) und zugehöriger Wert, Verarbeitungsprozess und Herkunftsort. Die Materialdaten bieten die Basis für eine Ökobilanzierung des Produktes und sind gemeinsam mit der Produktstruktur entscheidend für den Lebenszyklus des Produktes und die Anwendung von Kreislaufmaßnahmen.

3.2.2 Modellierung von Lebenszyklen

Für die Modellierung der Lebenszyklen definiert die Beschreibungssprache ein eigenes Metamodell. Dies erfolgt einerseits, weil es hierfür bislang keine passende Beschreibungssprache gibt. Andererseits ermöglicht ein von der Produktstruktur separiertes Metamodell, die Erweiterung bereits existierender Metamodelle von Produkthierarchien und damit eine leichtere Integration in bestehende Produktentwicklungsprozesse und Softwarewerkzeuge.

Ziel dieses Metamodells ist es, dass Lebenszyklen so modelliert und abgebildet werden können, dass die Analyse von Lebenszyklen und Implikationen von Gestaltungsanpassungen auf die Kreislauffähigkeit und ökonomische Nachhaltigkeit des Produktes bereits in der frühen Entwicklung für den gesamten erwarteten Lebenszyklus ermöglicht wird. Dies wird grundlegend durch eine zustandsbasierte Modellierung umgesetzt. Während der Entwicklung ist der tatsächliche Lebenszyklus jeder einzelnen Produktinstanz jedoch noch unbekannt. Dies kann durch eine probabilistische Modellierung des Lebenszyklus aufgelöst werden, indem die Wahrscheinlichkeit die erwartete Häufigkeit angibt, mit der die später produzierten Produktinstanzen diesem Lebenszykluspfad folgen.

Als Ausgangsbasis für das hier entwickelte Metamodell probabilistischer Lebenszyklen wird die Lebenszyklusbeschreibung nach Block et al. [8] verwendet. Ein Lebenszyklus wird als eine wahrscheinlichkeitsbedingte Abfolge von Zuständen – welche im Modell als *State* benannt sind - des Produkts verstanden (vgl. Abbildung 9). So können zum Beispiel Produktionsschritte aber auch spätere Nutzungszustände modelliert werden. Zustände können auch wiederkehrend („im Kreis“) durchlaufen werden, bis das Produkt das Ende des Lebenszyklus erreicht. Dieses grundlegende Modell wird nun in zwei Dimensionen erweitert: einerseits derart, dass es mit der technischen Produktgestalt (*Physical Product Architecture*) und dessen Hierarchie verknüpft werden kann, und andererseits derart, dass Kreislaufmaßnahmen – welche im Modell als sogenannte *C-Measures* (circularity measures) modelliert werden - darin beschrieben werden können.

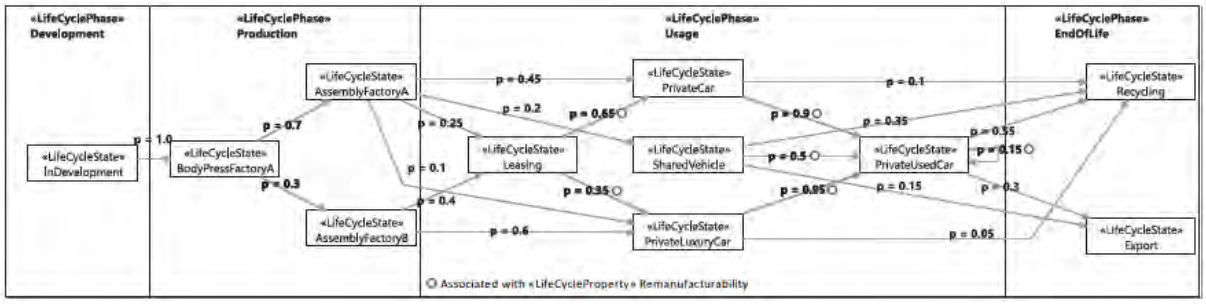


Abbildung 9: Lebensyzklusmodell nach Block et al. mit Zuständen und Übergängen [8]

Bezüglich der Verknüpfung mit der technischen Produktgestalt (*Physical Product Architecture*) und ihrer Hierarchie werden die Zustände (*States*) derart erweitert, dass jeder Zustand nun über einen Kontext verfügt. Der Kontext definiert, welche Komponenten (*Parts*) diesen Zustand im Lebenszyklus durchlaufen. Dies ermöglicht die Modellierung individueller Pfade für jede Komponente des Produkts, losgelöst vom Gesamtprodukt. Die Produktion einer Subkomponente, wie zum Beispiel einem Becherhalter in der automobilen Mittelkonsole, ist zum Beispiel ein Zustand, der nur für die entsprechende Subkomponente (den Becherhalter), nicht aber für das Gesamtprodukt „Mittelkonsole“ relevant ist. Zustände haben zudem eine Dauer, die definiert, wie lange ein Zustand im Lebenszyklus durchschnittlich anhält. Übergänge (Modellelement: *transition*) zwischen den Zuständen bilden ab, in welcher Reihenfolge die Zustände aufeinander folgen. Die Übergänge sind mit Wahrscheinlichkeiten versehen, um verschiedene mögliche Pfade gemäß ihrer erwarteten Eintrittswahrscheinlichkeit modellieren zu können. So kann aufgezeigt werden, welche Möglichkeiten für unterschiedliche Lebenszyklen existieren.

3.2.3 Zustandsklassen im Lebenszyklus

Im Metamodell werden unterschiedliche Klassen an Zuständen – das heißt unterschiedliche Typen von *States* - definiert, die semantisch unterschiedliche Bedeutungen haben. Reguläre Zustände (Modellelement: *RegularState*) bilden Zustände ab, in denen das Produkt wie erwartet genutzt oder anderweitig behandelt werden kann. Eine weitere Klasse an Zuständen sind die unerwünschten Zustände (Modellelement: *UndesiredState*). Diese bilden Situationen ab, in denen das Produkt oder einzelne Komponenten nicht wie geplant verwendet werden können oder sollen. Hierbei kann es sich um Defektzustände handeln, aber auch um technische Unzulänglichkeiten oder einen ökonomisch nicht weiter tragfähigen Zustand. Diese Zustände führen in der linearen Wirtschaftsform zu einer Entwertung des Produktes oder der beteiligten Komponenten und damit zum Ende des Lebenszyklus. In der Kreislaufwirtschaft sind genau diese Zustände Ansatzpunkt für die Implementierung von Kreislaufmaßnahmen wie zum Beispiel einer Reparatur oder einer Wiederverwendung der Komponente in einem anderen Produkt. Der Lebenszyklus kann somit verlängert werden, das Produkt und damit Ressourcen werden weiterverwendet und nominell eingespart (vgl. Abbildung 10). Diese Anwendung von Kreislaufmaßnahmen kann ebenfalls in einer dafür definierten Klasse von Zuständen abgebildet werden – den *CStates*. Zustände dieser Klasse verweisen auf eine konkrete Kreislaufmaßnahme, die auf die Komponenten des Zustandes angewandt wird – ein *CMeasure*. Eine Kreislaufmaßnahme wie z. B. Reparatur, Remanufacturing oder Recycling, ist eine konkrete Maßnahme zur Behebung eines unerwünschten Produktzustands. Sie ermöglicht zirkuläre Wertschöpfung. Die Definition der Kreislaufmaßnahmen im Metamodell als *CMeasures* basieren auf den R-Strategien von Potting et al. [9] und ermöglichen es, diese Strategien in das Modell des Lebenszyklus zu integrieren, dementsprechend abzubilden und deren Auswirkungen zu analysieren. Die in der Beschreibungssprache definierten Kreislaufmaßnahmen umfassen Recycling, Reuse, Remanufacturing, Remanufacture, Repair und Reuse.

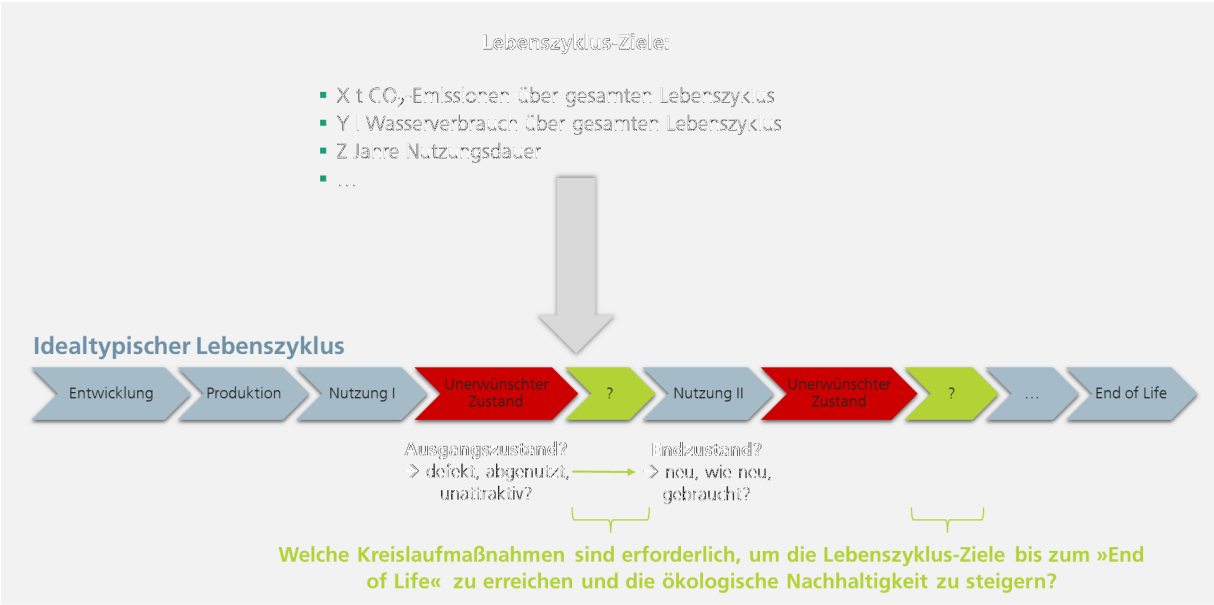
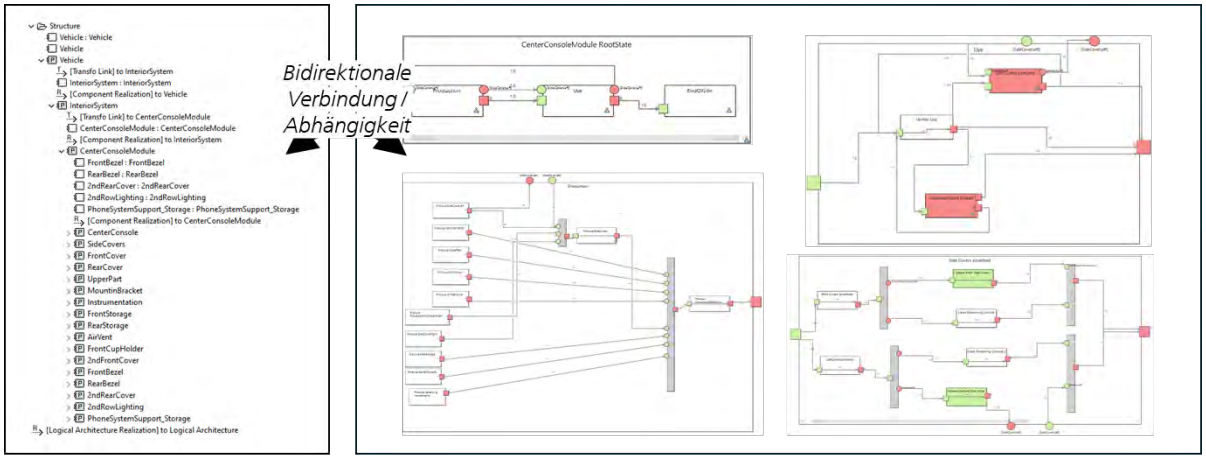


Abbildung 10: Übersicht der unterschiedlichen Zustände – regulärer Zustand (blau), unerwünschter Zustand (rot) und Zustand in der Kreislaufmaßnahme angewandt wird (grün) - und deren Bedeutung im Kontext des Lebenszyklus und der Optimierung der ökologischen Nachhaltigkeit des Produktes (eigene Abbildung)

3.2.4 Konsistente Modellierung probabilistischer Lebenszyklen

Bei der Modellierung von probabilistischen Lebenszyklen ist es entscheidend, dass die individuellen Lebenszyklen aller Komponenten (*Parts*) konsistent zueinander sind. So muss der Lebenszyklus einer Subkomponente, zur übergeordneten Baugruppe sowie diese wiederum zum Produkt und vice versa passen. Ziel ist es, einen realistischen Lebenszyklus für das Gesamtprodukt zu modellieren. Änderungen an der technischen Produktgestalt (*Physical Product Architecture*) wirken sich dementsprechend auch auf den Lebenszyklus, die Kreislauffähigkeit und die Nachhaltigkeit aus, während sich Anpassungen im Lebenszyklus, wie die Integration einer Kreislaufmaßnahme in Form von konkreten Anforderungen an einzelne Komponenten, auf die technische Produktgestalt widerspiegeln (vgl. Abbildung 11). Zur Abbildung der Abhängigkeiten zwischen Produktgestalt, Hierarchieebenen und Lebenszyklus werden den Zuständen im Lebenszyklus stets relevante Komponenten mittels des Kontexts eines *States* zugeordnet. Dadurch lassen sich für jede Komponente individuelle Lebenszyklen modellieren und verifizieren, sodass valide Prozesspfade entstehen und auch Subkomponenten oder Baugruppen konsistent berücksichtigt werden. Zudem ermöglicht die Zuweisung, zustandsabhängige Anforderungen – etwa Materialanforderungen für Recycling – direkt an die entsprechenden Komponenten weiterzugeben, während Änderungen an der Produktgestalt unmittelbar in den Lebenszyklus integriert werden. Voraussetzung ist stets, dass ein Zustand für die referenzierten Komponenten realisierbar ist, beispielsweise eine Reparatur nur dann, wenn die Komponenten gemäß Produktstruktur zugänglich sind.



Produktstrukturbaum – Modell des Produktes

Lebenszyklusmodell – inclusive unerwünschten Zuständen(rot) und Kreislaufmaßnahmen(grün)

Abbildung 11: Bidirektionale Verbindung und Abhängigkeiten zwischen dem Produktstrukturbaum und dem Lebenszyklusmodell (eigene Darstellung mit Capella Diagrammen)

3.2.5 Ertüchtigung zur Ökobilanzierung

Für die Analyse und Optimierung des Produkts und zugehörigen Lebenszyklus muss die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit und der Kreislauffähigkeit möglich sein. Dementsprechend muss die Beschreibungssprache ein Schema zur Abbildung aller notwendigen Informationen für eine Ökobilanzierung bereitstellen. Hierfür wird das Metamodell um das Konzept der „Aufwendungen“ erweitert: Eine Aufwendung kann in jedem Zustand des Lebenszyklus hinzugefügt werden und definiert Material, das in diesem Zustand verbraucht wird oder Energie, die dort aufgewandt werden muss. Diese Aufwendungen können initiale Materialaufwendungen in der Produktion sein, aber auch zusätzliche physische Materialaufwände für eine Reparatur oder Energieaufwendungen für einen Demontageprozess. Zusätzliche Aufwände fallen dabei vor allem bei der Anwendung einer Kreislaufmaßnahme an. Hier sind die Modellierung und Berücksichtigung dieser Aufwände essenziell, um eine weitreichende und objektive Bewertung der Auswirkungen der Kreislaufmaßnahmen auf die Nachhaltigkeit des Produktes zu ermöglichen. Zusätzliche Energie- oder Material-aufwendungen können den meist erwarteten positiven Effekt einer Kreislaufmaßnahme auf die ökologische Nachhaltigkeit schmälern, gegebenenfalls neutralisieren oder ins Gegenteil verkehren. Eine Reparatur kann zum Beispiel die Lebensdauer einer Komponente und des gesamten Produktes verlängern. Wenn diesem Vorteil jedoch sehr hohe Energieaufwände oder Materialaufwände entgegenstehen, kann die Gesamtbilanz im Sinne der Nachhaltigkeit trotzdem neutral oder sogar negativ ausfallen. Um konkret analysieren zu können, welche Komponenten und welche Zustände einen besonders guten oder schlechten Einfluss auf die Kreislauffähigkeit, Lebensdauer und ökologische Nachhaltigkeit des Produktes haben und wo sich Potenziale zur Optimierung befinden, müssen Ergebnisse der ökobilanziellen Bewertung gezielt zurückgespielt werden können. Die identifizierten Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit müssen Elemente des Modells sein und den dort vorhandenen Zuständen und Komponenten direkt zugewiesen werden. Hierfür umfasst die Beschreibungssprache das Konzept der

„Umweltauswirkungen“. Eine Umweltauswirkung ist der Effekt, den ein spezifisches Element des Modells (Zustand des Lebenszyklus und/oder Komponente der Produktgestalt) durch die modellierten Aufwendungen auf eine der Metriken zur Nachhaltigkeitsbewertung des Produktes hat. Dieser Effekt wird aufgrund der probabilistischen Natur des Modells nicht als diskreter Wert, sondern als Wahrscheinlichkeitsverteilung modelliert. Ein Beispiel für eine Umweltauswirkung ist die Verteilung der erwarteten Treibhausgasemissionen (in CO_2-Äquivalenten), die einer bestimmten Komponente oder einem bestimmten Lebenszyklus-zustand zugeordnet sind. Es könnte also zum Beispiel für eine Armlehne in einer Mittelkonsole bestimmt werden, welche erwarteten Treibhausgasemissionen (in CO_2-Äquivalenten) diese statistisch über den gesamten Lebenszyklus hinweg als einzelne Komponente verursacht. Ein anderes Beispiel wäre, welcher Anteil davon wahrscheinlich auf die initiale Produktion zurückzuführen ist oder welcher Anteil bei deren Reparatur entsteht.

3.2.6 Resultat und Implementierung der Beschreibungssprache

Die Beschreibungssprache ermöglicht es somit nicht nur, erwartete Lebenszyklen umfassend und intuitiv zu modellieren, sondern erlaubt auch, alle nötigen Aspekte für die Bewertung der Kreislauffähigkeit und ökologischen Nachhaltigkeit abzubilden. Es können somit zielgerichtete und nachvollziehbare Entscheidungen durch die Produktentwickler:innen identifiziert und getroffen werden, um die Kreislauffähigkeit und Nachhaltigkeit des Produktes zu steigern.

Die Beschreibungssprache wurde als Metamodell auf Basis der Meta Object Facility (MOF) entwickelt [10]. In Kapitel 3.4 wird die Umsetzung und Implementierung der Beschreibungs-sprache in das Softwarewerkzeug *CycloP* auf Grundlage des Eclipse Modeling Framework (EMF) [11] beschrieben. In *CycloP* wird ein Workflow zur Anwendung der Beschreibungs-sprache bereitgestellt, automatische Konsistenzüberprüfung unter Berücksichtigung aller Wechselwirkungen ermöglicht und somit die Integration der Beschreibungssprache in etablierte Produktentwicklungsprozesse realisiert.

Literatur

1. Object Management Group (2019) OMG Meta Object Facility (MOF) Core Specification(OMG Document formal/2019-10-01). https://www.omg.org/spec/MOF/2.5.1. Accessed 18 Aug 2021
2. Institut für Informatik (2025) Metamodellierung. https://www.informatik.hu-berlin.de/de/forschung/gebiete/sam/Forschung%20und%20Projekte/aktuelle-forschung-und-projekte/metamodellierung-1?utm_source=chatgpt.com. Accessed 25 Aug 2025
3. Ehrlenspiel K, Meerkamm H (2017) Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Hanser, Müchen, Wien
4. Haberfellner R, Weck OL de, Fricke E et al. (2019) Systems Engineering: Fundamentals and Applications. Springer eBook Collection. Birkhäuser, Cham

5. Obeo (2024) Ecodesign for Capella. https://www.obeosoft.com/en/products/ecodesign-for-capella. Accessed 12 Sep 2024
6. Albers A (2023) Gestaltung technischer Systeme/Produktgestaltung. In: Sauer B (ed) Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen, 10. Auflage. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, pp 163–205
7. Mattmann I (2017) Modellintegrierte Produkt- und Prozessentwicklung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden
8. Block L, Werner M, Spindler H et al. (2023) A Variability Model for Individual Life Cycle Paths in Life Cycle Engineering. Future Automotive Production Conference 2022:73–85. https://doi.org/10.1007/978-3-658-39928-3_6
9. José Potting, M.P. Hekkert, E. Worrell et al. (2017) Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain
10. Object Management Group (2025) MetaObject Facility. https://www.omg.org/mof/. Accessed 25 Aug 2025
11. eclipse (2025) Eclipse Modeling Framework. https://eclipse.dev/emf/. Accessed 25 Aug 2025

3.3 Ökobilanzielle Bewertung in der kreislauforientierten Automobilentwicklung

Autoren:innen: Ann-Kathrin Briem; Sun-Hea Hong; Tomke Leinemann; Daniel Wehner; Michael Held

Im Angesicht strenger werdender gesetzlicher Vorgaben, verschärften Umweltstandards und Reportingpflichten wird es für Unternehmen zunehmend wichtig, ökologische Nachhaltigkeit sicherzustellen. In der Automobilbranche ergeben sich zusätzliche Effekte durch die Ziele und Strategien, die von den OEMs an ihre Entwicklungspartner und Zulieferer weitergegeben werden. Dabei fallen bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung und Innovationsprozesse Entscheidungen, die den ökologischen Fußabdruck eines Produkts über dessen gesamten Lebenszyklus maßgeblich beeinflussen können.

Durch die Integration der Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) in strategische und gestalterische Entwicklungsprozesse wird eine international etablierte und standardisierte Methodik verankert, um die mit dem Produkt- oder Prozessdesign verbundenen Umwelteinflüsse systematisch zu erfassen und fundierte Entscheidungen zu treffen. Allerdings sehen sich die am Entwicklungsprozess beteiligten Projektteams oft mit unterschiedlichen Herausforderungen konfrontiert: Eine geringe Datenverfügbarkeit und komplexe Entscheidungsprozesse erschweren die Nachhaltigkeitsbewertung. Diese Komplexität wird durch zirkuläre Ansätze zusätzlich verstärkt, da sie neue, noch nicht vollständig erforschte Fragestellungen mit sich bringen.

Obwohl die LCA als ein bewährtes Instrument gilt, um eine umweltgerechte Produktentwicklung zu unterstützen und potenzielle Umweltwirkungen zu quantifizieren, bedarf es ergänzender Forschung, um spezielle Fragestellungen im Kontext der Zirkularität adäquat zu adressieren. Dieses Kapitel beleuchtet die methodischen Herausforderungen und steigende Komplexität, die durch die Betrachtung und Bewertung zirkulärer Konzepte und Lösungen bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung entstehen. Dies stellt einen entscheidenden Aspekt dar, denn Zirkularität sollte möglichst von Anfang an mitbetrachtet werden. Eine spätere Prüfung oder Anpassung ist in der Regel nicht mehr in gleichen Maßen möglich und erfordert deutlich höhere Anstrengungen bis hin zum Re-Design, um Maßnahmen nachträglich zu ermöglichen. Das vorliegende Kapitel fokussiert sich auf die gezielte Anwendung der LCA in diesem Kontext.

3.3.1 Zirkularität und Ökobilanz

Eine LCA liefert Informationen über die Umweltauswirkungen eines Produkts und/oder Prozesses, gibt jedoch keinen direkten Aufschluss darüber, wie kreislauffähig eine Lösung ist. Ergänzende Indikatoren können verwendet werden, um die Kreislauffähigkeit von Ressourcen und Materialflüssen innerhalb des LCA-Rahmens zu bewerten. Die LCA kann jedoch angewendet werden, um R-Strategien auf ihre Umweltauswirkungen zu untersuchen und so zu einer ganzheitlichen Entscheidungsfindung beizutragen. Spreafico [1] untersuchte in einer Metastudie 136 wissenschaftlichen Artikel, die mit LCA die Wirksamkeit von R-Strategien bewerten. Betrachtet wurden Maßnahmen zur Abfallreduktion, Nutzung erneuerbarer Energien, Wiederverwendung, Remanufacturing, Recycling, energetische Rückgewinnung und Entsorgung. Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Auswirkung in sechs untersuchten Umweltwirkungskategorien erzielte das Design for Remanufacturing die besten Ergebnisse (Reduktion der Umweltauswirkungen um 53 %), gefolgt vom Design for Recycling (45 %). Hingegen verschlechterte das Design zur energetischen Rückgewinnung aus Abfällen die Auswirkungen um 83 %. Wenn sie in den Studien genannt, wurden außerdem ökonomische Kennzahlen analysiert. Zusammenfassend legt die Metastudie, dass R- Strategien sowohl die wirtschaftliche als auch die ökologische Nachhaltigkeit verbessern können – allerdings hängt die tatsächliche Umweltbilanz stark von den spezifischen Produkteigenschaften und Anwendungsfeldern ab und sollte deshalb immer fundiert untersucht und abgewogen werden.

3.3.2 Datenverfügbarkeit und komplexe Entscheidungsprozesse

In der Automobilindustrie stellen insbesondere die mehrstufigen und komplexen Lieferketten eine Herausforderung für die Datenverfügbarkeit dar. Die Fragmentierung der Lebenszyklusinformationen zwischen Lieferanten und Unterlieferanten führt häufig zu unvollständigen oder nicht standardisierten Umweltdaten, was umfassende Nachhaltigkeitsbewertungen erschwert [2]. Dieser Mangel an Transparenz erschwert die Integration von Ökobilanzen und behindert die Überwachung der Nachhaltigkeit in Echtzeit [3]. Gleichzeitig steigt die Komplexität der Entscheidungsfindung, da unterschiedliche Nachhaltigkeitsmetriken – etwa Kosten, CO_2-Fußabdruck und Materialzirkularität – unter Verwendung begrenzter Entscheidungshilfen abgewogen werden müssen [4, 5]. Zur Bewältigung dieser Herausforderungen finden multikriterielle Entscheidungsanalysen und aufkommende KI-Systeme zunehmend Anwendung, um Produktdesign und Lieferstrategien unter Unsicherheit zu optimieren [6, 7].

3.3.3 Systemgrenzen und mehrfache Lebenszyklen

Die Festlegung von Untersuchungsrahmen und Systemgrenzen in zirkulären Produktsystemen erweist sich als besonders schwierig, wenn mehrere Lebenszyklen – also die Wiederverwendung, Wiederaufbereitung und das Recycling eines Produkts – berücksichtigt werden sollen. Während lineare Modelle in der Regel nur einen einzelnen Lebenszyklus betrachten,

erfordert die Kreislaufwirtschaft eine Bewertung von Mehrfach-Lebenszyklen, was zu erheblichen methodischen Herausforderungen führt [8]. Ein zentrales Problem besteht zum Beispiel darin, ob Umweltbelastungen eines wiederverwendeten Bauteils dem Erstgebrauch zugeordnet oder auf den gesamten Folgelauf verteilt werden sollen [4]. Unterschiede in Nutzungsszenarien sowie Materialdegradation über die einzelnen Zyklen hinweg erschweren zudem die Allokation der Umweltauswirkungen und beeinträchtigen die Vergleichbarkeit der Ergebnisse [7]. Diese Komplexität macht den Bedarf an neuen Rahmenwerken für dynamische Systemgrenzen sowie robusteren Werkzeugen zur Durchführung von mehrschleifigen Lebenszyklusanalysen deutlich.

3.3.4 Allokation im Kontext der Kreislaufwirtschaft

Gemäß ISO 14040 [9] sind Allokationsverfahren erforderlich, wenn es um Systeme geht, die mehrere Produkte herstellen oder verwenden. In Kombination mit den beiden oben genannten Herausforderungen (Rückverfolgbarkeit von Daten und Merkmale von Mehrkreislaufsystemen) werden Allokationsprobleme zu einem kritischen Hindernis bei Nachhaltigkeitsbewertungen der Kreislaufwirtschaft. Da Produkte und Materialien mehrere Lebenszyklen durchlaufen - durch Wiederverwendung, Wiederaufbereitung oder Recycling - wird es immer schwieriger, ihre gesamte ökologische Herkunft nachzuvollziehen. Dieser Mangel an Rückverfolgbarkeit verschleiert die genaue Verteilung der Umweltauswirkungen und -vorteile auf die verschiedenen Produktphasen und Akteure [4, 6]. Bei vielen R-Maßnahmen ist eine Zuordnung erforderlich. So ist es beispielsweise methodisch unklar, ob die Emissionen aus der Herstellung eines wiederverwendeten Bauteils der ursprünglichen oder der nachfolgenden Anwendung zuzuordnen sind, insbesondere in Systemen mit mehreren Akteuren und zwischen verschiedenen Organisationen [8]. Diese Komplexität wird in digitalisierten Lieferketten noch verstärkt, wo unvollständige oder nicht interoperable Datenquellen eine konsistente Verfolgung von Materialien im Zeitverlauf verhindern [7].

Ein ausführliches Review von Ekvall et al. [10] beleuchtet die Vor- und Nachteile verschiedener Allokationsmethoden, die anhand von zehn Kriterien bewertet werden, in Abbildung 12.

Methoden / Kriterien	A. Einfach anzuwenden	B. Verfügbare Daten	C. Verallgemeinerbare Ergebnisse	D. Spiegelt entscheidende Merkmale wider	E. Lebenszyklusbetrachtung	F. Explizit, begründet und bewertet	G. Verständlich	H. Relevant für Entscheidungsträger	I. Legitim	J. Reproduzierbar
1. Einfacher Cut-off	+	+	+	–	+	+	+	+	o	+
2. Cut-off mit ökonomischer Allokation	+	+	+	–	+	+	+	+	o	o
3. Cut-off plus Gutschrift	o	o	–	o	o	o	+	+	+	–
4. Allokation auf Materialverluste	+	+	+	o	+	+	+	o	o	o
5. Allokation auf Primärmaterialverwendung	+	o	+	o	+	–	+	o	–	o
6. 50/50-Methoden	+	o	+	o	+	+	+	+	+	o
7. Qualitätsangepasste 50/50-Methoden	–	–	+	+	o	o	–	+	+	o
8. Circular Footprint Formel	–	o	+	+	+	+	–	+	+	o
9. Marktpreisbasierte Allokation	o	o	+	+	+	+	+	+	o	o
10. Marktpreisbasierte Substitution	–	–	+	+	+	o	–	+	+	–
11. Preiselastizitätsansätze	–	–	+	+	+	–	–	+	+	–
12. Allokation am Substitutionspunkt	–	–	+	o	+	+	–	+	o	–

Zusammenfassung der Bewertung von Allokations-Methoden von Ekvall et al. (2020) anhand von zehn Kriterien.
Grün (+) = Kriterium erfüllt. Gelb (o) = Kriterium teilweise erfüllt. Rot (-) = Kriterium nicht erfüllt.
Die ursprüngliche Graphik von Ekvall et al. (2020) wurde übersetzt und angepasst.

Abbildung 12: Bewertung von Allokationsmethoden von Ekvall et al. 2020 [10].

3.3.5 End-of-Life Formeln: Zusätzliche Komplexität durch Zirkularität

Ein weiterer Punkt, der die ökologische Bewertung in zirkulären Ansätzen erschwert, ist die Allokation von Umweltwirkungen am Lebensende (End of Life, EoL). In Systemen, in denen Materialien recycelt und als Sekundärrohstoffe in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden, stellt sich die grundlegende Frage: Wer trägt die Verantwortung für die Umweltbelastung oder erhält gegebenenfalls eine Gutschrift – Produkt A oder Produkt B? Diese Problematik birgt die Gefahr von Doppelzählungen oder einer fehlerhaften Unterschätzung der tatsächlichen Umweltauswirkungen. Obwohl in zahlreichen Untersuchungen, beispielsweise in Allacker et al. [11], verschiedene EoL-Formeln analysiert wurden, fehlt bislang ein wissenschaftlich fundiertes, universell akzeptiertes und gleichzeitig anwendbares Verfahren zur konsistenten Teilung der Umweltauswirkungen in zirkulären Produktkreisläufen.

3.3.6 Konzeptentwicklung für die frühe Einbindung einer LCA in die Produktentwicklung

Dieses Kapitel beschreibt die im Rahmen von CYCLOMETRIC entwickelten Konzepte, um sowohl konventionelle als auch innovative Ansätze in der frühen Produktentwicklung effektiv zu unterstützen.

3.3.6.1 Möglichkeiten zur Einbindung von LCA in frühe Produktentwicklungsphasen – Status Quo vs. innovative Ansätze

Bei einer Einbindung von LCA zu den verschiedenen Zeitpunkten der Produktentwicklung gilt es die Herausforderung zu überwinden, dass in sehr frühen Entwicklungsphasen nur wenige belastbare Daten verfügbar sind. Hier kann eine Lösung sein, die LCA zunächst für eine qualitative Bewertung anzuwenden, um grundsätzliches LCA-Wissen zu Materialien und Verfahren für eine erste Einordnung zu nutzen. Mit zunehmender Datenverfügbarkeit im Verlaufe der Produktentwicklung ist die LCA dann in der Lage, quantitative Ergebnisse mit hoher Belastbarkeit zu berechnen. Die beispielhaften Ergebnisse im oberen Teil von Abbildung 13 zeigen einen möglichen Detaillierungsgrad der Ergebnisse auf verschiedenen Stufen der Datenverfügbarkeit im Verlauf des Produktentwicklungsprozesses.

Um einen innovativen Ansatz ergänzend zu dieser generellen Darstellung zu entwickeln, wurden die Anforderungen und gewünschten Outputs der Ökobilanz sowie die verfügbaren Inputs für die Ökobilanz in drei allgemein anwendbaren frühen Entwicklungsphasen systematisch analysiert. Hierfür wurden Leitfragen für alle Phasen in verschiedenen Expertenrunden diskutiert und dokumentiert. Die Leitfragen können als Instrument für eine generelle und konzeptionelle Auseinandersetzung mit diesem Thema und zur Erfassung des Wissensstands und Informationsbedarfs im Entwicklungsprozess dienen.

Leitfragen:

- Welche Inputs sind im konventionellen Zustand für die LCA vorhanden, welche Outputs werden generiert?
- Welche Inputs wären für die LCA noch gewünscht? Welche Outputs aus der LCA könnten zusätzlich für eine Entscheidungsunterstützung sinnvoll sein?
- Welche Informationen sind in welcher Phase der Produktentwicklung üblicherweise verfügbar?
- Welche Informationen wären in welcher Phase der Produktentwicklung hilfreich?
- Welche Ziele werden jeweils verfolgt?
- Welche Rollen sind an den jeweiligen Zeitpunkten betroffen/involviert?
- Bilden die Rollen eine Schnittstelle ab? Wie sieht die Schnittstelle aus?
- Welche innovativen Ansätze sind erkennbar/denkbar, die über die heutigen Zustände hinausgehen?

Das Ergebnis der Analyse identifiziert klare Lücken im Informationsbedarf und -austausch entlang der frühen Produktentwicklungsphasen. Während der Strategie- und Potenzialfindung,

wenn Entwickler:innen nicht über spezifische Informationen verfügen, kann ein innovativer Ansatz bei der Entscheidungsfindung helfen, z. B. mit digitalen Checklisten, Entwicklungsmatrizen oder Fact-Books. In der Produktdefinition und Konzeptphase, wenn Entwickler:innen zumindest eine Liste möglicher Materialien und Produktionsprozesse kennen, können Szenarien und Sensitivitätsanalysen ein unterstützendes Instrument sein. Im Gegensatz dazu werden bei konventionellen Entwicklungsprozessen Berechnungen der Umweltauswirkungen meist erst nach dem Design Freeze, dem Prototyp oder der Produktion durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Datenverfügbarkeit in den einzelnen Phasen werden unterschiedliche Werkzeuge vorgeschlagen, die im unteren Teil der folgenden Abbildung 13 zusammengefasst sind.

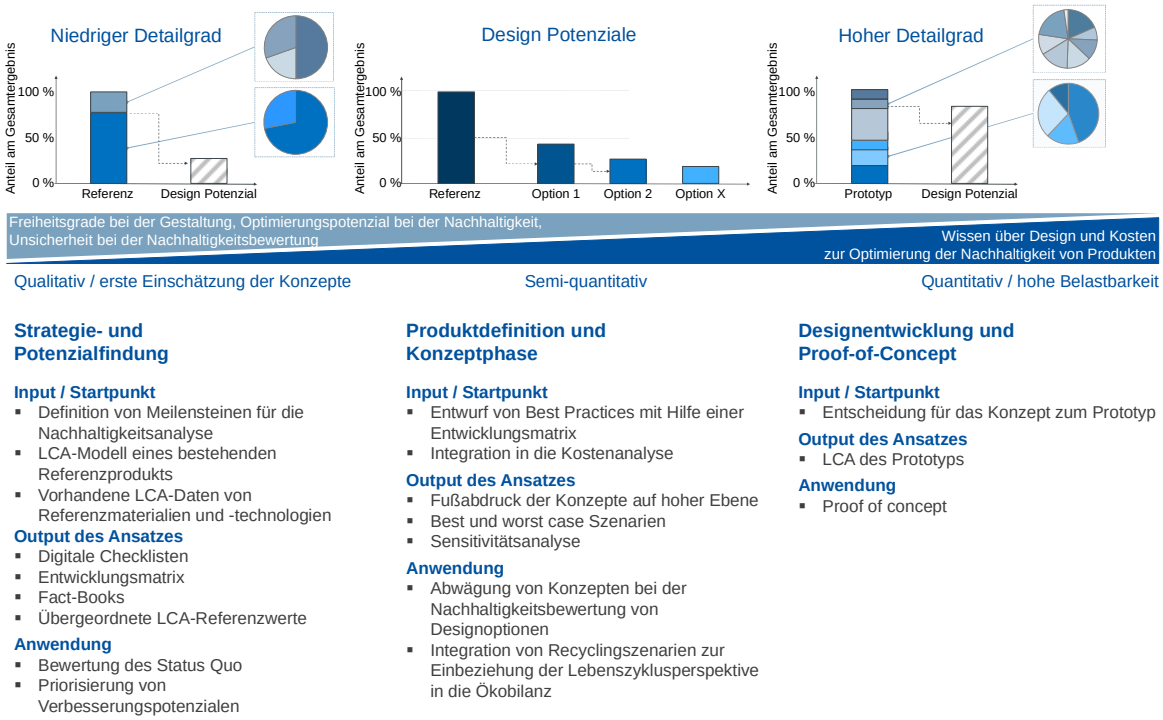


Abbildung 13: Datenverfügbarkeit für LCA und Ergebnisdetaillierung vs. Freiheitsgrade im Verlauf des Produktentwicklungsprozesses sowie Übersicht über mögliche Inputs, Outputs und Anwendungszwecke des vorgeschlagenen Ansatzes für LCA in frühen Entwicklungsphasen [12].

3.3.6.2 Definition von Input- und Outputanforderungen an die LCA und Definition von Schnittstellen

Für das Ziel, die LCA als Modul in einem Toolkontext im Verlauf der Produktentwicklung einzusetzen, müssen zunächst grundsätzliche Anforderungen an die LCA formuliert werden. Diese wurden im Projekt CYCLOMETRIC erarbeitet. Zusammengefasst muss ein solches LCA-Modul in der Lage sein, Ergebnisse auf Basis der bereitgestellten Inputdaten berechnen zu können sowie anschließend als Output die Art von Informationen zu liefern, die für eine effektive Entscheidungsunterstützung während einer Entwicklungsphase oder einem wichtigen Entscheidungszeitpunkt benötigt werden. Hierfür braucht es in der definierten Tool-Landschaft eine Schnittstelle zum Produktarchitekturmodell sowie eine Schnittstelle zum Bewertungsmodul, bzw. der Entscheidungslogik. Abbildung 14 stellt diese Zusammenhänge dar.

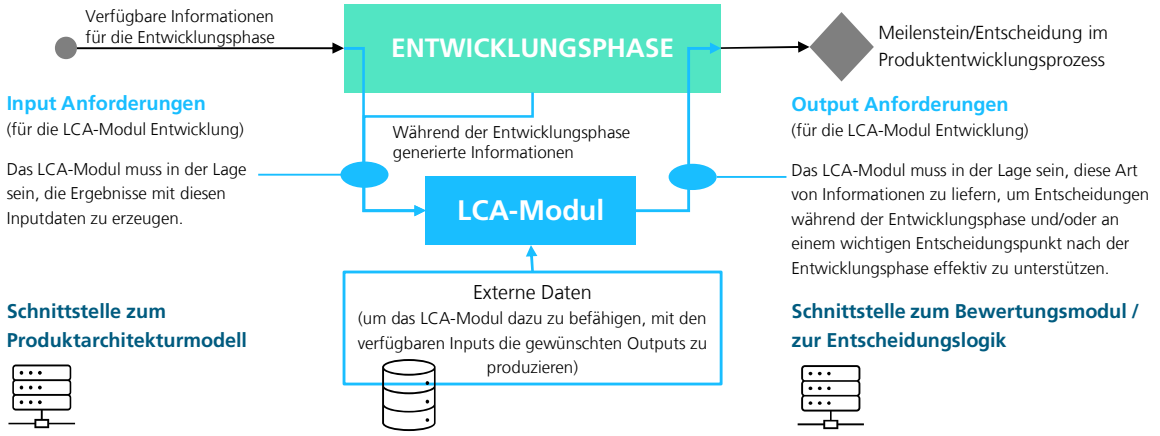


Abbildung 14: Generelle Darstellung von Input- und Outputanforderungen an ein LCA-Modul und Schnittstellen im Kontext der Toolentwicklung in CYCLOMETRIC (eigene Darstellung).

Folgende weitere Punkte sollten entwicklungsphasenübergreifend beachtet werden:

Modellunsicherheiten: Sowohl in den Inputmodellen für die LCA als auch in den daraus entstehenden LCA-Modellen gibt es Unsicherheiten, die sich nicht beseitigen lassen. Diese Unsicherheiten gilt es zu erkennen und im Idealfall zu quantifizieren. Außerdem sollten Unsicherheiten kommuniziert und bei der Ergebnisinterpretation berücksichtigt werden. Hierfür sind auch die Punkte Transparenz und Datenqualität relevant.

Transparenz: Der Grad der Unsicherheit sollte als Grundlage für die Entscheidung während des Prozesses mitgeteilt werden, bspw. wenn verschiedene Indikatoren gegeneinander abgewogen werden müssen, aber manche – auf Basis der zum Entscheidungszeitpunkt verfügbaren Informationen – deutlich belastbarer als andere sind, sollte dies der entscheidenden Person bewusst sein.

Modellbildung und Datenqualität: LCA-Modelle – wie alle Modelle – können die Realität nicht korrekt abbilden. Sie bilden reale Zusammenhänge über mathematische Modelle immer nur annäherungsweise ab. Hierbei kommen ähnliche Prinzipien wie in der Messtechnik zum Tragen, wo man auf der Suche nach dem „wahren Wert“ über Genauigkeit, Präzision und Korrektheit sprechen muss. Nur eine hohe Genauigkeit und Präzision ergibt auch eine hohe Korrektheit bei Messwerten. Ähnlich verhält es sich mit den Anforderungen an die Daten einer LCA-Studie nach dem EU Product Environmental Footprint (EU PEF) [13]. Neben den Mindestanforderungen „Vollständigkeit“ sowie „methodische Eignung und Konsistenz“, gibt es Kriterien, um die Datenqualität zu bewerten. Diese umfassen die technologische, geographische und zeitbezogene Repräsentativität. Es gibt verschiedene Ansätze, um die Datenqualität in der LCA zu bewerten [14–16].

3.3.6.3 Lebenszyklusinventar und Datenaustauschformate für LCA

In der Ausgestaltung der Schnittstellen ist ein wesentlicher Schritt in der Erarbeitung eines Datenformats für den prototypischen Informationsaustausch mit dem Tool *CycloP*. Tabelle 1 fasst gängige LCA-Datenformate zusammen sowie relevante Datenbanken und Programme, die mit den Formaten arbeiten. Auf Basis eines Vergleichs der verfügbaren LCA-Datenformate wird das ILCD-Format als das robusteste und am besten geeignete Format für einen generellen

Austausch von LCA-Datensätzen identifiziert. Für die prototypische Umsetzung einer Datenschnittstelle zwischen LCA und dem entwickelten Tool *CycloP* wird jedoch zunächst ein einfaches und erweiterbares CSV-Format gewählt, da es sich bei den auszutauschenden Informationen einerseits um Inventarlisten und andererseits auch Ergebniswerte handelte und nicht um reine LCA-Datensätze im klassischen Sinne. In Bezug auf LCA-Datenformate könnte ILCD künftig für die Datenkonvertierung für Schnittstellen mit *CycloP* dienen und so Robustheit und Kompatibilität zwischen verschiedenen Datenbanken und Softwaretools gewährleisten.

LCA-Datenformat	**Formatgrundlage**	**Relevante Datenbanken und Programme, die mit dem Format arbeiten**
ILCD	XML (Extensible Markup Language)	International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Datenformat für die European Reference Life Cycle Database (ELCD) EU Environmental Footprint (PEF/OEF) Zahlreiche LCA-Softwares und Datenbanken
JSON-LD	JavaScript-Objektnotation für verknüpfte Daten (JSON-LD)	Technische Alternative, die ILCD und EcoSpold kombiniert GreenDelta (hauptsächlich openLCA)
EcoSpold	XML-basiert	Vor allem mit ecoinvent verwendet Die meisten gängigen LCA-Softwares
CSV	Komma-getrennte Werte	Weltweite Verwendung Kann z. B. auch in MS Excel geöffnet werden
GaBi txs	Thinkstep-Datei	LCA for Experts Software (früher GaBi-Software)

Tabelle 1: Übersicht über relevante LCA-Datenformate, ihre Grundlage und relevante Datenbanken und Programme, die mit dem Format arbeiten.

Das erarbeitete Datenformat (für den Austausch als CSV-Datei) entspricht im Wesentlichen einer Lebenszyklusinventarliste und berücksichtigt dabei alle relevanten Informationen, die für eine LCA in frühen (und auch späteren) Entwicklungsphasen als Input benötigt werden: Abbildung der Produktarchitektur über Produkt- und Teilelevel, Materialklasse, Materialtyp, Verarbeitungsprozesse, Produktionsland, Masse oder Energiewert und Einheit. Je detaillierter das Produkt hier abgebildet wird, desto detaillierter fallen auch die Ergebnisse aus. Dies variiert stark je nach Entwicklungsphase. Bei der Nennung des Materials ist darauf zu achten, dass es so spezifisch wie möglich, aber bei gleichzeitiger Verwendung von standardisierter Nomenklatur benannt ist, um später das Matching mit LCA-Datensätzen zu erleichtern. Beim generierten Output werden dann die LCA-Indikatorergebnisse, z. B. Carbon Footprint, ergänzt sowie Informationen zur Datenqualität der hinterlegten LCA-Datensätze und einer Bewertung der Zuordnungsqualität („Mapping Quality“) der Datensätze zum zu betrachtenden System.

Die beschriebene Datentabelle kann mit einer konventionellen Bill of Materials (Materialstückliste) bereits befüllt werden. Die Herausforderungen in der kreislauforientierten Produktentwicklung besteht jedoch auch darin, hier nicht nur die Produktion, sondern auch die weiteren Lebenszyklusphasen im Inventar zu berücksichtigen. Aus diesem Grund müssen auch benötigte Materialien und Verbrauchsmittel, z. B. von Reparaturmaßnahmen, berücksichtigt werden. Um eine Zuordnung der Inventareinträge zur entsprechenden Lebenszyklusphase zu

ermöglichen sowie eine korrekte Berücksichtigung von Allokation und eventuellen Gutschriften, die durch R-Strategien entstehen können, werden diese Information ebenfalls in der definierten Struktur festgehalten.

Weitere spezifische Anforderungen für die Modellierung ergeben sich aus der Ausgestaltung in der Softwarearchitektur, die in Kapitel 3.4 näher beschrieben wird.

3.3.6.4 Konzeptionierung der LCA-Berechnung für eine (semi-)automatisierte Tool-Lösung

Für die Berechnung und Auswertung der LCA auf Basis der Inputinformationen aus der im letzten Abschnitt beschriebenen Inventarliste müssen mehrere Schritte durchgeführt werden. Zunächst müssen für die Einträge der Inventarliste passende LCA-Datensätze gefunden und verknüpft werden. Anschließend müssen diese mit den angegebenen Werten und Einheiten sowie ggf. Allokationsfaktoren verrechnet werden. So entsteht ein LCA-Modell. Für die Wirkungsabschätzung (engl. „Life Cycle Impact Assessment“) sind im nächsten Schritt die standardisierten methodischen Schritte anzuwenden [9], die mit jeder gängigen LCA-Software durchgeführt werden können. Die so generierten Ergebnisse können für eine aussagekräftige Auswertung auf verschiedenen Ebenen analysiert, aggregiert und visualisiert werden, z. B. basierend auf der Produktstruktur oder pro Lebenszyklusphase. Verschiedene R-Strategien und Design-Varianten können so miteinander verglichen werden. Eine differenzierte und aussagekräftige Auswertung und Visualisierung von LCA-Ergebnissen ist essenziell für die Ableitung von Handlungsempfehlungen und zur Unterstützung von Entscheidungen im Nachhaltigkeitskontext.

Eine möglichst automatisierte Berechnung von LCA-Ergebnissen wird vor allem dadurch ermöglicht, dass für Standardmaterialien, Energie und Hilfsmittel vorhandene LCA-Datensätze automatisiert zugeordnet werden. Je nach Vollständigkeit der Daten in der Inventarliste können passende Datensätze in LCA-Datenbanken identifiziert werden (z. B. ein bestimmte Stahllegierung aus einem bestimmten Produktionsland). Besonders in der frühen Produktentwicklung sind die benötigten Informationen oft (noch) nicht spezifisch genug vorhanden. Dann kann z. B. mit Durchschnittswerten oder Bandbreiten gerechnet werden, um zumindest eine grobe Abschätzung zu erhalten. Dies kann wiederum in der Zuordnungsqualität erfasst werden („Mapping Quality“) und sollte bei der Interpretation der Ergebnisse als eine Quelle von Unsicherheiten berücksichtigt werden [14, 15]. Gleichzeitig spielt auch die Verfügbarkeit von LCA-Datensätzen in den jeweiligen Datenbanken eine große Rolle. Wenn die Informationen vom Produktmodell spezifisch genug benannt sind, es jedoch keinen (gut passenden) Datensatz gibt kann auch keine gute Zuordnung gefunden werden, z. B. weil es sich um ein neues, innovatives Material handelt, für das noch kein LCA-Modell erstellt wurde. Hier können Erfahrungswerte oder Annahmen durch Experten:innen Lücken schließen, jedoch sind diese nur schwer automatisiert durchführbar. An dieser Stelle besteht noch erheblicher Verbesserungs- und Forschungsbedarf.

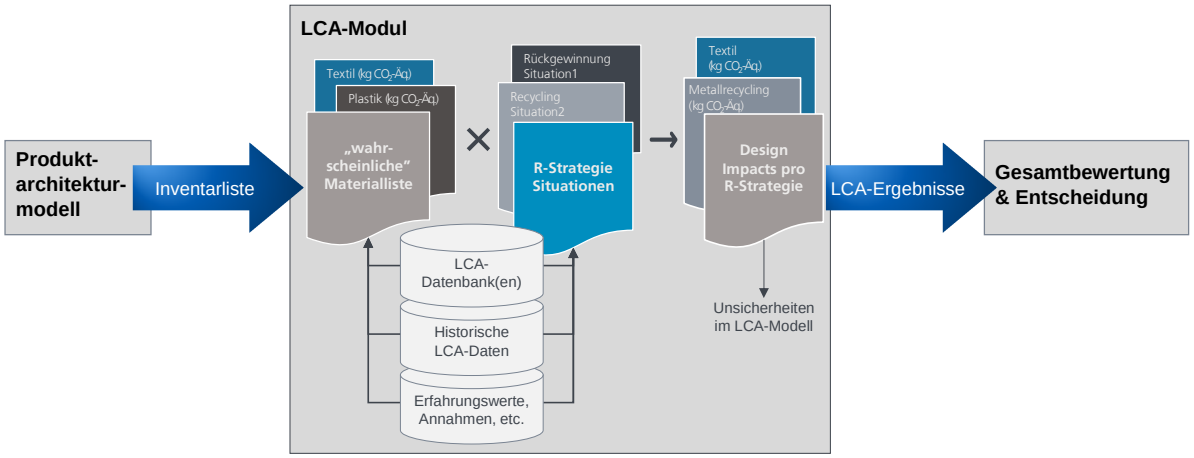


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Konzepts (eigene Darstellung)

Abbildung 15 zeigt eine schematische Darstellung des Konzepts. Die Anwendung dieses Konzepts auf die im Projekt entwickelte smarte Mittelkonsole wird in Kapitel 4.6 thematisiert.

3.3.7 Fazit zur ökobilanziellen Bewertung in der kreislauforientierten Automobilentwicklung

Die Analyse und Konzeptentwicklung im Rahmen der Integration der Ökobilanz (LCA) in der kreislauforientierten Automobilentwicklung zeigt deutlich, dass eine frühzeitige und systematische Berücksichtigung ökologischer Aspekte in der Produktentwicklung möglich und strategisch wichtig ist. Ökobilanzielle Bewertungen können bereits in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses zur Identifizierung von Potenzialen und einer nachhaltigen Entscheidungsfindung beitragen, auch wenn dies in der praktischen Anwendung mit diversen Herausforderungen verbunden ist.

Die zentralen Herausforderungen liegen vor allen in zwei Bereichen: Zum einen führt die Komplexität mehrstufiger Lieferketten in der Automobilindustrie zu fragmentierter, unvollständiger Datenlage, die belastbare ökologischen Bewertungen erschwert. Digitale Lösungen sind daher notwendig, um Unsicherheiten zu quantifizieren und verschiedene Nachhaltigkeitsmetriken abzuwägen. Zum anderen ist die Festlegung präziser Systemgrenzen im zirkulären Ansatz eine weitere Herausforderung. Anders als bei linearen Modellen müssen mehrere Lebenszyklen – etwa Wiederverwendung, Wiederaufbereitung und Recycling – berücksichtigt werden, was eine transparente und exakte Allokation der Umweltauswirkungen erfordert und den Bedarf an dynamischen, methodisch weiterentwickelten Rahmenwerken unterstreicht.

Auf der methodischen Ebene wurden neben den klassischen LCA-Methoden auch innovative Ansätze identifiziert, die den Anforderungen in frühen Entwicklungsphasen besser gerecht werden. Insbesondere die schrittweise Steigerung der Detaillierung, beginnend bei einer qualitativen Bewertung und übergehend zu quantitativen Ergebnissen bei wachsender Datenverfügbarkeit, bietet einen praxisnahen Ansatz. Hierbei spielen digitale Checklisten, Entwicklungsmatrizen sowie Fact-Books eine wichtige Rolle, um die Lücken in der

frühzeitigen Datenbasis zu schließen und die Entscheidungsgrundlagen bereits früh im Entwicklungsprozess zu verbessern. Je weiter der Entwicklungsprozess fortschreitet und je mehr konkrete Daten - etwa zur Materialauswahl oder zu den Herstellungsverfahren - verfügbar werden, desto mehr quantitative und zuverlässige Ergebnisse kann die Ökobilanz liefern, einschließlich Szenarioanalysen oder Sensitivitätsstudien. Dieser stufenweise Ansatz ermöglicht es, Nachhaltigkeit so früh wie möglich zu berücksichtigen, auch unter Unsicherheit.

Die vorgestellten Konzepte und die systematische Analyse der Inputs und Outputs in verschiedenen Entwicklungsphasen demonstrieren, dass eine zielgerichtete Integration von LCA in die Produktentwicklung möglich – wenn auch mit einem klaren Bewusstsein für die damit einhergehenden Unsicherheiten und methodischen Herausforderungen. Ein zentraler Bestandteil des Konzepts ist die Definition von Schnittstellen zwischen dem LCA-Modul, dem Produktarchitekturmodell und entscheidungsunterstützenden Systemen. Diese Schnittstellen stellen sicher, dass die Ergebnisse der Ökobilanz auf die Entwicklungsbedürfnisse abgestimmt sind und in breitere Bewertungsrahmen integriert werden können. Die Entwicklung eines modulspezifischen Ansatzes, der Schnittstellen zu existierenden Produktarchitekturmodellen und Bewertungssystemen herstellt, erlaubt nicht nur eine (semi-)automatisierte Berechnung von LCA-Ergebnissen, sondern unterstützt auch die übersichtliche Darstellung und Auswertung der Umweltauswirkungen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine erfolgreiche Implementierung ökologisch fundierter LCA-Verfahren in der Entwicklung von automobilen Bauteilen, Komponenten und schließlich auch des Endprodukts Fahrzeug ein Zusammenspiel aus verbesserten Datenstrukturen, praxistauglichen Bewertungsmethoden und innovativen Tools erfordert. Diese Erkenntnisse verdeutlichen, dass innovative Ansätze in der frühen Produktentwicklung nicht nur ökologische Potenziale identifizieren, sondern auch als wesentlicher Baustein für die nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit in der Automobilindustrie dienen können. Die fortlaufende Forschung und Erweiterung der LCA-Methodik ist daher unabdingbar, um den ständig wachsenden Anforderungen an Transparenz und Nachhaltigkeit gerecht zu werden.

Literatur

1. Spreafico C (2022) An analysis of design strategies for circular economy through life cycle assessment. Environ Monit Assess 194:180. https://doi.org/10.1007/s10661-022-09803-1
2. Preut A, Mertz T, Cibulski L et al. (2024) A User-Centered Perspective on Information Needs of Stakeholders in the Circular Economy. In: 2024 Electronics Goes Green 2024+ (EGG), pp 1–9
3. Chen S (2025) Scm Concrete Construction: Economic And Environmental Performance Quantification, Optimisation And Uncertainty Analysis. PhD dissertation, Luleå University of Technology
4. Lechtenberg F, Aresté-Saló L, Espuña A et al. (2025) Cooperative multi-actor multi-criteria optimization framework for process integration. Applied Energy 377:124581. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124581

5. Deveci M, Delen D, Ding W (2024) AI-based decision support systems for sustainable business management under circular economy. Ann Oper Res 342:1–3. https://doi.org/10.1007/s10479-024-06347-0
6. Sehnem S, Junges I, Soares SV et al. (2025) Reconciling the efficiency of Industry 4.0 and circular economy with the human empowerment of lean: unraveling the challenges and opportunities of integration. Social Responsibility Journal 21:429–450. https://doi.org/10.1108/SRJ-01-2024-0011
7. Z. Mehdipour (2024) The Application of AI for Electronic LCA Data and Assessment Toward the Circular Economy. In: 2024 Electronics Goes Green 2024+ (EGG), pp 1–5
8. Buck V de, van Impe J (2025) Design and optimisation methodology for small-scale biorefineries: Ontwerp- en optimalisatiemethodologie voor kleinschalige bioraffinaderijen. PhD dissertation
9. DIN EN ISO 14040 (2021) Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-iso-14040/325953744
10. Ekvall T, Björklund A, Sandin G et al. (2020) Modeling recyling in life cycle assessment
11. Allacker K, Mathieux F, Pennington D et al. (2017) The search for an appropriate end-of-life formula for the purpose of the European Commission Environmental Footprint initiative. Int J Life Cycle Assess 22:1441–1458. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1244-0
12. Briem A-K, Hong S-H, Leinemann T et al. (2023) Thinking and designing sustainably from the very beginning – Potentials and challenges of integrating LCA in early product development and innovation processes. 11th International conference on life cycle management
13. (2021) COMMISSION RECOMMENDATION (EU) 2021/2279 of 15 December 2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations
14. Wehner D, Held M (2025) Automation Approach for Life Cycle Assessment Integrated Data and Mapping Quality Assessment (DMQA). In: Fukushige S, Nonaka T, Kobayashi H et al. (eds) EcoDesign for Circular Value Creation: Volume II. Springer Nature Singapore, Singapore, pp 395–410
15. Wehner D, Held M (2023) Automation Approach for Life Cycle Assessment (LCA) integrated Data and Mapping Quality Assessment (DMQA)., Nara (Japan)

3.4 CycloP – Das Softwaretool für kreislaufwirtschaftliche Produktentwicklung

Autornen:innen: Marie Schwahn; Lukas Block; Ann-Kathrin Briem; Thomas Potinecke; Martin Musser

Die Entwicklung kreislaufwirtschaftlicher sowie ökologisch und ökonomisch nachhaltiger Produkte stellt Produktentwickler:innen vor einige Herausforderungen (vgl. Kapitel 3.2). Diese Herausforderungen wie der Umgang mit Unsicherheiten in frühen Entwicklungsphasen und die fundierte Auswahl passender R-Strategien für ein Produkt resultieren in einer hohen systemischen Komplexität. Aufgrund dessen lassen sich die Herausforderungen in den frühen Entwicklungsphasen bislang nur wenig weitreichend und eingeschränkt objektiv bewältigen. Wie bereits in Kapitel 3.2 ausgeführt, bedarf es daher eines Konzepts zur Unterstützung der Entwicklungstätigkeiten und zur Optimierung der Kreislauffähigkeit in den frühen Phasen der Produktentwicklung.

Kapitel 3.2 bietet hierfür die konzeptionelle Grundlage: eine Beschreibungssprache, die die Abbildung von Produktentwürfen und zugehörigen, erwarteten Lebenszyklen für die Kreislauffähigkeitsbewertung ermöglicht. Die Beschreibungssprache bietet die Basis für die Analyse und Optimierung von Produkten mit Blick auf deren Kreislauffähigkeit unter Einbezug existierender Unsicherheiten in frühen Entwicklungsphasen.

Diese Beschreibungssprache alleine genügt jedoch nicht, um die systemische Komplexität der kreislauffähigen Produktentwicklung zu bewältigen. Denn die Beschreibungssprache ermöglicht prinzipiell zwar die Beschreibung, Abbildung und Analyse komplexer Zusammenhänge, nimmt diese für die Produktentwickler:innen allerdings nicht vor. Es wird daher zusätzlich die Implementierung derselben in ein Softwarewerkzeug benötigt. Das Softwarewerkzeug unterstützt Produktentwickler:innen dann gezielt mittels Algorithmen in Bezug auf eine automatische Konsistenzüberprüfung unter Berücksichtigung aller Wechselwirkungen, bezüglich der Analyse und Optimierung des Lebenszyklus und Produktentwurfs, hinsichtlich einer zielgerichteten Nutzung und Integration in Datensysteme der Produktentwicklung sowie in Bezug auf einen Workflow zur Anwendung der Beschreibungssprache. Entscheidend für die zielgerichtete Nutzung ist auch die Definition eines Rollenmodells mit Verantwortlichkeiten und Funktionen, um die Entwicklung kreislauffähiger Produkte in interdisziplinärer Zusammenarbeit effizient abzubilden.

Gemäß dieser Zielstellung wurde das auf Model-Based System Engineering (MBSE) basierende Softwarewerkzeug *CycloP* konzeptioniert und prototypisch entwickelt. *CycloP* unterstützt Produktentwickler:innen mittels der in Kapitel 3.2 eingeführten Beschreibungssprache mit Algorithmen, Modellen und Werkzeugen, um die technische Gestalt sowie den

erwarteten Lebenszyklus eines Produkts zu modellieren, zu analysieren und in Bezug auf die Kreislauffähigkeit und daraus resultierende Nachhaltigkeit zu optimieren. Eine Anbindung an eine ökobilanzielle Berechnung (im Folgenden „LCA-Modul“) ermöglicht es für das modellierte Produkt und den zugehörigen Lebenszyklus Nachhaltigkeitseffekte zu quantifizieren. So werden Trade-off-Entscheidungen erleichtert und ressourcenschonende Produkte effizient entwickelt.

Die Software steht in Teilen als Open-Source Release zur Verfügung [1]. Dies soll eine breite Anwendung und Verbreitung der entwickelten Konzepte sowie den Transfer und die Weiterentwicklung des entwickelten Softwarewerkzeugs fördern. Nachfolgend werden die Funktionalität und zugrundeliegende Systemarchitektur von *CycloP*, sowie das damit verbundene Rollenmodell erläutert.

3.4.1 Entwicklung, Funktionen und Systemarchitektur von *CycloP*

CycloP wurde in einem nutzerzentrierten Vorgehen auf Basis der Erkenntnisse aller Teilprojekte und beteiligten Partner des Konsortiums konzeptioniert und implementiert, um sicherzustellen, dass das Softwarewerkzeug den Produktentwicklungsprozess nutzbringend unterstützt. Eine Beispielkomponente – eine automobile Mittelkonsole (vgl. Kapitel 3.7) – wurde prototypisch von Designer:innen, Produktingenieur:innen und Materialwissenschaftler:innen entwickelt. Dieser Prozess wurde beobachtet und relevante Problemstellungen der Beteiligten wurden analysiert, um notwendige Funktionen und nicht-funktionale Anforderungen für die Software abzuleiten. Es wurde untersucht, an welchen Stellen des Entwicklungsprozesses eine Software in diesem Zusammenhang helfen kann, die systemische Komplexität zu reduzieren und Entwickler:innen gezielt darin zu unterstützen, Produkte kreislauffähig und nachhaltig zu gestalten. Diese Unterstützung ist insbesondere bei Rebound-Effekten und Wechselwirkungen notwendig, die im Zusammenhang mit den gegebenen Unsicherheiten in der frühen Entwicklungsphase schwer abschätzbar sind.

Auf Basis dieses Praxisbeispiels wurden drei **übergeordnete Funktionsbereiche für *CycloP*** abgeleitet:

(1) Die Modellierung der technischen Produktgestalt und des erwarteten probabilistischen Lebenszyklus für ein zu entwickelndes Produkt auf Basis der Beschreibungssprache
(2) Die automatische Ergänzung und Vorhersage unvollständiger technischer Produktgestalten
(3) Die Bewertung der aktuellen technischen Produktgestalt auf deren Kreislauffähigkeit und Nachhaltigkeit über den gesamten Lebenszyklus hinweg

Die Implementierung dieser übergeordneten Funktionsbereiche wurde in drei dezidierten Subsystemen umgesetzt, die miteinander interagieren. Abbildung 16 zeigt die aus den drei Subsystemen - ***(1) CycloP* Lebenszyklusmodellierung, (2) *CycloP* Xtend** und **(3) Szenario-Generierung für Lebenszyklen** - bestehende Softwarearchitektur von *CycloP*.

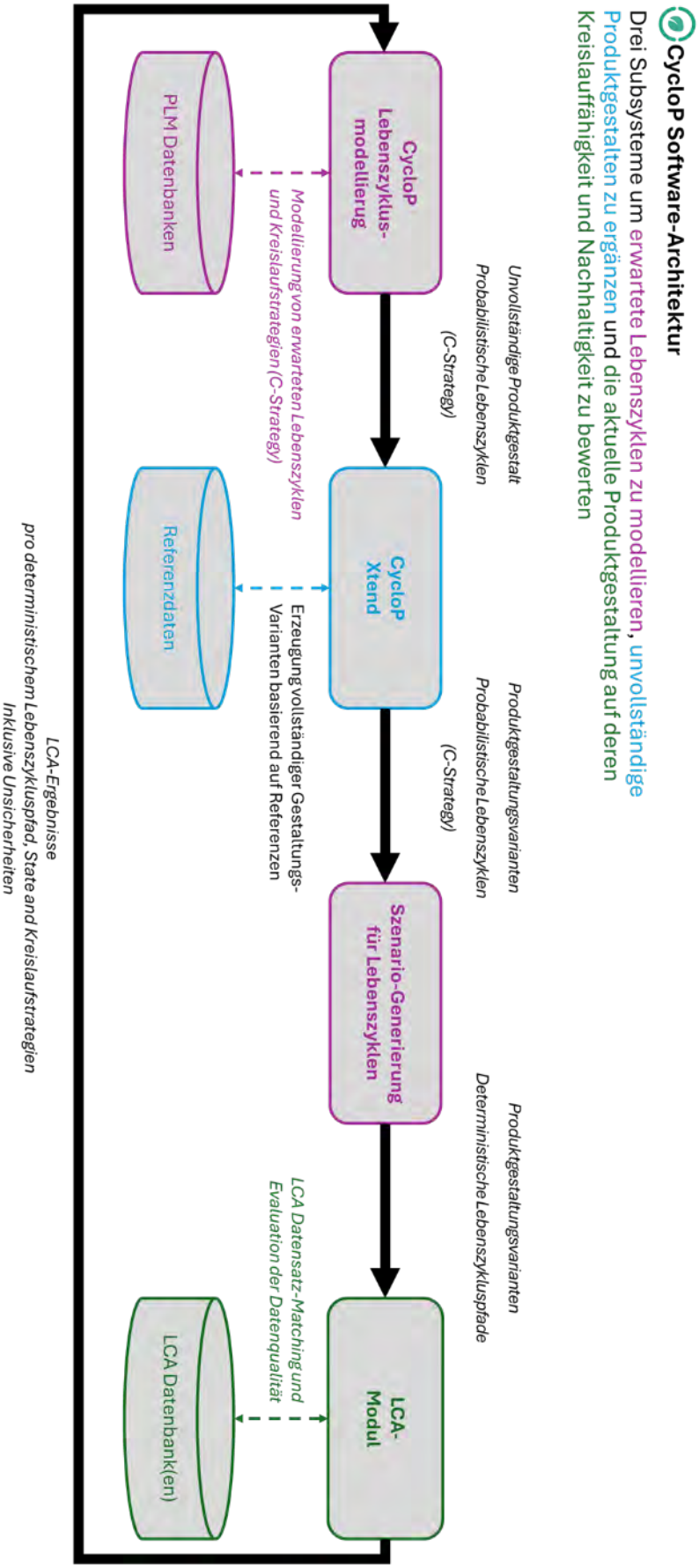


Abbildung 16: CycloP Software-Architektur (eigene Darstellung)

Die ***CycloP* Lebenszyklusmodellierung** ermöglicht es, technische Produktgestalten und damit verbundene Lebenszyklen zu modellieren. Dadurch können Kreislaufstrategien dargestellt werden. Dieses Subsystem bildet somit die Grundlage für eine ganzheitliche Nachhaltigkeits- und Kreislaufbewertung über den gesamten Lebenszyklus hinweg. In frühen Phasen der Produktentwicklung ist die technische Produktgestalt jedoch häufig noch nicht vollständig definiert. ***CycloP* Xtend** vervollständigt auf Basis von Referenzdaten unvollständige Produktarchitekturen und generiert eine Menge an möglichen Produktgestaltungsvarianten. Um konkrete Berechnungen durchzuführen, werden aus dem probabilistischen Lebenszyklusmodell, das alle möglichen Lebenszykluspfade abbildet, einzelne konkrete Lebenszykluspfade wahrscheinlichkeitsbasiert extrahiert. Ein deterministischer Lebenszykluspfad bildet einen möglichen diskreten Ablauf des Lebenszyklus einer konkreten Produktinstanz ab. Um diese Extraktion einzelner Pfade aus dem probabilistischen Modell mathematisch zu lösen, benötigt es einen Solver, welchen das Modul der **Szenario-Generierung für Lebenszyklen von *CycloP*** bereitstellt. Für die Bewertung der technischen Produktgestalten und Lebenszyklen auf deren Kreislauffähigkeit umfasst die Lösung eine Anbindung an ein **LCA-Modul**. Dieses kann Auswirkungen der Produktgestalt und des erwarteten Lebenszyklus auf Werte wie den CO_2-Fußabdruck, den Wasserverbrauch oder andere Nachhaltigkeitsmetriken quantifizieren. Daraufhin können die technische Produktgestalt sowie der Lebenszyklus inklusive geplanter Kreislaufmaßnahmen im Falle eines unerwünschten Zustandes (vgl. Kapitel 3.2) angepasst werden. Zum Beispiel kann für einzelne Komponenten festgelegt werden, dass sie reparierbar sein müssen oder deren Material recyclingfähig sein sollte. Auf dieser Basis werden die Produktgestalt und der Lebenszyklus optimiert und das Produkt kann erneut mittels LCA analysiert werden. So werden das Produkt und sein Lebenszyklus in ihrer Gesamtheit iterativ, kreislauffähiger und nachhaltiger gestaltet.

Zusammenfassend ermöglicht *CycloP* somit die:

(1) **Identifikation ressourcenkritischer Komponenten** und Lebenszyklusphasen bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung
(2) **Quantifizierung der Auswirkungen diverser Kreislaufmaßnahmen** auf unterschiedliche Nachhaltigkeitsmetriken mittels einer LCA-Anbindung
(3) **Unterstützung der Produktentwickler:innen** in dieser hochkomplexen Entwicklungssituation durch messbare, lebenszyklusorientierte und nachvollziehbare Nachhaltigkeitsmetriken
(4) **Auflösung von Zielkonflikten** in Bezug auf unterschiedliche, technische Gestaltungsmöglichkeiten und Kreislaufmaßnahmen im Lebenszyklus
(5) **Anforderungsableitung und Optimierung** der technischen Produktgestalt und des Lebenszyklus in Bezug auf deren Kreislauffähigkeit und Nachhaltigkeit

Die Subsysteme von *CycloP*, die die einzelnen Funktionen bereitstellen, sowie die darin enthaltenen Modelle und Algorithmen sind modular aufgebaut. Die Funktionalität der einzelnen Module ist somit unabhängig vom Gesamtkonstrukt gewährleistet. Die Algorithmen sind so entwickelt, dass sie allgemeingültig und branchenübergreifend eingesetzt werden können. Sie können daher ebenfalls in andere Softwarelösungen und IT-Systeme als funktionale

Erweiterung integriert werden. Die zugrundeliegenden Modelle der Beschreibungssprache sind wiederum so konzipiert, dass sie erweiterbar sind und beliebig kombiniert und ergänzt werden können. Die einzelnen Subsysteme (siehe Abbildung 16) werden nachfolgend detaillierter beschrieben.

3.4.2 Lebenszyklusmodellierung mit *CycloP*

Die *CycloP* Lebenszyklusmodellierung ist die softwaretechnische Umsetzung der Beschreibungssprache aus Kapitel 3.2. Sie ermöglicht die Modellierung von technischen Produktgestalten sowie dazugehörigen erwarteten Lebenszyklen. Die technische Produktgestalt ist dabei hierarchisch aufgebaut und bildet alle Komponenten ab, die im Produkt verbaut sind. Der Lebenszyklus wiederum stellt einen erwarteten Lebenszyklus für das Gesamtprodukt sowie alle enthaltenen Komponenten dar. Ein Zustand im Lebenszyklus kann somit für das gesamte Produkt oder nur für eine oder mehrere darunterliegende Komponenten relevant sein. Zum Beispiel ist der Schritt der Produktion einer Subkomponente vor dem Zusammenbau des Gesamtproduktes nur für diese eine Komponente relevant und wird nur von dieser durchlaufen. Zustände können genau wie Komponenten in der technischen Produktgestalt ebenfalls ineinander verschachtelt sein. Der Zustand „Produktion“ kann zum Beispiel weitere detailliertere Produktionsschritte enthalten und diese wiederum Zustände, die den Prozess genauer beschreiben. Daher ist das Lebenszyklusmodell hierarchisch aufgebaut. Im Lebenszyklus können zudem neben regulären Zuständen der Produktion oder Nutzungsphase auch kritische Zustände und Kreislaufmaßnahmen bis auf Komponentenebene modelliert werden.

Die beiden Modelle der technischen Produktgestalt und des Lebenszyklus bilden die Basis für die Analyse und Optimierung der Kreislauffähigkeit des Produktes. Um dies zu ermöglichen, können im Lebenszyklusmodell Aufwendungen in Form von Material und Energie eingepflegt werden, die Umweltauswirkungen haben und daher mittels des LCA-Moduls bewertbar gemacht werden sollen. Der Nutzer kann somit gebündelt alle nötigen Informationen in der Lebenszyklusmodellierung abbilden, die eine nachvollziehbare Nachhaltigkeits- und Kreislaufbewertung über den gesamten Lebenszyklus hinweg ermöglichen. Auf dieser Basis können dann im gesamten Lebenszyklus und der technischen Produktgestalt Schwachstellen und Optimierungspotenziale im Sinne der Kreislauffähigkeit und ökologischen Nachhaltigkeit identifiziert werden.

Die ***CycloP* Lebenszyklusmodellierung ermöglicht es** auf Basis der definierten Beschreibungssprache somit die:

(1) **Modellierung der technische Produktgestalten** inklusive aller für eine Nachhaltigkeitsbewertung relevanten Daten wie Masse und Material
(2) **Modellierung der probabilistische Lebenszyklen** inklusive kritischer Zustände und Kreislaufmaßnahmen
(3) **Zuweisung von Aufwendungen** in Form von Rohmaterialien und Energieverbräuchen entlang des Lebenszyklus, die eine Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit ermöglichen

(4) **Zuweisung der vom LCA-Modul berechneten potenziellen Umweltwirkungen** zu einzelnen Elementen des Lebenszyklusmodells und der technischen Produktgestalt, um eine zielgerichtete Optimierung zu ermöglichen

Um die Lebenszyklusmodellierung zielführend als Basis für die Analyse und Optimierung der Kreislauffähigkeit des Produktes zu verwenden, bedarf es einer Methode zur Lebenszyklusmodellierung. Abbildung 17 definiert dieses schrittweise iterative Verfahren basierend auf der Lebenszyklusmodellierung. Benutzer:innen beginnen mit der Modellierung der technischen Produktgestalt und des Lebenszyklus inklusive Aufwendungen. Mittels der Szenario-Generierung für Lebenszyklen (vgl. 3.4.3) und weiterer Algorithmik können die Informationen im Modell automatisiert zu einem geeigneten Eingabeformat – den Inventarlisten – für das LCA-Modul verarbeitet werden (vgl. 3.4.5). Die Ergebnisse der LCA werden automatisch zurückgespielt und in Form von Umweltauswirkungen den Elementen der Modelle zugewiesen. So kann zum Beispiel eine Verteilung der erwarteten LCA-Indikatorwerte für einen konkreten Produktionsschritt im Lebenszyklusmodell oder für eine spezifische Komponente und deren Lebenslauf berechnet und im Modell hinterlegt werden. Auf Basis dieser Umweltauswirkungen kann dann eine Analyse bezüglich nachhaltigkeitskritischer Komponenten oder Lebenszyklusphasen durchgeführt werden. Der Nutzer kann sich durch die Software identifizieren lassen, welche Komponenten noch Optimierungsbedarf aufweisen, welche Kreislaufmaßnahmen die Nachhaltigkeit steigern oder senken und im Allgemeinen Bedarfe der weiteren Optimierung erkennen. Sind die Kreislaufmaßnahmen und -strategien bestimmt, folgt die Anforderungsableitung aus denselben für die technische Produktgestalt und den Lebenszyklus: Welche Komponenten sollten noch einmal angepasst werden, um deren Kreislauffähigkeit zu steigern? Für welche Komponenten wurde in der aktuellen Iteration eine zielführende Kreislaufmaßnahme identifiziert? Welche Anforderungen, wie zum Beispiel die Zerlegbarkeit, muss die entsprechende Komponente nun erfüllen, um die Anwendung der identifizierten Kreislaufmaßnahme zu ermöglichen? Nach Annotation dieser Anforderungen an der Produktgestalt (siehe Beispiel in Abbildung 22) beziehungsweise nach der nötigen Anpassung beginnt der Optimierungskreislauf von Neuem. Dieses Verfahren wird wiederholt, bis Benutzer:innen ein für sie zufriedenstellendes Ergebnis erlangt haben und die ihnen gesetzten Nachhaltigkeits- und Kreislaufziele erreicht sind.

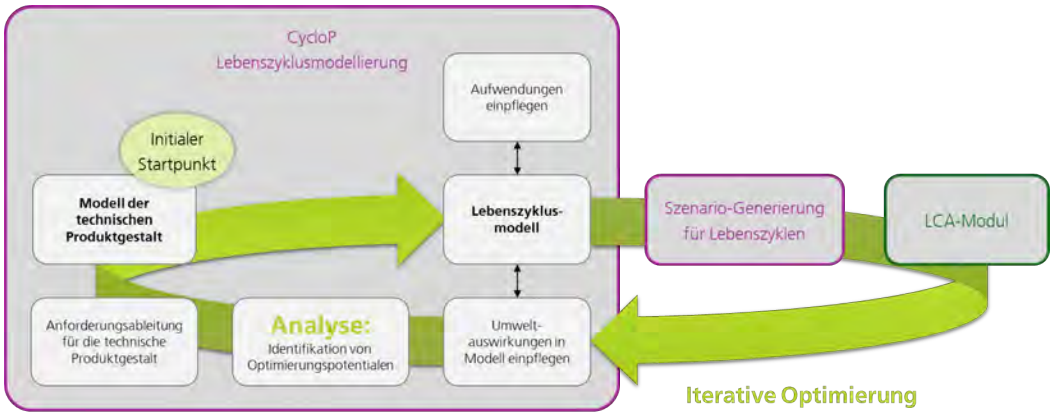


Abbildung 17: Iteratives Verfahren zur Analyse und Optimierung des Produktes und seines Lebenszyklus (eigene Darstellung)

Eine Benutzeroberfläche ermöglicht dem *CycloP*-Anwender:innen die einfache und zugängliche Erstellung, Navigation, Analyse und Optimierung der Modelle und des Produktes. Die Benutzeroberfläche unterstützt Benutzer:innen dabei, die im vorherigen Abschnitt definierte Methode zur Analyse und iterativen Optimierung auf Basis der Lebenszyklusmodellierung durch einen spezifischen Workflow anzuwenden. Hierfür existieren verschiedene Ansichten auf das Lebenszyklusmodell und das Produkt, die bei den einzelnen Schritten des Verfahrens unterstützen. Sie erlauben teilweise die Manipulation des Modells durch Werkzeuge oder stellen lediglich Informationen für die Analyse und Optimierung strukturiert bereit. Nachfolgend werden die entsprechenden Ansichten, Darstellungen und Werkzeuge näher beschrieben.

Die Ansicht zur Modellierung der technischen Produktgestalt basiert auf dem Konzept eines Produktstrukturbaums (vgl. Abbildung 8 in Kapitel 3.2). Das Produkt wird als hierarchisches Konstrukt bestehend aus einzelnen Komponenten abgebildet. Benutzer:innen können initial das Produkt als Komponente erstellen und dann einzelne Subkomponenten definieren und der technischen Produktgestalt hinzufügen. Jede erstellte Komponente basiert auf einem Komponententyp – zum Beispiel „Autotür“ oder „Schraube“. Diesen Typ können Benutzer:innen anlegen und dann beliebig viele Instanzen, also konkrete Komponenten, definieren. Zum Beispiel kann er im Falle eines Autos als Produkt vier Komponenten vom Typ „Autotür“ hinzufügen. Pro Komponente können Benutzer:innen zudem Materialgruppen definieren. Unter einer Materialgruppe wiederum können Materialien angelegt werden, aus denen die Komponente besteht. Dem Material wird wiederum ein Typ, eine Klasse, eine Maßeinheit und ein dazugehöriger Wert sowie der Verarbeitungsprozess und der Herkunftsort zugewiesen. Diese Daten werden vom LCA-Modul benötigt, um eine Ökobilanzierung durchzuführen. Sind diese in der frühen Entwicklungsphase nicht oder nur teilweise bekannt, werden die fehlenden Einträge vom *CycloP* Xtend Modul ergänzt (vgl. Kapitel 3.4.4).

Zur Modellierung des Lebenszyklus sowie zur Darstellung der zugehörigen technischen Produktgestalt gibt es ebenfalls eine spezifische Ansicht. In dieser können Benutzer:innen alle Elemente eines Lebenszyklus erstellen und miteinander in Beziehung setzen (vgl. Abbildung 18). Die Basis bilden hierbei die Zustände. Zu Beginn werden die regulären Zustände modelliert, die den erwarteten Lebenszyklus ohne Defekte oder andere unerwünschte Zustände abbilden. Die Zustände können über Pfeile sequenziell miteinander verknüpft werden, sodass sich eine zeitliche Abfolge ergibt. Die Verbindungen können mit einer Wahrscheinlichkeit versehen werden, die die Wahrscheinlichkeit darstellt, dass auf einen Zustand der abgebildete, nächste Zustand folgt. Den Zuständen kann ebenfalls eine Dauer zugewiesen werden.

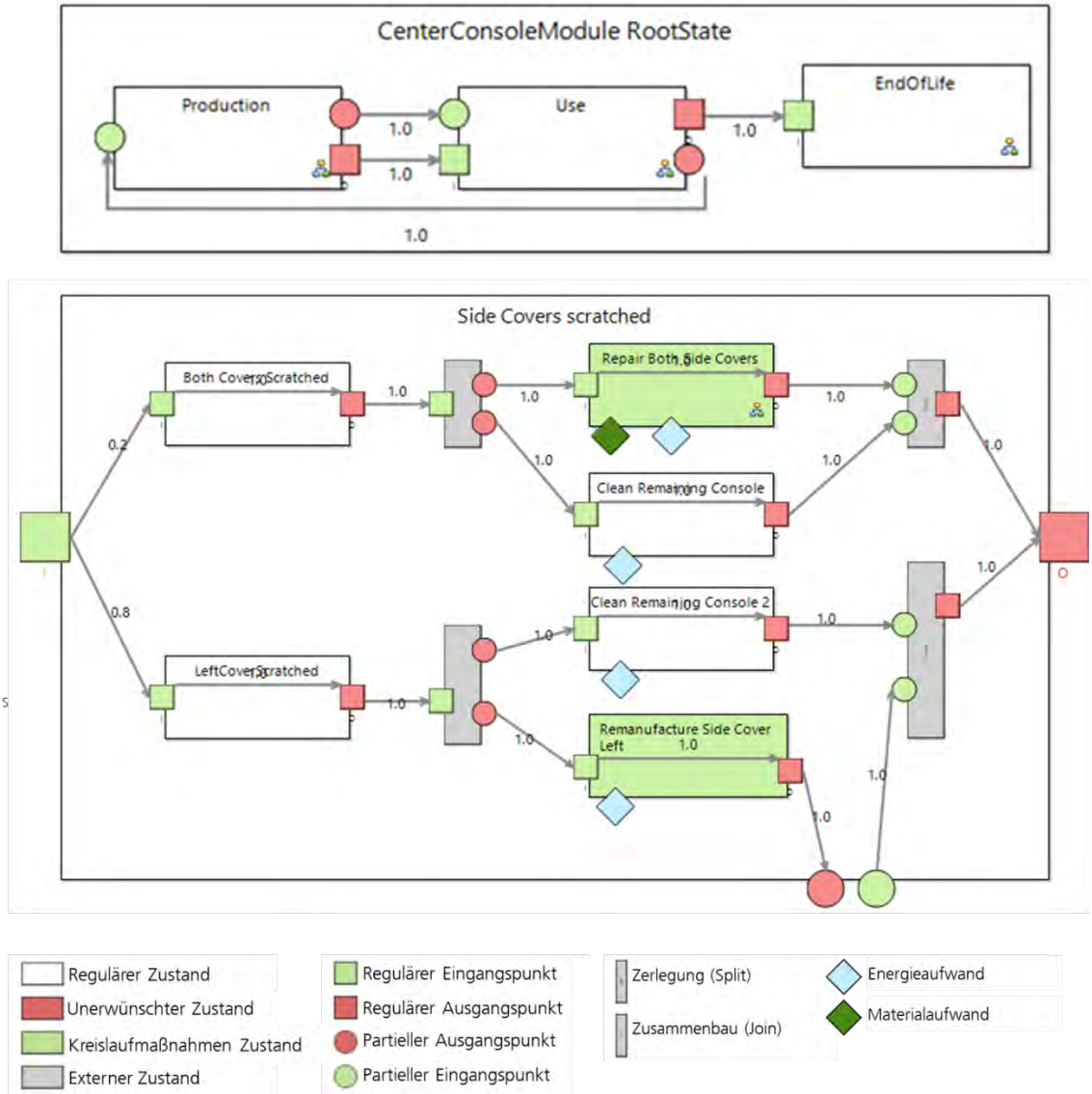


Abbildung 18: Darstellung der hierarchischen (jeweils zwei Ebenen) probabilistischen Lebenszyklen; oben: oberste Hierarchieebene des Lebenszyklus; unten: detailliertere Ansicht eines spezifischen Zustandes und dessen beinhalteter Subzustände (eigene Darstellung aus Capella)

Eine derartige Lebenszyklus-Ansicht bildet stets maximal zwei Hierarchieebenen eines Lebenszyklus ab. So kann in einer Darstellung stets ein Zustand und dessen direkte Subzustände abgebildet und modelliert werden. Um den Prozess innerhalb eines Subzustandes genauer zu definieren, müssen Benutzer:innen eine neue Ansicht für diesen Subzustand öffnen und hier wiederum weitere Zustände modellieren.

Neben den erwarteten regulären Zuständen können Benutzer:innen ebenfalls unerwünschte Zustände abbilden: Defektzustände oder Zustände, in denen das Produkt oder eine Komponente aus anderen Gründen nicht mehr wie geplant weiterverwendet werden kann oder soll. Darüber hinaus können Zustände modelliert werden, in denen gezielt Kreislaufmaßnahmen zur Auflösung unerwünschter Zustände angewandt werden. Bei einem derartigen Zustand hinterlegen Benutzer:innen eine konkrete Kreislaufmaßnahme, wie zum Beispiel eine Reparatur, die hier eingeplant wird. Allen Zuständen können zudem Aufwendungen in Form von Material oder Energie zugewiesen werden.

Während die im Verfahren folgende Szenario-Generierung für Lebenszyklen und die Berechnung der Ökobilanz durch das LCA-Modul im Hintergrund ohne eine Interaktion oder Darstellung mit *CycloP*-Nutzer:innen ablaufen, benötigt es für die Darstellung der Umweltauswirkungen wiederum eine darauf angepasste Darstellung. Diese Darstellung geschieht zum einen in den bereits bestehenden Ansichten integriert (vgl. Abbildung 19), zum Beispiel als Hinweise im Lebenszyklusmodell, welcher Zustand eine besonders gute oder schlechte Ökobilanz im Vergleich zum restlichen Lebenszyklus aufweist. Zum anderen gibt es dezidierte Analyse-Ansichten, die für jede Komponente oder Zustand gezielt erstellt werden können und die Verteilungen der Durchschnittswerte (vgl. Abbildung 20) oder erwarteten Ökobilanzwerte (vgl. Abbildung 21) anzeigen. So können Benutzer:innen Optimierungspotenziale identifizieren. Um dann auf die identifizierten Potenziale zu reagieren, nutzen Anwender:innen erneut die Ansicht, in der die Produktgestalt modelliert werden kann, sowie der zugehörige Lebenszyklus (vgl. Abbildung 18). Hier können sie nun Anpassungen vornehmen.

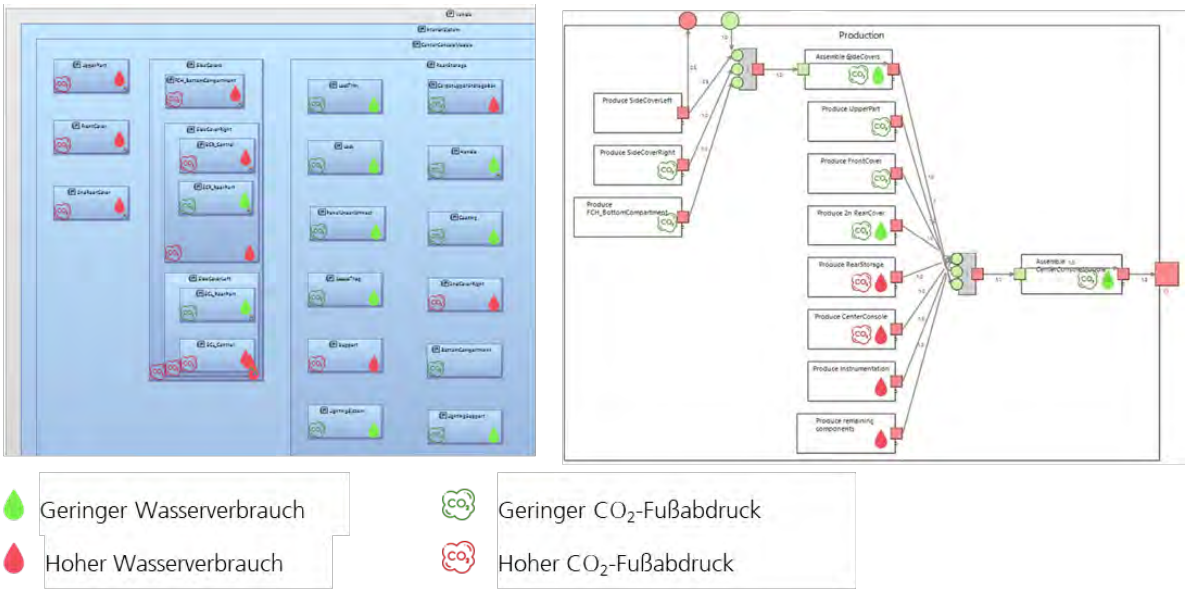


Abbildung 19: Eingefärbte Icons im Produktstrukturbaum (links) und Lebenszyklusdiagramm (rechts) zur Abbildung kritischer und unkritischer Komponenten oder Zustände in Bezug auf den Wasserverbrauch und den CO_2-Fußabdruck gemäß LCA-Ergebnissen als Basis der Optimierung (eigene Darstellung)

	Water Use (Total)	Water Use (Normailzed over lifetime)	Climate Change (Total)	Climate Change (Normailzed over lifetime)	Lifetime
circularStrategy.strategyModel	455,89 l	33,99 l per year	6,47 kg CO2 eq.	0,48 kg CO2 eq. per year	4895,43 days = 13,41 years
circular_sustainable_Strategy.strategyModel	412,54 l	30,51 l per year	5,88 kg CO2 eq.	0,44 kg CO2 eq. per year	4935,32 days = 13,52 years
linearStrategy.strategyModel	900,58 l	77,80 l per year	12,31 kg CO2 eq.	1,06 kg CO2 eq. per year	4225,09 days = 11,58 years
linear_sustainable_Strategy.strategyModel	813,92 l	70,94 l per year	11,08 kg CO2 eq.	0,97 kg CO2 eq. per year	4187,61 days = 11,47 years

Circular strategy – including circularity measures like repair, remanufacture,…
Circular sustainable strategy – including circularity measures like repair remanufacture AND using initially sustainable material selection
Linear strategy – NOT including circularity measures like repair, remanufacture,…
Linear sustainable strategy – NOT including circularity measures like repair remanufacture BUT using initially sustainable material selection

Abbildung 20: Ökobilanz-Durchschnittswerte zum Vergleich der Kreislauffähigkeit und Nachhaltigkeit verschiedener Strategien im Umgang mit dem Produkt über den Lebenszyklus hinweg (eigene Darstellung)

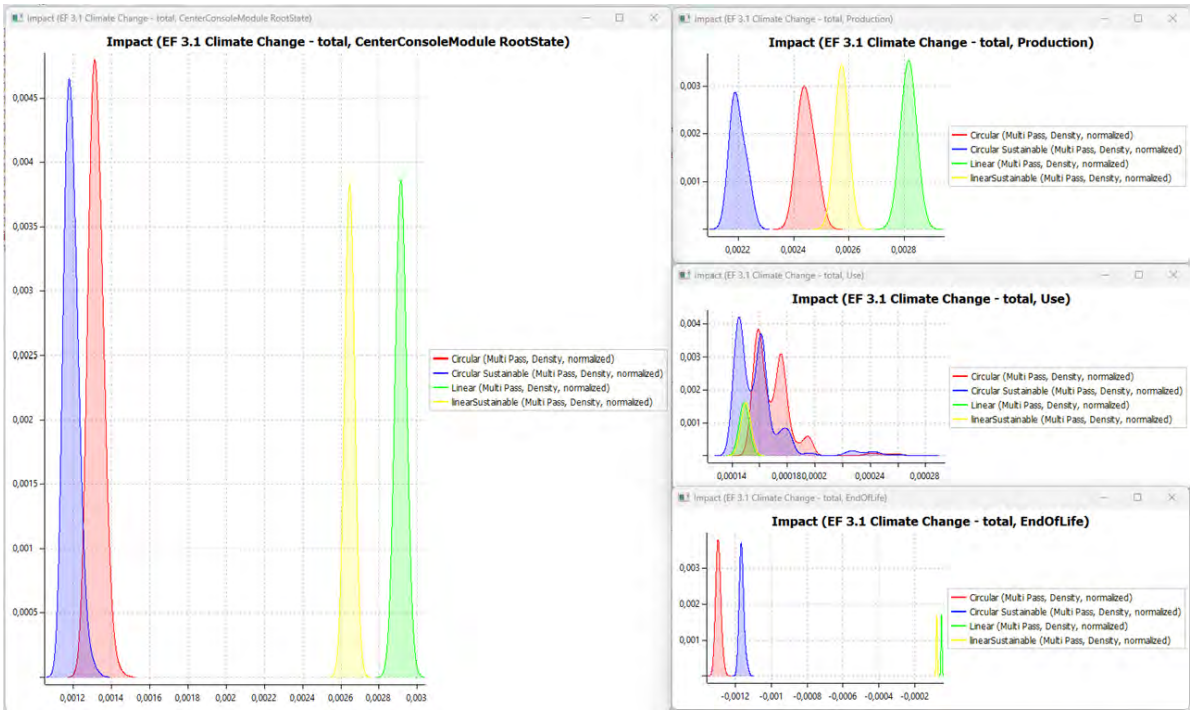


Abbildung 21: Verteilung des Ökobilanzwertes EF 3.1. Climate Change (CO_2-Fußabdruck) im Vergleich für verschiedene Strategien im Umgang mit dem Produkt über den gesamten Lebenszyklus hinweg (links) oder in Bezug auf einzelne Zustände wie Produktion, Nutzung und End of Life (rechts) (eigene Darstellung)

	Requirements
Repair Both Side Covers	Req. 5 (Repair): Das Bauteil muss über modulare Komponenten verfügen, die bei Bedarf leicht ausgetauscht oder ersetzt werden können, um die Reparatur zu
Remanufacture Side Cover Left	Req. 2 (Remanufacture): Die verwendeten Materialien des Bauteils müssen eine hohe Qualität aufweisen, um eine effektive Wiederaufbereitung und Neuproduk
Repair Both Side Covers	Req. 2 (Repair): Die Struktur des Bauteils muss robuste Verbindungen aufweisen, die eine einfache und sichere Durchführung von Reparaturen ermöglichen.
Remanufacture Side Cover Left	Req. 5 (Remanufacture): Es müssen spezifische Anforderungen an die Wiederherstellung der Funktionalität des Bauteils definiert sein, um sicherzustellen, dass
Remanufacture Side Cover Left	Req. 4 (Remanufacture): Das Bauteil muss so gestaltet sein, dass alle relevanten Informationen zur Nachverfolgbarkeit und zur Qualitätssicherung während des
Repair Both Side Covers	Req. 3 (Repair): Das Bauteil muss aus Materialien bestehen, die für Reparaturverfahren wie Schweißen, Kleben oder Ersetzen geeignet sind.
Remanufacture Side Cover Left	Req. 1 (Remanufacture): Das Bauteil muss so konstruiert sein, dass es nach der Nutzung einfach zerlegt und in seine Einzelkomponenten zurückgeführt werde
Remanufacture Side Cover Left	Req. 3 (Remanufacture): Das Bauteil muss über eine modulare Bauweise verfügen, die eine flexible Anpassung und Integration neuer Technologien während de
Repair Both Side Covers	Req. 4 (Repair): Es müssen klare Anleitungen und Dokumentationen zur Verfügung gestellt werden, die den Reparaturprozess detailliert beschreiben und die erf
Repair Both Side Covers	Req. 1 (Repair): Das Bauteil muss so konzipiert sein, dass es bei Beschädigungen oder Funktionsstörungen einfach ausgebaut, zerlegt und repariert werden ka

Abbildung 22: Anforderungsableitung basierend auf den angewandten Kreislaufmaßnahmen für die betroffenen Komponenten der Produktarchitektur (eigene Darstellung)

3.4.3 Szenario-Generierung

Die Szenario-Generierung ermöglicht die Diskretisierung der Daten aus dem probabilistischen Lebenszyklusmodell zur Weitergabe an das LCA-Modul für die Ökobilanzierung. Die Modellierung probabilistischer Lebenszyklen ermöglicht die Abbildung der Unsicherheiten und Variabilität realer Produktlebensläufe in frühen Phasen. Um auf dieser nicht-deterministischen Datenbasis nun eine Ökobilanzierung durchzuführen, könnte man auf probabilistische Methoden in der Ökobilanzierung zurückgreifen, die dann die Unsicherheiten berücksichtigen. Im Rahmen von *CycloP* wird jedoch eine zentrale Verwaltung und das einheitliche Management der Unsicherheiten und Variabilität im *CycloP*-Software-Werkzeug selbst umgesetzt. Dies bietet die Möglichkeit, Unsicherheiten korrekt auszuwerten. Außerdem können diese dem Nutzer besser vermittelt werden und es kann klar aufgezeigt werden, welche Werte genauer bestimmt werden konnten oder aber auch, woher die verbleibenden Unsicherheiten stammen.

So kann zum Beispiel die Information transportiert werden, dass für eine bestimmte Komponente das Intervall der möglichen Ökobilanzergebnisse noch recht breit ist, da kein Material für diese Komponente angegeben wurde. Benutzer:innen können auf diese Information reagieren und zum Beispiel die Unsicherheit durch eine genauere Angabe von Informationen über die Komponente selbst reduzieren oder die Unsicherheit mindestens in ihre Entscheidungen mit einbeziehen. Da die Unsicherheiten im Softwarewerkzeug selbst verwaltet und berücksichtigt werden, arbeitet das angebundene LCA-Modul nicht probabilistisch und die Daten zur Ökobilanzierung müssen von der Szenario-Generierung diskretisiert werden. Das Szenario-Generierungs-Modul erzeugt hierfür auf Basis des Lebenszyklusmodells konkrete deterministische Szenarien – die sogenannten deterministischen Lebenszykluspfade (siehe Abbildung 23). Ein deterministischer Lebenszykluspfad stellt einen konkreten, möglichen Lebenszykluspfad für ein Produkt inklusive aller seiner Subkomponenten dar. Im Vergleich zu der probabilistischen Modellierung sind die deterministischen Lebenszykluspfade kognitiv leichter nachzuvollziehen. Zyklische Abläufe im Lebenszyklus werden durch mehrfach vorkommende, eindeutig referenzierte Prozesselemente (z. B. Zustände, Übergänge) in eine lineare Struktur überführt. Für jeden modellierten Lebenszyklus werden dementsprechend mehrere deterministische Lebenszykluspfade erzeugt, die jeweils einen möglichen Weg des Produkts beschreiben.

Auf Basis der deterministischen Lebenszykluspfade können dann Inventarlisten für die Ökobilanzierung im LCA-Modul generiert werden. Diese Listen enthalten eine strukturierte Auflistung aller im Lebenszykluspfad anfallenden Material- und Energieaufwendungen, die für die Ökobilanzierung relevant sind. Pro Zeile werden eine Aufwendung und die zugehörige Komponente sowie der Zustand, in dem sie anfällt, angegeben. Die Aufwendung selbst wird durch die Angabe des Materialtyps, der Materialklasse, der Maßeinheit und eines dazugehörigen Wertes, der Verarbeitung und des Herkunftsorts spezifiziert. Des Weiteren wird die Unsicherheit der Lebenszyklusdaten angegeben, die aus den Unsicherheiten im Lebenszyklus und den Unsicherheiten durch fehlende Angaben des Nutzers in der Inventarliste resultiert. Die Informationen der Inventarlisten werden im LCA-Modul verarbeitet und eine spezifische Ökobilanzierung auf Komponenten- und Zustands-Ebene durchgeführt.

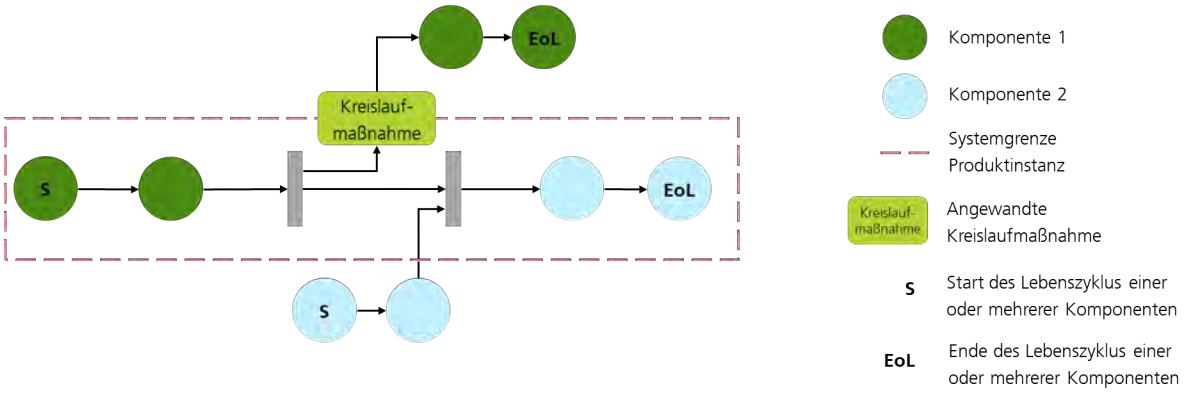


Abbildung 23: Deterministischer Pfad einer Produktinstanz auf Basis des Lebenszyklusmodell – Nutzung zweier verschiedener Instanzen einer Komponente (grün und blau) über den Lebenszyklus des Gesamtproduktes. Komponente 1 (grün) verlässt das System der Produktinstanz nach einer Kreislaufmaßnahme (Beispiel reuse) und die neue Komponente (blau) ersetzt die alte und vervollständigt die Produktinstanz wieder (eigene Darstellung)

Die Generierung der deterministischen Lebenszykluspfade wird mittels eines spezifischen Solver-Algorithmus durchgeführt. Die Herausforderungen für diesen Algorithmus liegen darin, dass (1) auf Basis eines probabilistischen Modells einzelne deterministische Pfade ausgewählt werden müssen, (2) dabei die Abhängigkeiten zwischen Hierarchiestrukturen in der Produktgestalt und dem Lebenszyklus beachtet werden müssen und (3) die Auswahl von Pfaden für Komponenten über Systemgrenzen hinweg erfolgen muss. Die Betrachtung der Hierarchieebenen ist nötig, da die möglichen Pfade einer Komponente und vor allem deren Wahrscheinlichkeit direkt von den möglichen Pfaden der Subkomponenten und deren Wahrscheinlichkeit abhängen. Systemgrenzen wiederum sind zu beachten, da diese von Komponenten zum Beispiel im Falle eines *Reuse* in einem anderen Produkt überschritten werden. Das System, das aktuell modelliert und optimiert wird – also das System, welches das aktuelle Produkt abbildet – wird verlassen. Genauso kann eine Komponente aber auch vor dem Einsatz im aktuellen Produkt bereits Teil eines anderen Systems gewesen sein und jetzt im aktuellen Produkt durch die Kreislaufmaßnahme *Reuse* wiederverwendet werden. Das Überschreiten der Systemgrenzen durch Komponenten ist relevant, da sich die beteiligten Systeme gemeinsam für Material- und Energieaufwendungen entlang des Lebenszykluspfades der Komponente verantworten müssen. Bei einer Komponente, die für das erste System initial produziert wird, aber in einem weiteren System Verwendung findet, muss sich gegebenenfalls nicht nur das erste System für die Produktionsaufwendungen gegenüber der Ökobilanzierung verantworten, sondern anteilig auch das zweite System, das die Komponente nutzt. Diese Verteilung von Aufwendungen und Verantwortlichkeiten nennt man Allokation. Die Allokation ist ein etabliertes Instrument in der Lebenszyklusanalyse (LCA). Die Herausforderung ist dabei, die Umweltbelastungen und -vorteile „gerecht“ auf mehrere Produktsysteme, Prozesse oder Lebenszyklusphasen zu verteilen [2].

Durch die genannten drei Spezialfälle und die diversen Möglichkeiten im Lebenszyklus entsteht dann ein sehr großer Lösungsraum, in dem mittels passender Solver-Algorithmik gezielt die wahrscheinlichsten deterministischen Lebenszykluspfade für das Produkt inklusive seiner Subkomponenten gezogen werden müssen. In *CycloP* kommt dabei eine erweiterte Variante der Monte Carlo Simulation zum Einsatz. Im Grundsatz wird zuerst eine klassische Monte Carlo Simulation einzelner deterministischer Lebenszykluspfade durchgeführt. Speziell ist hierbei, dass dieses Sampling nur für jeweils eine Komponente inklusive aller ihrer direkten Subkomponenten erfolgt. Es wird also nur eine Ebene in der Produkthierarchie berücksichtigt. Die einzelnen selektierten Lebenszykluspfade pro Komponente müssen dann zu einem Pfad für das gesamte Produkt inklusive aller seiner Subkomponenten zusammengeführt werden. Da die Pfade stets für eine Komponente inklusive ihrer direkten Subkomponenten gezogen wurden, entsteht eine Überlappung der Pfade benachbarter Hierarchieebenen. Diese Überlappung wird für das Zusammenführen der einzelnen Pfade über die Hierarchieebenen hinweg genutzt. Die Wahrscheinlichkeit für den Lebenszykluspfad einer Komponente ergibt sich dann aus der Wahrscheinlichkeit für die Pfade ihrer direkten Subkomponenten.

Das schrittweise Vorgehen des Solver-Algorithmus ist demnach:

(1) Das Sampling von deterministischen Lebenszykluspfaden für jeweils eine Komponente inklusiver ihrer direkten Subkomponenten mittels Monte Carlo Simulation basierend auf dem probabilistischen Lebenszyklusmodell
(2) Die Ermittlung und Zuweisung von Wahrscheinlichkeiten für die deterministischen Lebenszykluspfade aller Komponenten, die keine Endknoten der Baumstruktur in der technischen Produktgestalt sind. Dies erfolgt durch die Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten der Endknoten bzw. ihrer direkten Subkomponenten.
(3) Die wahrscheinlichkeitsbasierte Zusammenführung der vollständigen deterministischen Lebenszykluspfaden basierend auf den gezogenen Einzelpfaden pro Komponente.

3.4.4 *CycloP* Xtend

Das Softwarewerkzeug *CycloP* operiert auf der physischen Struktur eines Produkts und modelliert den dazu gehörigen Lebenszyklus. Die Ökobilanzierung (vgl. LCA-Modul, Kapitel 3.4.5) dieses Produkts erfordert allerdings eine vollständige technische Produktgestalt. Gerade in frühen Phasen der Entwicklung ist diese Produktstruktur jedoch oftmals nicht vollständig ausdefiniert [3]: In dieser Phase sind Module beispielsweise noch nicht detailliert ausgearbeitet, Materialien und Massen noch nicht für alle Bauteile festgelegt, und Teile des Produkts sind lediglich schematisch skizziert oder semantisch angerissen. Beispielsweise könnte im Strukturbaum der Mittelkonsole lediglich das Modul „Armlehne“ vermerkt sein, ohne eine weitere technische Definition, Subkomponenten oder Materialien und Massen.

Um dennoch eine aussagekräftige Lebenszyklusanalyse durchführen zu können, setzt hier das Modul *CycloP* Xtend an. Es generiert auf Basis des bereits definierten, aber noch unvollständigen Produktstrukturbaums mögliche Varianten des Produkts. Jede dieser Varianten wird durch das LCA-Modul hinsichtlich ihrer potenziellen Umweltwirkungen analysiert. Die Analyseergebnisse der verschiedenen Varianten werden dann als Ergebniskorridore in die Lebenszyklusmodellierung von *CycloP* zurückgespielt und fließen in die Verteilungen (vgl. Abbildung 21) der LCA-Bewertung ein.

Ein Vorteil von *CycloP* besteht darin, dass die Lebenszyklusbeschreibung sowie die LCA bereits eine probabilistische Darstellung und Auswertung der Gegebenheiten im Lebenszyklus unterstützen (vgl. 3.4.2 und 3.4.5). Dadurch können auch die Unsicherheiten, die aufgrund der noch nicht final ausdefinierten Modellbestandteile verarbeitet und dargestellt werden. *CycloP* berücksichtigt dementsprechend zwei Arten von Unsicherheiten (vgl. Abbildung 24): Einerseits die aleatorische Unsicherheit, die die Ungewissheit darüber beschreibt, welches individuelle Produkt welchen genauen Lebenszykluspfad durchlaufen wird (vgl. Szenario-Generierung Kapitel 3.4.3). Andererseits gibt es die epistemologische Unsicherheit, die daraus resultiert, dass das Produkt noch nicht vollständig ausgestaltet ist. Die epistemologische Unsicherheit wird durch *CycloP* Xtend quantifiziert, während die Beschreibungssprache für Lebenszyklen die aleatorische Unsicherheit beschreibt.

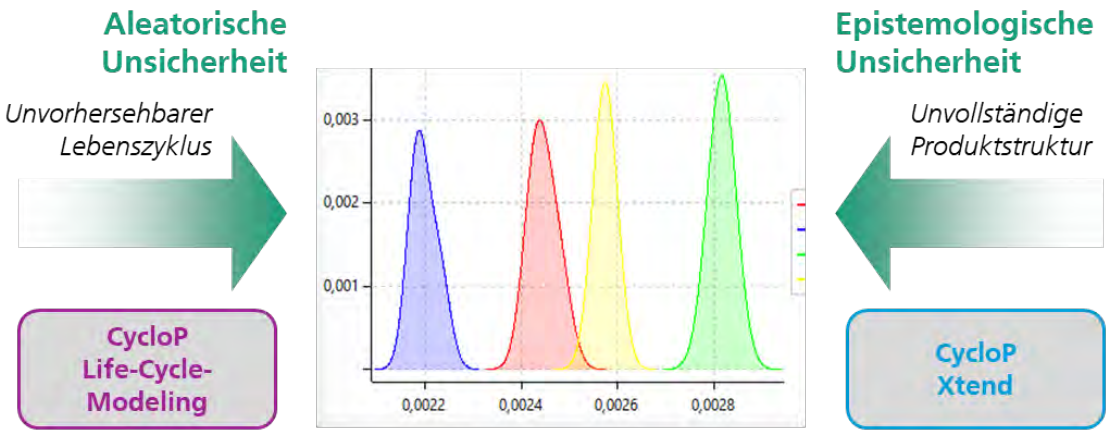


Abbildung 24 - Die zwei Arten der Unsicherheit, die CycloP berücksichtigen und abbilden kann

Durch gezielte Entwicklungsentscheidungen kann die epistemologische Unsicherheit reduziert und die Nachhaltigkeit sowie die Kreislauffähigkeit des Produkts direkt beeinflusst werden; Entwickler:innen achten darauf, die Intervalle der möglichen Ökobilanzergebnisse bei der Weiterentwicklung der Produkte positiv zu beeinflussen.

Zur Generierung der vollständigen Produktstrukturvarianten nutzt das Modul *CycloP* Xtend Referenzdaten von technischen Produktgestalten ähnlicher oder identischer Produkte aus Vorgänger- oder Referenzprodukten. Dabei werden die Anzahl, der Typ sowie die Zusammensetzung der Produktstrukturen in einem bayesschen Netz kodiert. Jede physische Produktarchitektur wird als Baumstruktur verstanden, wobei das bayessche Netz die Wahrscheinlichkeit kodiert, dass ein Kind-Knoten einem Eltern-Knoten zugeordnet ist. Der Scope des bayesschen Netzwerks beschränkt sich somit jeweils auf zwei Ebenen des Baumes: die Ebene des Eltern-Knotens und die des Kind-Knotens (vgl. Abbildung 25).

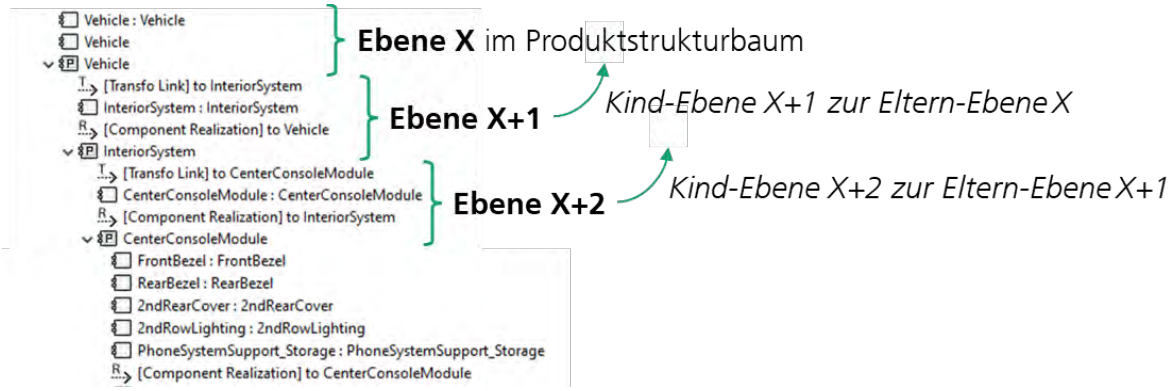


Abbildung 25 - Beispielhafte Ebenen in einem Produktstrukturbaum, wie sie im bayesschen Netz kodiert werden (eigene Darstellung)

Für die Kodierung der Produktstrukturen im bayesschen Netz werden spezifische Parameter herangezogen, darunter die Art und der Name des Eltern-Knotens sowie die Anzahl, Art, Menge und Namen der Geschwister-Knoten. Die physischen Produktstrukturbäume im Referenzdatensatz werden dafür in ihre Ebenen zerlegt und zur Parametrisierung des bayesschen Netzwerks verwendet.

Die Generierung der Varianten erfolgt dann in zwei Schritten: Im ersten Schritt wird mithilfe des bayesschen Netzes und der im aktuellen Modellentwurf bereits vom Entwickler:in definierten Komponenten eine unstrukturierte Menge noch hinzuzufügender Komponenten für die Variante, einschließlich ihres Typs, Masse und Material, erzeugt. Der zweite Schritt ist iterativ: Für jede mögliche Kombination aus bereits definierten und gerade generierten Komponenten wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass eine bereits definierte Komponente die Eltern-Komponente der neu generierten Komponente ist. Diese Wahrscheinlichkeitsberechnung ist im bayesschen Netzwerk kodiert und kann daraus abgeleitet werden. Um Innovationen bei der Generierung neuer Varianten zu berücksichtigen, wird jeder möglichen Kombination außerdem eine Basiswahrscheinlichkeit zugewiesen, die ihre prinzipielle Möglichkeit sicherstellt.

Anschließend wird basierend auf diesen Wahrscheinlichkeiten zufällig eine dieser Eltern-Kind-Beziehung ausgewählt und dem Modell der Variante hinzugefügt. Die Wahrscheinlichkeiten werden aktualisiert, und der Vorgang wird fortgeführt, bis alle generierten Komponenten in der Variante integriert sind. Auf diese Weise ist es möglich, prinzipiell beliebig viele, unterschiedliche Varianten zufällig zu generieren, die sowohl die Referenzdaten als auch innovative neue Ansätze berücksichtigen.

Um sicherzustellen, dass die Referenzdaten repräsentativ für die aktuelle Entwicklungsstrategie des Unternehmens sind, werden die Daten zusätzlich gewichtet. Dabei wird einem spezifischen Prinzip gefolgt, das verschiedene Kriterien jeweils mit einer Skala zwischen 0 und 1 berücksichtigt:

(1) **Alter der Daten**: Die Daten werden absteigend nach ihrem Alter gewichtet. Daten, die älter als sechs Jahre sind, werden mit 0 bewertet, während Daten, die nicht älter als sechs Monate sind, mit 1 bewertet werden.
(2) **Vorhandene Zuordnung von R-Strategien**: Referenzdatensätze, in denen bereits R-Strategien auf Komponentenebene zugewiesen sind, erhalten eine höhere Bewertung als solche ohne diese Zuordnung.
(3) **Häufigkeit der Bestellung oder Herstellung**: Die Häufigkeit, mit der eine spezifische Variante im Referenzdatensatz bestellt oder hergestellt wurde, beeinflusst die Gewichtung. Je häufiger eine Nennung erfolgt, desto höher die Wahrscheinlichkeit.
(4) **Vollständigkeit der Daten**: Die Vollständigkeit der Informationen im Referenzdatensatz, die für eine LCA-Berechnung benötigt werden, wird ebenfalls auf einer Skala von 0 bis 1 bewertet.
(5) **Nennungen einzelner Komponenten und zugehöriger Materialien**: Ähnlich wie bei der Häufigkeit der Bestellung oder Herstellung wird die Summe der Nennungen einzelner Materialien gebildet und auf eine Skala von 0 bis 1 normiert. Die Frequenz dieser Nennungen wird zur Gewichtung des Modells bzw. der Komponente herangezogen.

Diese Gewichtung der Referenzdaten trägt dazu bei, dass die generierten Varianten sowohl die Relevanz und Aktualität der Daten als auch die strategischen Ziele des Unternehmens widerspiegeln.

Das Softwaresubsystem *CycloP* Xtend wurde bislang lediglich prototypisch umgesetzt und nur grundlegend für die Produktstruktur der Mittelkonsole getestet. Aus diesem Grund ist es aktuell auch noch nicht vollständig in der Software *CycloP* integriert. Die vorhandenen Erfahrungen weisen allerdings bereits darauf hin, dass der vorhandene Algorithmus noch Verbesserungspotenziale beinhaltet: Diese liegen insbesondere im Bereich duplizierter Komponenten (d. h. Komponenten kommen „unrealistisch oft“ vor) sowie der Berücksichtigung von Ebenenübergreifender Zwangsbedingungen.

3.4.5 Life Cycle Assessment (LCA) - Modul

Die Ökobilanzierung (engl. Life Cycle Assessment, kurz LCA) ist eine international anerkannte, standardisierte Methode zur Berechnung der potenziellen Umweltwirkungen unterschiedlichster Produktsysteme, die branchenübergreifend Anwendung findet (vgl. ISO 14040 [4] u. 14044 [5]). Üblicherweise werden dafür dezidierte LCA-Software und -Datenbanken verwendet. Für die vorliegende Softwarelandschaft wird ein LCA-Modul konzipiert, das sich über zwei Schnittstellen in die Architektur einfügt (vgl. Abbildung 16) und dessen Konzept in Kapitel 3.3 näher beschrieben wird. Das Ziel des LCA-Moduls ist die Berechnung von Umweltauswirkungen in Form verschiedener LCA-Indikatoren zur Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit. Grundlage dafür sind die Inventarlisten, die vom Modul zur Szenario-Generierung für Lebenszyklen von *CycloP* erstellt werden. Jede Berechnung bezieht sich auf ein generiertes Szenario, also einen deterministischen Pfad. Somit liefert das LCA-Modul die Basis zur objektiven Bewertung verschiedener Produktvarianten und Kreislaufstrategien in dem iterativen Verfahren zur Analyse und Optimierung von Produkten (vgl. Abbildung 17). Das LCA-Modul hat hierfür eine Schnittstelle zu der Hauptsystemarchitektur von *CycloP*, um die Inventarlisten zu empfangen und Ergebnisse der LCA an die Software zurückzuspielen.

Das LCA-Modul verarbeitet die Informationen eines deterministischen Lebenszykluspfades und der zugehörigen Produktinstanz, die von *CyloP* in eine möglichst vollständige und automatisiert lesbare Liste – die Inventarliste - für die LCA aufbereitet werden. Die Inventarlisten ermöglichen eine strukturierte Darstellung von Produkt- und Lebenszyklusinformationen wie Materialtypen, Herstellungsprozesse, Produktionsländer und Mengen in einem für die LCA-Auswertung geeigneten Format. Im LCA-Modul werden nun die Listeneinträge semi-automatisiert mit vorab ausgewählten und modellierten LCA-Datensätzen aus verbundenen Datenbanken abgeglichen und auf Basis einer (anpassbaren) Mapping-Logik verknüpft. Das heißt, für Materialdaten aus den Inventarlisten werden möglichst ähnliche Materialdaten in der LCA-Datenbank gesucht, für die es dann Werte zur Ökobilanzierung gibt. Es wird zum Beispiel ein Stahl mit der gleichen Herstellungsart und dem gleichen Herstellungsland in der Datenbank gesucht, um über die Menge die Umweltauswirkungen hierfür zu berechnen. Die Struktur ist so konzipiert, dass sie auf Durchschnittswerte oder generische Datensätze zurückgreifen kann, wenn keine passenden spezifischen Datensätze verfügbar sind. Das LCA-Modul bewertet hierbei die Qualität der Datensatzzuordnung („Mapping Quality“) basierend auf den verfügbaren Informationen angelehnt an die durch den EU Product Environmental Footprint PEF vorgegebene Methodik zur Bewertung der LCA-

Datenqualität [6, 7]. Zusätzlich wird die Datenqualität des verwendeten LCA-Datensatzes gemäß eines Data Quality Ratings (DQR) an *CycloP* zurückgespielt.

In der zentralen Berechnungseinheit des LCA-Moduls werden anschließend die standardisierten Schritte der Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) gemäß den ISO Normen durchgeführt (vgl. ISO 14040 [4] u. 14044 [5]). Die so berechneten Indikatorwerte werden an *CycloP* in einem erweiterten Format der Inventarlisten zurückgespielt (vgl. Kapitel 3.3, insbesondere Abschnitt 3.3.6).

Insgesamt handelt es sich, wie in der Ökobilanz üblich, um einen iterativen Prozess, der mit fortschreitender Modellierung in *CycloP* immer wieder durchlaufen wird. Die Interpretation der LCA-Ergebnisse erfolgt integriert mit anderen Bewertungsmetriken in *CycloP*. Zusätzlich ermöglicht das LCA-Modul die Ergebnisinterpretation und aggregierte Bewertung auf verschiedenen Ebenen – z. B. nach Produktstruktur oder Lebenszyklusphase – und unterstützt so die vergleichende Analyse von R-Strategien und Produktgestalten. Eine beispielhafte Visualisierung und Ergebnisinterpretation wird im Rahmen der entwickelten Mittelkonsole in Kapitel 4.6 vorgestellt.

3.4.6 Rollenkonzept für das Entscheidungsunterstützungstool *CycloP*

Für das Entscheidungsunterstützungstool müssen Anforderungen identifiziert werden, die aus Sicht der Anwender praxisrelevant sind. Dabei muss eine enge Abstimmung zwischen den verschiedenen Prozessbeteiligten erfolgen, um unterschiedliche Expertenperspektiven zu integrieren und potenzielle Zielkonflikte frühzeitig zu erkennen. Insbesondere muss sichergestellt werden, dass das Tool nicht nur technische Anforderungen erfüllt, sondern auch wirtschaftliche und zirkuläre Aspekte berücksichtigt, um einen echten Mehrwert für alle Beteiligten zu bieten.

Vor der Entwicklung der Software sind die Nutzer und Rollen zu definieren, die mit dem System interagieren werden. Rollen schützen sensible Informationen, verbessern die Benutzererfahrung und ermöglichen die Ausrichtung der Arbeitsabläufe auf die Ziele verschiedener Nutzer:innen, speziell Entwickler:innen, die an einem zirkulären und nachhaltigen Produktentwicklungsprozess beteiligt sind. Ein zentrales Problem besteht darin, die Vielzahl an Aktivitäten innerhalb des Produktentwicklungsprozesses so zu erfassen und zu strukturieren, dass klar abgegrenzt werden kann, in welchen Phasen das Tool konkret unterstützen soll [8, 9]. Das Rollenkonzept wurde im Rahmen des Projekts entwickelt und in Schwahn et al. [10] publiziert.

3.4.6.1 Lösungsansatz zur Definition des Rollenkonzepts

Die grundlegende Anforderung an die Rollen ist, spezifische Aufgaben innerhalb zirkulärer und nachhaltiger Engineering-Prozesse zu beschreiben [11–13]. Alle Rollen müssen Aufgaben und Anforderungen beschreiben, die grundsätzlich durch eine MBSE-Software im Kontext des beschriebenen Entwicklungsprozesses dargestellt werden können. Folgende Kriterien für die

Beschreibung der Rollen sind notwendig, damit diese für die praktische Anwendung ausreichend sind [10]:

- Softwareunabhängig: Die Rollen sollten unabhängig von spezifischen Software-Tools sein. Eine toolunabhängige Gestaltung der Rollen schafft Flexibilität über verschiedene Plattformen und Technologien hinweg und erleichtert die Anpassung an technologische Veränderungen sowie den Wechsel von Tools.
- Prozess- und organisationsinvariant: Die Rollen müssen in unterschiedlichen Entwicklungsprozessen und Organisationen einsetzbar sein, damit sie sowohl für lineare inkrementelle als auch für iterative Entwicklungsmodelle eignen und eine hohe Flexibilität für agile, klassische oder hybride Ansätze bieten.
- Vollständig: Alle Aufgaben sollten eine nachhaltige und zirkuläre Produktgestaltung abdecken. Dadurch wird sichergestellt, dass bei der Implementierung des Rollenmodells, sowohl innerhalb einer Organisation als auch in der Software, keine zentralen Aspekte der nachhaltigen und zirkulären Gestaltung außer Acht gelassen werden. Daher ist es entscheidend, die Rollen auf ihre Vollständigkeit hinsichtlich der spezifischen Aufgaben zu prüfen, die für einen nachhaltigen Produktentwicklungsprozess erforderlich sind [14, 15].
- Klar: Aufgaben, Verantwortlichkeiten und Entscheidungsbefugnisse müssen klar definiert sein [16, 17]. Dies verhindert Verwirrung und Ineffizienz und stärkt die Effektivität der Rollenimplementierung und -ausführung.
- Nicht überlappend: Überschneidungen in ihrer Ausgestaltung sind zu vermeiden. Das Kriterium „Eindeutigkeit“ zielt darauf ab, jede Rolle klar verständlich zu machen, während das Kriterium „Nicht überlappend“ sicherstellt, dass die Rollen in ihrer Gesamtheit klar voneinander abgegrenzt sind. Um eine vollständige, präzise und überschneidungsfreie Definition der Rollen zu gewährleisten, ist eine besondere Aufmerksamkeit auf die Schnittstellen zwischen den Rollen erforderlich [18].

Das Münchener Vorgehensmodell (MVM) [18] (siehe Abbildung 26) wurde als methodischer Rahmen herangezogen, um eine nutzerorientierte Struktur zur Konzeptualisierung der Vision des Entscheidungsunterstützungstools zu erarbeiten.

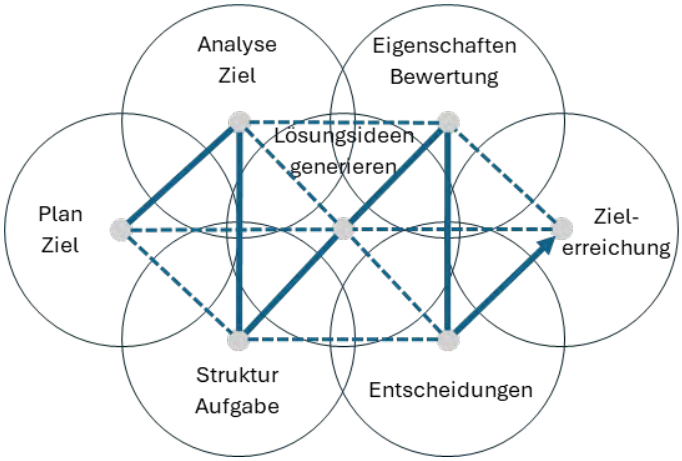


Abbildung 26: Münchner Vorgehensmodell [18]

Auf Basis, der im MVM definierten Aktivitäten erfolgt eine rollenbasierte Betrachtung, bei der typische Nutzerrollen entlang des Produktentwicklungsprozesses identifiziert und ihren jeweiligen Aufgaben zugeordnet werden (vgl. Abbildung 27). Durch die Definition der Rollen – wie z. B. „Problemanalysierender Kreislaufwirtschaft“, „Lösungsentwickler Kreislaufwirtschaft“ oder „Qualitätsprüfer Kreislaufwirtschaft“ – lassen sich Anforderungen gezielt aus Sicht der späteren Anwender ableiten. Die Zuordnung konkreter Aktivitäten (z. B. „Lösungsideen ermitteln“, „Zielerreichung absichern“) zu den jeweiligen Rollen schafft Klarheit darüber, an welchen Prozessschritten das Tool unterstützen soll.

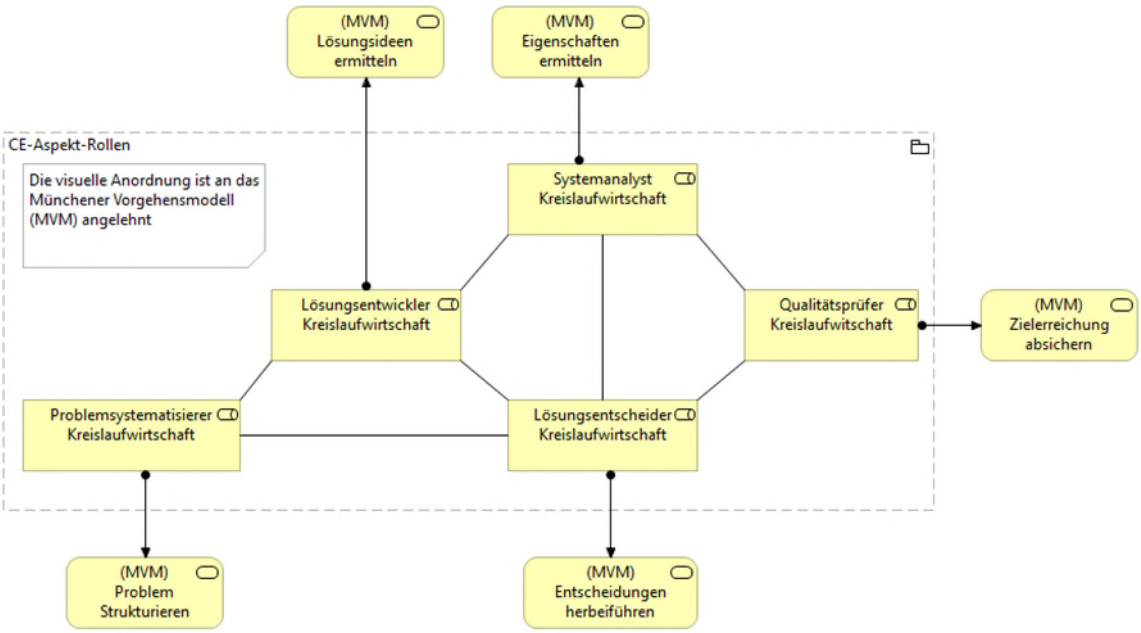


Abbildung 27: Rollen nach dem Münchener Vorgehensmodell (eigene Darstellung)

Abbildung 28 zeigt die gruppierten Anforderungen entlang des Produktentwicklungsprozesses, gegliedert in Phasen wie „Problemsystematisierer“-, „Systemanalyst“- oder „Lösungsentwickler“-Kreislaufwirtschaft. Jede Anforderung ist dabei spezifischen Rollen zugeordnet. Farblich abgegrenzte Bereiche markieren die einzelnen Prozessphasen und die damit verbundenen Verantwortlichkeiten. Die strukturierte Darstellung macht transparent, welche Rollen in welchen Prozessabschnitten aktiv eingebunden sind und welche Anforderungen dort für sie von Relevanz sind.

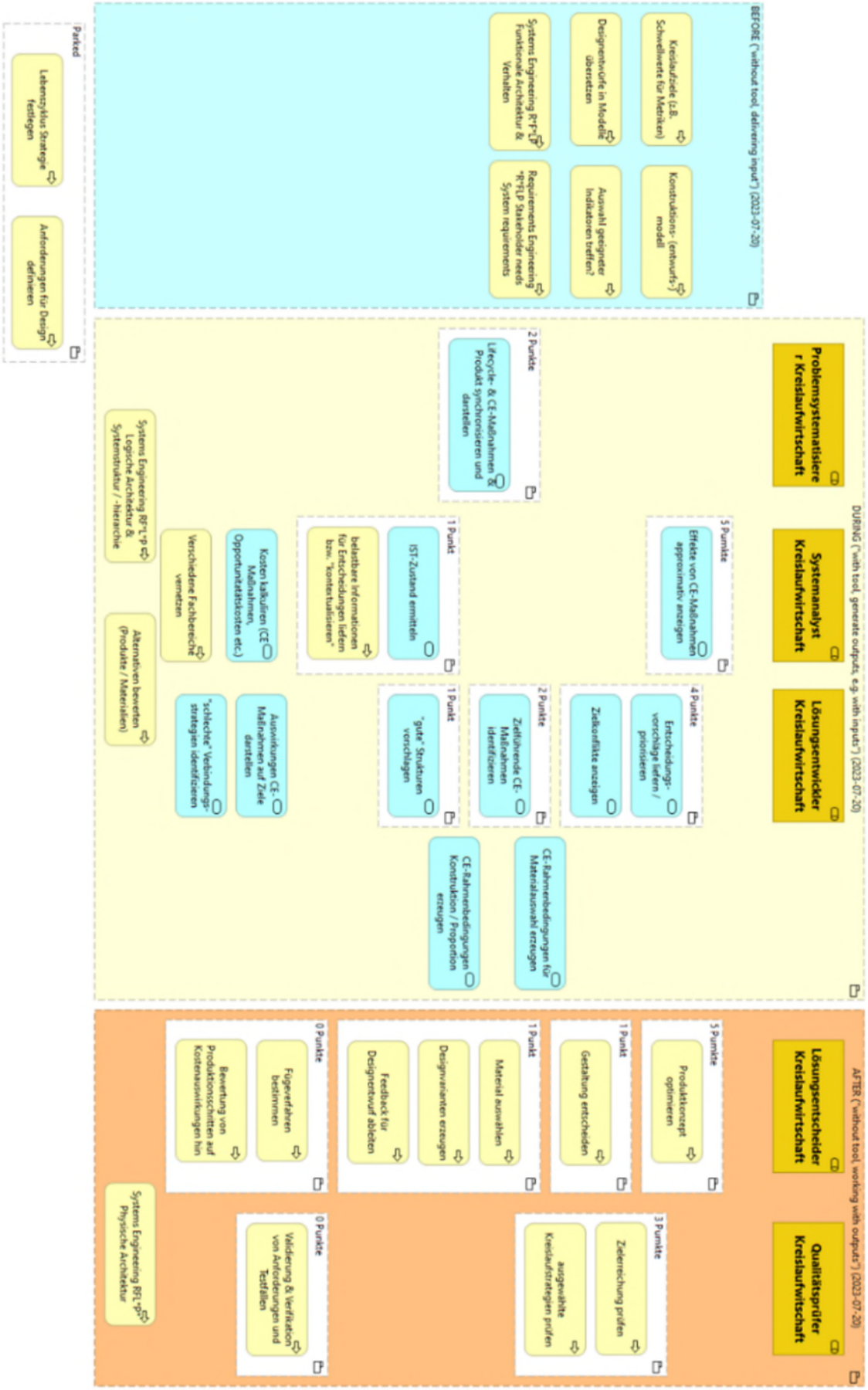


Abbildung 28: Priorisierte Anforderungen, gruppiert nach Rolle (eigene Darstellung)

Um die Anforderungen der identifizierten Rollen systematisch und adressatengerecht zu erfassen, kommt das „Value Proposition Canvas“ [19] zum Einsatz. Diese Methode erlaubt es, die Perspektive der jeweiligen Rolle strukturiert zu analysieren und daraus den spezifischen Nutzen und Mehrwert (Value Proposition) abzuleiten, den das geplante Produkt im Rahmen der jeweiligen Aufgaben, Herausforderungen und Ziele bietet. Die gewonnenen Erkenntnisse werden mithilfe des Modellierungstools „ArchiMate“ [20] dokumentiert und exemplarisch am Beispiel der Rolle des Lösungsentwicklers visualisiert (vgl. Abbildung 29).

Eine enge Abstimmung mit dem federführenden Fachbereich trägt dazu bei, die spezifischen Rollen präzise zu validieren und mit etablierten Rollenmodellen des Systems Engineering abzugleichen. Diese systematische Zuordnung mündet in die Definition konsistenter und fachlich anschlussfähiger Rollenbezeichnungen, wie sie in Tabelle 2 dargestellt sind. Um ein gemeinsames Rollenverständnis zu gewährleisten und Überschneidungen zu vermeiden, werden die Rollen abschließend detailliert beschrieben. Dabei steht die klare Abgrenzung von Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten im Fokus, um eine solide Grundlage für die weitere Ausgestaltung des Entscheidungsunterstützungstools zu schaffen.

Aus MVP abgeleitete Rollen	**Rollen für** CYCLOMETRIC
CE-(ASPECT) Systematisierer	Problemsystematisierer Kreislaufwirtschaft
CE-beeinflusster Entwicklungsentscheider	Lösungsentscheider Kreislaufwirtschaft
CE-Eigenschaften Ermittler	Systemanalyst Kreislaufwirtschaft
CE-Ideen Ermittler	Lösungsentwickler Kreislaufwirtschaft
CE-Validierer	Qualitätsprüfer Kreislaufwirtschaft

Tabelle 2: Rollen für CYCLOMETRIC

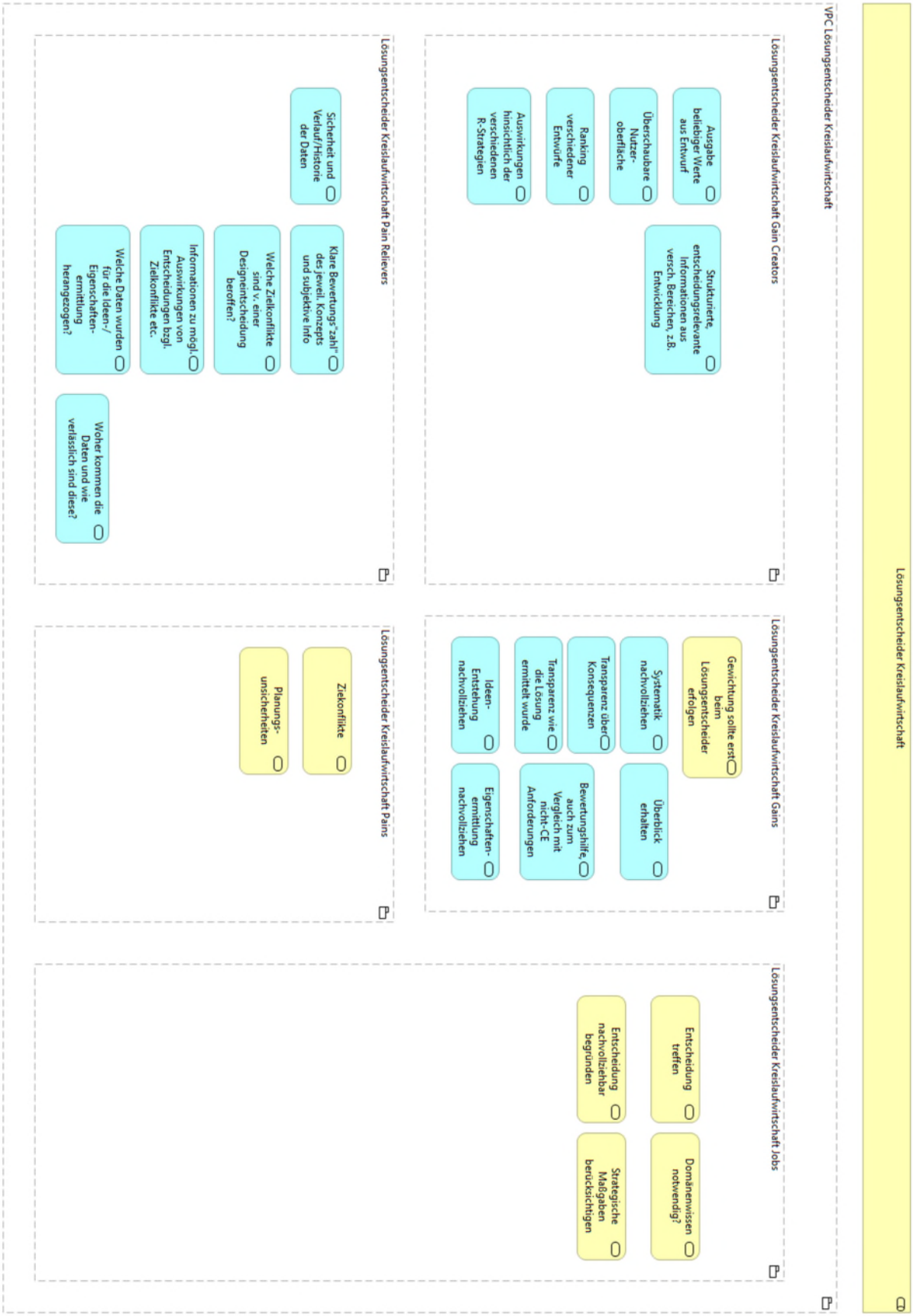


Abbildung 29: Value Proposition Canvas für Rolle Lösungsentscheider (eigene Darstellung)

3.4.6.2 Detaillierte Definition von Anforderungen an die Rollen

Auf Basis der rollenbasierten Ausarbeitung des Wertversprechens erfolgt eine formalisierte Dokumentation der Anforderungen an jede Rolle. Gewünschte Funktionalitäten dieser Rolle in Richtung der Software, benötigte Informationen sowie unterstützende Werkzeuge bilden dabei die Grundlage.

Für die strukturierte und nachvollziehbare Erfassung der Anforderungen kommt das Format der User Stories [21, 22] zum Einsatz. Dieses etablierte Vorgehen aus der agilen Softwareentwicklung erleichtert die Formulierung klar definierter, nutzerzentrierter Anforderungen. Es verbessert die Kommunikation zwischen Entwicklerteams und Stakeholdern und fördert zugleich die iterative Entwicklung und Anpassung von Softwarelösungen. Durch die Konzentration auf konkrete Nutzerbedürfnisse wird eine hohe Relevanz der Funktionalitäten im späteren Produkt sichergestellt.

Um eine lückenlose, qualitativ hochwertige Dokumentation sicherzustellen, wird einem mehrstufigen Vorgehen gefolgt:

(1) Datenaufbereitung: Systematische Aufbereitung der Workshop-Antworten, differenziert nach Rolle und Fragestellung
(2) Text Mining in KNIME: Quantitative Analyse der Rückmeldungen mithilfe von Text-Mining-Techniken zur Identifikation relevanter Themen
(3) Themenbasierte Gruppierung: Zusammenführung ähnlicher Antworten, Ableitung konsolidierter Anforderungen sowie benötigter Informationen und Werkzeuge
(4) Übergreifende Konsolidierung: Prüfung themenübergreifender Überschneidungen und weitere Zusammenführung von Anforderungen
(5) Validierung: Prüfung der konsolidierten Anforderungen im Vier-Augen-Prinzip zur Qualitätssicherung
(6) Rollenzuordnung: Verknüpfung der konsolidierten Anforderungen mit den zugehörigen Rollen
(7) Aufgabenzuordnung: Extraktion der Aufgaben aus der Rollendefinition im Münchener Vorgehensmodell und hierarchische Zuordnung dieser Aufgaben zu den jeweiligen Anforderungen
(8) Formulierung von User Stories: Erstellung nutzerzentrierter Anforderungen nach dem Format
(9) „Als [Rolle] möchte ich, dass das Tool [Anforderung], damit ich [Aufgabe] erfüllen kann.“
(10) Definition von Akzeptanzkriterien: Ergänzung jeder User Story um konkrete, aufgabenspezifische Kriterien zur Überprüfung der erfolgreichen Umsetzung

Im Ergebnis entstehen 61 konsolidierte User-Story-Vorlagen (siehe Abbildung 30), die eine zentrale Grundlage für die weitere technische Umsetzung bilden. Diese Vorlagen sind kontextsensitiv anpassbar, können bei Bedarf weiter verfeinert und differenziert werden – beispielsweise nach Rolle, Aufgabentyp oder Anwendungsfall. Auch die Akzeptanzkriterien

lassen sich entsprechend der spezifischen Anforderungen einzelner Aufgaben weiterentwickeln.

No	Weigh	Als... (Rolle)	möchte ich, dass das	damit ich diese Aufgaben erfüllen kann.	Akzeptanzkriterien (Informationen/Werkz	AK1
1	34	Systemanalyst, Lösungsentscheider, Lösungsentwickler, Qualitätsprüfer, Problemsystematisierer	Zugriff auf CE-Datenbanken mit Regelwerk, Referenzwerten für Materialien/Komponenten und Patentlösungen (als Bewertungs- und Entscheidungshilfe) bereitstellen	1.2 Ziele mit Lösungsmerkmalen verknüpfen 1.4 Freiheitsgrade für die Entwicklung ermitteln 1.4.2 Einhaltung von Regularien 1.8 Ziele definieren für den Ideen-Ermittler 2.3.1 Verheiraten von Konzepten/ Designstudien mit CE-Metriken und Erzeugen von Bewertungskriterien 3.1.1 Analyse und Bewertung aller Lebenszyklusphasen und darin bestehender Abhängigkeiten 4.2 Bewertung von Lösungsideen und -alternativen 5.1.2 Validierung & Verifikation von Anforderungen und Testfällen. Beurteilung muss nachvollziehbar sein.	Referenzwerte/Patentlösungen, CE Maßnahmen, CE und nicht-CE Anforderungen, Regeln, Vorgaben, Kennzahlen/Eigenschaften der Materialien /Komponenten, Produktspezifische Information (Materialien, Verbundmethoden etc.), Produktspezifische Information (Materialien, Verbundmethoden etc.), Informationen zu Prozessen, Maschinen etc., Regeln, Vorgaben, Qualitätsanforderungen, Zusammensetzung von CE-Indikatoren, Stücklistendatenbank	Referenzwerte/Patentlösungen: Benutzer sollten in der Lage sein, eine umfassende Sammlung von CE-Regelwerken, mit Referenzwerten für Materialien/Komponenten und bewährten Patentlösungen aufzurufen und im Detail zu sichten. Der Benutzer kann nach spezifischen Referenzwerten und Patentlösungen suchen und erhält entsprechende Ergebnisse.
2	12	Problemsystematisierer, Lösungsentscheider, Lösungsentwickler, Qualitätsprüfer, Systemanalyst	Kennzahlen zur Bewertung von alternativen Lösungen berechnen	1.3 Stärken und Schwächen ermitteln 1.5.1 Ökonomische Betrachtung 1.5.1 Ökonomische Betrachtung 1.7.1 Konzeptionieren in mehreren Zyklen n 2.1 Metrikwerte berechnen 2.1.2 IST-Zustand ermitteln (Metrikwerte berechnen) 2.1.1 Merkmale aus der Problemstrikturierung ableiten 2.2 Auswertungen und Mögliche Effekte prognostizieren 3.2.2 Auswirkungen CE-Maßnahmen auf Ziele/Produktanforderungen darstellen 3.7.1 Alternative Lösungen (Gestaltung) erarbeiten. 4.2 Bewertung von Lösungsideen und -alternativen 4.5.1 Gestaltung entscheiden 5.1 Ausgewählte Kreislaufstrategien prüfen 5.1.2 Validierung & Verifikation von Anforderungen und	Zugriff auf CE-Datenbanken mit Regelwerk, Referenzwerten für Materialien/Komponenten und Patentlösungen (als Bewertungs- und Entscheidungshilfe), Simulationstool	Zugriff auf CE-Datenbanken mit Regelwerk, Referenzwerten für Materialien/Komponenten und Patentlösungen (als Bewertungs- und Entscheidungshilfe): Benutzer sollten in der Lage sein, eine umfassende Sammlung von CE-Regelwerken, mit Referenzwerten für Materialien/Komponenten und

Abbildung 30: Vorlagen für User-Stories (eigene Darstellung)

3.4.6.3 Übersicht der Anwenderrollen für eine Kreislauforientierte Produktentwicklungssoftware

Für das zirkuläre Softwaretools wurden fünf zentrale Rollen identifiziert [10], auf den entsprechenden Handlungsfeldern des Münchener Prozessmodells basieren und speziell für CE-Aktivitäten definiert sind. Die Rollen können entweder auf mehrere Personen verteilt oder bei Bedarf in einer einzigen Person zusammengefasst werden. Für die Analyse wurde jedoch angenommen, dass die einzelnen Rollen von unterschiedlichen Personen ausgefüllt werden, die entsprechend zusammenarbeiten müssen. Die einzelnen Rollen umfassen: CE-Problemsystematisierer, CE-Systemanalyst, CE-Qualitätstester, CE-Lösungsentwickler und CE-Lösungsentscheider. Die CE-Rollen werden der übergeordneten Rolle „Produktentwickler" zugeordnet (siehe Abbildung 31). Zusätzlich werden die CE-Rollen in Werkzeugbediener und Werkzeugnutzer kategorisiert, um die Anforderungen dieser Rollen genauer zu diskutieren.

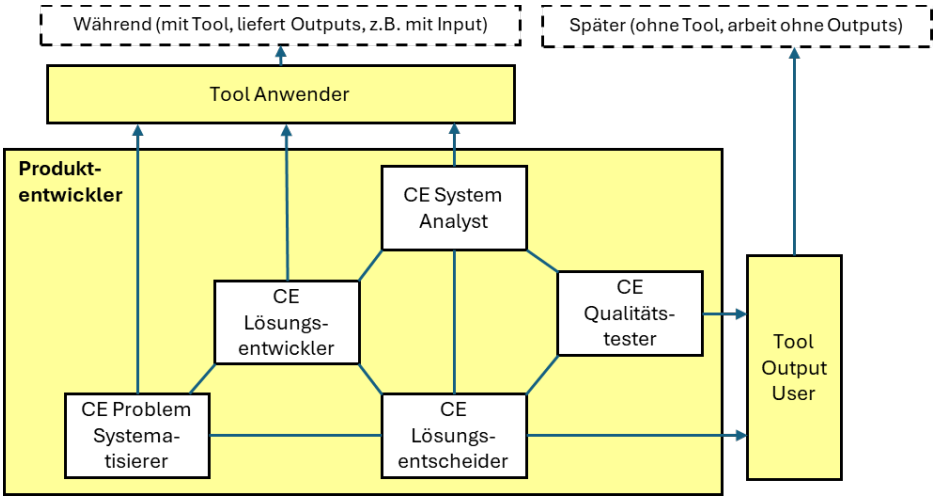


Abbildung 31: Definition des CE-Produktentwicklers basierend auf dem Münchner Model [10]

Die folgenden Tabellen [10] beschreiben stichpunktartig die identifizierten Rollen hinsichtlich der Aufgaben, Verantwortlichkeiten, Entscheidungsbefugnisse, Perspektive auf das Lebenszyklusmodell und Schnittstellen zu anderen Rollen.

Aufgaben	**Verantwortlich-keiten**	**Entscheidungs-befugnis**	**Fokus auf Lebens-zyklusmodell**	**Schnittstelle zu anderen Rollen**
Unternehmen mit CE-Zielen anhand der Produkt-eigenschaften verbinden	Das Problem hinsichtlich seiner Abhängigkeiten und Schnittstellen strukturieren	Schlüsselbereiche identifizieren und eine fokussierte Lösungssuche leiten	Systematische Bestimmung relevanter Produkt-eigenschaften und Lösungen für ein zirkuläres Produkt	CE Lösungs-entwickler und CE Entscheidungsträger für Lösungen
Stärken und Schwächen von Designmustern identifizieren	Arbeitspakete mit CE-Zielen für jede Komponente definieren			
Freiheitsgrade für die Entwicklung bestimmen	Entscheidungsprozesse für Nachhaltigkeit definieren			

Tabelle 3: CE-Problemlöser

Aufgaben	**Verantwortlich-keiten**	**Entscheidungs-befugnis**	**Fokus auf Lebens-zyklusmodell**	**Schnittstelle zu anderen Rollen**
Relevante Designmerkmale durch Analyse der aus einem strukturierten Problemverständnis abgeleiteten Eigenschaften identifizieren	Ungefähre Entwicklung der Auswirkungen und des Einflusses von CE-Maßnahmen auf die Nachhaltigkeit des Produkts anzeigen	Entscheidungsfindung und Zielerreichung durch Bewertung der berechneten Nachhaltigkeitsaus wirkungen unterstützen	Identifizieren und analysieren spezifischer Merkmale oder Attribute von Produkten, Materialien oder Prozessen im Hinblick auf Zirkularität und Nachhaltigkeit	CE Lösungsent-wickler, CE-Qualitätstester und CE Entscheidungs-träger für Lösungen

Tabelle 4: CE-Systemanalyst

Aufgaben	**Verantwortlich-keiten**	**Entscheidungs-befugnis**	**Fokus auf Lebens-zyklusmodell**	**Schnittstelle zu anderen Rollen**
Geplante CE-Strategien überprüfen	Sicherstellung der Zielerreichung (präventiv)	Ursachen und Auswirkungen analysieren	Verifizierung und Sicherstellung der CE-Anforderungen	CE-Problemlöser und CE Entschei-dungsträger für Lösungen
Mögliche Risiken hinsichtlich der Zielabweichungen identifizieren und bewerten	Prozessoptimierung für Qualitätssicherung			

Tabelle 5: CE-Qualitätsprüfer

Aufgaben	Verantwortlich-keiten	Entscheidungs-befugnis	Fokus auf Lebens-zyklusmodell	Schnittstelle zu anderen Rollen
Effektive CE-Maßnahmen innerhalb des Produktdesigns identifizieren	Konflikte abwägen	Designvorschläge für Entscheidungs-prozesse bereitstellen	Geeignete CE-Maßnahmen identifizieren, um Anforderungen zu erfüllen und „unerwünschte Zustände“ im Lebenszyklus zu vermeiden	CE Entscheidungs-träger für Lösungen und CE-Problemlöser
Lösungsideen zu einem Gesamt-produktkonzept kombinieren	Das Produkt/die Komponente zirkulär und nachhaltig gestalten			
Alternative Lösungen entwickeln (Wirkungsprinzip)				

Tabelle 6: CE-Lösungsentwickler

Aufgaben	Verantwortlich-keiten	Entscheidungs-befugnis	Fokus auf Lebens-zyklusmodell	Schnittstelle zu anderen Rollen
Bewertung von Lösungsideen und Alternativen nach strategischen Anforderungen	Strategische Anforderungen berücksichtigen	Endgültige Lösung auf Basis der Vorschläge des CE Lösungsentwicklers auswählen	CE- und Nachhaltigkeits-anforderungen der gewählten Lösung und den strategischen Zielen des Unternehmens angleichen	CE Lösungsent-wickler, CE-Qualitätstester, CE-Systemanalyst und CE-Problemlöser

Tabelle 7: CE-Entscheidungsträger für Lösungen

Literatur

1. Fraunhofer (2025) CycloP / CycloP · GitLab. https://gitlab.cc-asp.fraunhofer.de/cyclop/cyclop. Accessed 25 Aug 2025
2. Bhander GS, Hauschild M, McAloone T (2003) Implementing life cycle assessment in product development. Environ Prog 22:255–267. https://doi.org/10.1002/ep.670220414
3. Guðlaugsson TV, Ravn PM, Mortensen NH et al. (2017) Modelling production system architectures in the early phases of product development. Concurrent Engineering 25:136–150. https://doi.org/10.1177/1063293X16669396
4. DIN EN ISO 14040 (2021) Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-iso-14040/325953744
5. DIN EN ISO 14044 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen. https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-iso-14044/325953813
6. (2021) EMPFEHLUNG (EU) 2021/2279 DER KOMMISSION vom 15. Dezember 2021 zur Anwendung der Methoden für die Berechnung des Umweltfußabdrucks zur Messung

und Offenlegung der Umweltleistung von Produkten und Organisationen entlang ihres Lebenswegs
7. Henriksen T, Astrup TF, Damgaard A (2021) Data representativeness in LCA: A framework for the systematic assessment of data quality relative to technology characteristics. Journal of Industrial Ecology 25:51–66. https://doi.org/10.1111/jiec.13048
8. Stadler M (2016) Optimierung von Anlaufmanagement und Entwicklungsprozessen. disserta Verlag, Hamburg
9. Potinecke TW (2009) Methode zur Systematisierung von Teilprozessen in der Produktentwicklung beim Einsatz von CAx-Technologien. Universität Stuttgart
10. Schwahn M, Potinecke T, Block L et al. (2025) User Roles for Circular Product Development Software, Graz
11. Sheard SA (1996) TWELVE SYSTEMS ENGINEERING ROLES. INCOSE International Symposium 6:478–485. https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.1996.tb02042.x
12. Walden DD, Roedler GJ, Forsberg K et al. (eds) (2015) Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities, Fourth Edition. Wiley, Hoboken, N.J.
13. Forth J, Fields D Digital Engineering Roles and Responsibilities: Definitions and Considerations
14. Berger C (2022) Auf was es bei einer nachhaltigen Technikentwicklung ankommt. https://www.springerprofessional.de/produktion---produktionstechnik/nachhaltigkeit/auf-was-es-bei-einer-nachhaltigen-technikentwicklung-ankommt/20391714. Accessed 05 Jan 2024
15. Ibrom S (ed) (2022) Ganzheitliche Projektabwicklung: Konsequent partnerschaftlich - integrativ - kollaborativ. Springer Vieweg, Wiesbaden, Heidelberg
16. Huber M, Huber G (2011) Prozess- und Projektmanagement für ITIL: Nutzen Sie ITIL optimal ; mit 21 Tabellen ; [mit Online-Service, 1. Aufl. Praxis. Vieweg + Teubner, Wiesbaden
17. van Bon J (2012) ITIL® 2011 Edition - das Taschenbuch, 1st ed. Van Haren Publishing, Hertogenbosch
18. Lindemann U (ed) (2009) Methodische Entwicklung technischer Produkte. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
19. Horster E (2023) Der Value Proposition Canvas. In: Horster E (ed) Customer Experience Management: Wow-Momente in der digitalisierten Welt, 1. Auflage. Haufe Group, Freiburg, München, Stuttgart, pp 106–113
20. Beauvoir P, Sarrodie J-B (2025) Archi - Open Source ArchiMate Modelling. https://www.archimatetool.com/. Accessed 30 Jul 2025
21. Cohn M (2010) User Stories: Für die agile Software-Entwicklung mit Scrum, XP u.a, 1. Aufl. mitp, Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg
22. Wirdemann R (2011) Scrum mit User Stories, 2., erweiterte Auflage. Hanser eLibrary. Hanser Verlag, München

3.5 Zirkuläre Produktion

Autor:innen: Nada Ruzicic; Nils Küster; Anja Braun; Nika Perevalova

Ressourceneffiziente Produktion bezeichnet die systematische Optimierung der Ressourcennutzung über alle Stufen des Produktionsprozesses hinweg. Dies erfolgt durch den Einsatz technischer, organisatorischer und strategischer Maßnahmen mit dem Ziel, den spezifischen Material- und Energieverbrauch pro Produkteinheit zu reduzieren und zugleich ökologische wie ökonomische Potenziale zu erschließen [1].

Die fortschreitende Verknappung natürlicher Ressourcen sowie zunehmende regulatorische und gesellschaftliche Anforderungen machen ein grundlegendes Umdenken in der Gestaltung industrieller Produktionssysteme erforderlich und rücken den Aufbau zirkulärer Wertschöpfungssysteme in den Mittelpunkt [2]. In diesem Kontext gewinnen zirkuläre Wertschöpfungskonzepte an Bedeutung, da sie einen vielversprechenden Ansatz zur nachhaltigen Steigerung der Ressourceneffizienz bieten [3]. Zentrale Fragestellungen betreffen die technologische und organisatorische Realisierbarkeit kreislauffähiger Produktionsstrukturen sowie unternehmerische Voraussetzungen, um zirkuläre Wertschöpfungssysteme zu etablieren. Dabei betrifft die Einführung der zirkulären Wertschöpfungssysteme alle Funktionen des Produktionssystems und Entscheidungen entlang des gesamten Lebenszyklus bedingen sich gegenseitig. Die so entstehende Komplexität zirkulärer Produktionsprozesse erfordert die Entwicklung geeigneter Modellierungsansätze zur Abbildung interner und externer Wertschöpfungsstrukturen sowie der zugrunde liegenden Informations- und Materialflüsse [4].

Generische Ansätze als Grundlage für den Aufbau spezifischer zirkulärer Produktionssysteme bilden einen Ansatz für Unternehmen, die Komplexität zirkulärer Produktionssysteme zu managen, und tragen zum wirtschaftlichen Aufbau solcher Strukturen bei. Generische Prozessbeschreibungen stellen eine allgemein gültige, vereinfachte Darstellung eines Ablaufs dar, unabhängig von Unternehmen, Branche oder Produkt. Anwender können diese für ihre Unternehmensstrukturen anwenden und mit individuellen Ergänzungen erweitern. Ein generischer Ansatz zur Beschreibung und Konzeptionierung eines zirkulären Produktionssystems bildet somit eine wertvolle Hilfe beim praktischen Aufbau solcher Produktionssysteme.

Im Befundungsprozess erfolgt die Untersuchung von Produkten, Komponenten und Materialien auf physische Beschädigungen (beispielsweise Kratzer und Bruchstellen) und funktionale Defekte. Anhand der Befundung wird entschieden, in welche nachfolgenden Prozesse die untersuchten Objekte eingesteuert werden. Die nachfolgenden Prozesse basieren auf den R-Strategien [5]. Die Befundung ist eine entscheidende Komponente für die Schließung zirkulärer Wertschöpfungskreisläufe und wird in Kapitel 3.5.6 beschrieben.

Nachfolgend werden die Entwicklung eines zirkulären Produktionssystems (siehe Kapitel 3.5.1) sowie die Anwendungen des zirkuläre Produktionssystems beschrieben (siehe Kapitel 3.5.6). Abschließend folgt ein Fazit der Entwicklungsarbeit (siehe Kapitel 3.5.6).

3.5.1 Entwicklung eines zirkuläres Produktionssystems

Zirkuläre Produktionssysteme sind Bestandteil zirkulärer Wertschöpfungssysteme. Sie sind entscheidend bei der Realisierung zirkulärer Wertschöpfungsstrukturen, da dort relevante Entscheidungen getroffen und entscheidende Parameter der Produktgestaltung definiert werden. Die Rückführung Aufbereitung von Produkten, Komponenten und Materialien führt diese schließlich zurück in das Produktionsumfeld. Im Folgenden werden daher besonders die Aspekte der zirkulären Produktion beleuchtet.

Das entwickelte zirkuläre Produktionssystem basiert auf dem strukturierten Zusammenspiel von drei komplementären Modulen, die unterschiedliche Ebenen zirkulärer Produktionsgestaltung adressieren:

1. Modul: Anforderungen an zirkuläre Produktionssysteme

Eine systematische Übersicht relevanter Anforderungen dient als konzeptionelle Grundlage für die Ausgestaltung zirkulärer Produktionssysteme. Im Fokus steht insbesondere die Trennung von Anforderungen, die durch Designentscheidungen im Produktentstehungsprozess beeinflusst werden können, von solchen, die ausschließlich produktionstechnisch bedingt sind. Diese Differenzierung ermöglicht eine gezielte, strukturierte Betrachtung und Priorisierung der Anforderungen an Prozesse, Produkte und Materialien. Durch die Differenzierung der Anforderungen wird somit eine gezielte Ausrichtung von Entwicklungs- und Fertigungsprozessen auf zirkuläre Prinzipien gefördert. Eine weiterführende Beschreibung erfolgt in Kapitel 3.5.2.

2. Modul: Generische Prozesse in zirkulären Produktionssysteme

Zur Abbildung zirkulärer Prozesslogiken ist ein generischer Auftragsabwicklungsprozess entwickelt und abgebildet, der sowohl klassische Produktionsabläufe als auch rückführungsbezogene Subprozesse integriert. Die Modellierung orientiert sich an den R-Strategien nach Potting [5], die eine systematische Wiederverwendung, Aufarbeitung und stoffliche Verwertung zurückgeführter Produkte ermöglichen. Als konzeptionelle Grundlage dienen industrienahe Anwendungsszenarien, um eine praxisorientierte Modellvalidierung zu gewährleisten. Eine weiterführende Beschreibung der generischen Prozesse erfolgt in Kapitel 3.5.3.

3. Modul: Strategische Ansätze für die zirkuläre Wertschöpfung

Ein Entscheidungsbaum (siehe Abbildung 32), welcher zentrale Entscheidungspunkte entlang des Produktlebenszyklus berücksichtigt – insbesondere in den Bereichen Produktentwicklung, Produktion und Logistiknetzwerke, dient der Unterstützung strategischer Entscheidungen. Auf dessen Basis sind übergeordnete Produktionsstrategien für zirkuläre Wertschöpfungsstrukturen systematisch abgeleitet und operationalisiert. Ein ergänzendes Mapping der erarbeiteten strategischen Ansätze mit den Faktoren der Interdependenzmatrix des zugrunde liegenden

Vernetzungsmodells (siehe Kapitel 3.1.2), dient der Hervorhebung und ganzheitlichen Adressierung potenzieller Wechselwirkungen zwischen den Handlungsfeldern.

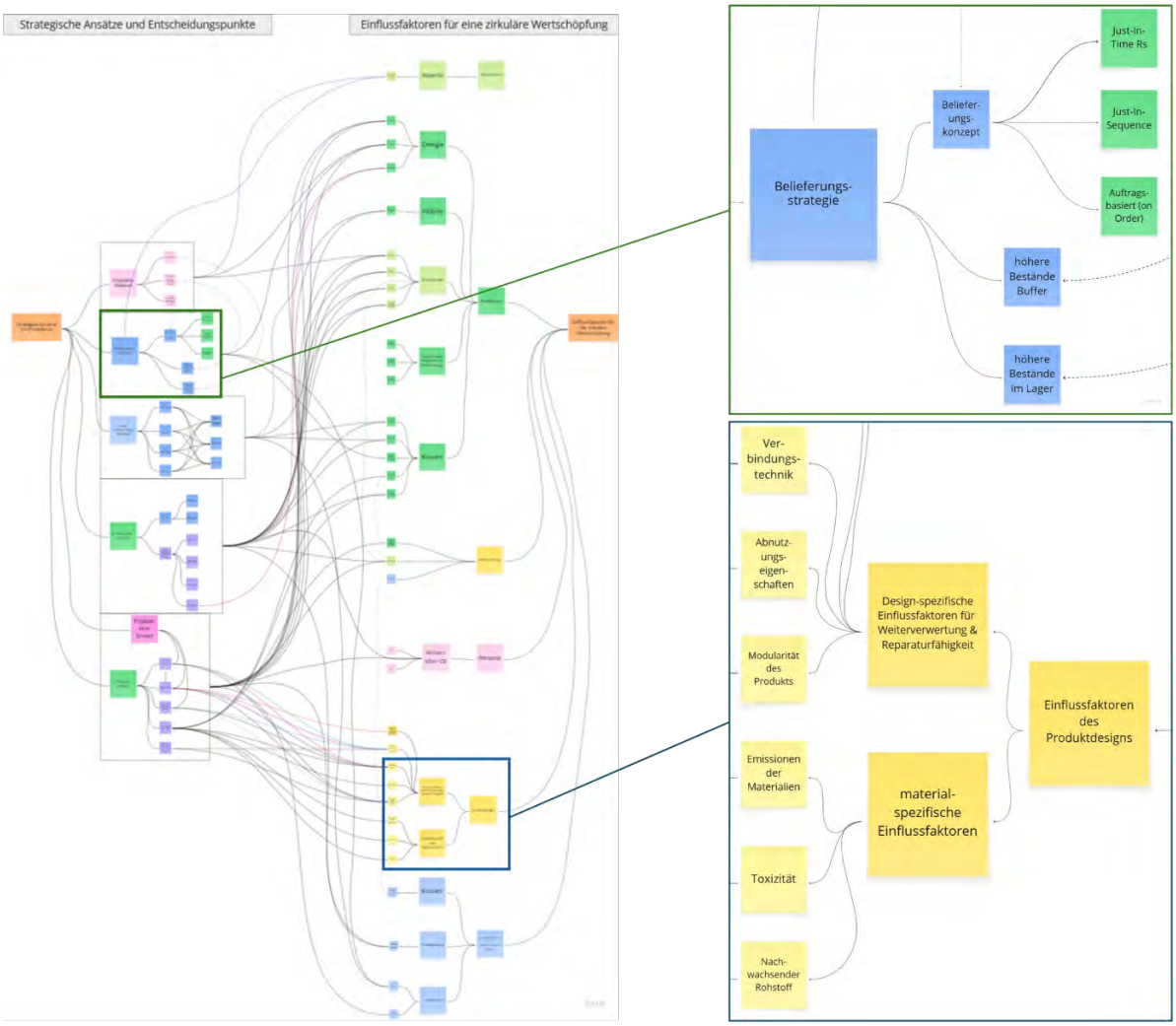


Abbildung 32: Schematische Darstellung des Entscheidungsbaums zur Verknüpfung von Entscheidungspunkten strategischer Ansätze und Einflussfaktoren für eine zirkuläre Wertschöpfung (eigene Darstellung)

Das Zusammenspiel der drei Module bildet die Grundlage des zirkulären Produktionssystems (siehe Abbildung 32). Die im Rahmen der Module entwickelten Inhalte beschreiben zentrale Gestaltungsoptionen eines zirkulären Produktionssystems und ermöglichen eine unternehmens-spezifische Anpassung an individuelle strukturelle, prozessuale und strategische Rahmen-bedingungen.

Werkzeuge wie die Wertstrommethode und die Ermittlung und Bildung von Synergien im Produktionssystem bieten die Möglichkeiten das Produktionssystem im Anwendungsfall zu planen, Szenarien im Vorfeld zu simulieren und Entscheidungen zu validieren.

Wie in Abbildung 33 dargestellt erstrecken sich die Komponenten des zirkulären Produktions-prozesses von der Grobplanung, über die Operationalisierung bis hin zur Steuerung des zirkulären Wertschöpfungssystems und der darin eingebetteten Produktion.

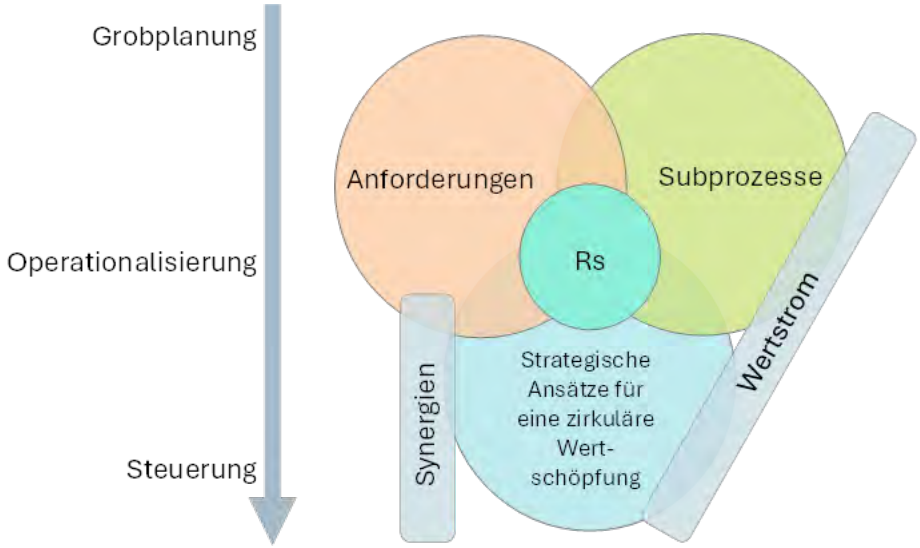


Abbildung 33: Zirkuläres Produktionssystem (eigene Darstellung)

Damit bietet das entwickelte Produktionssystem einen anwendungsorientierten Referenzrahmen für den Aufbau zirkulärer Wertschöpfungssysteme und insbesondere für darin eingebettete Produktionsstrukturen.

3.5.2 Anforderungen an zirkuläre Produktionssysteme

Zur Ermittlung, Identifizierung und Priorisierung zentraler Anforderungen an zirkuläre Produktionssysteme dient eine semi-strukturierte Literaturanalyse. Berücksichtigt werden sowohl prozessbezogene als auch produktbezogene Anforderungen, die sich aus den Prinzipien zirkulärer Wertschöpfung ableiten lassen.

Die Recherche erfolgt anhand definierter deutsch- und englischsprachiger Keywords wie Circular Production, Circular Economy, Circular Product, Manufacturing und Require*. Das Sternchensymbol [*] impliziert verschiedene Begriffsvarianten des Wortstamms „Require“ wie „Requirement“, „Requires“, „Required“ und weitere Variationen. Insgesamt sind 96 Anforderungen aus relevanter wissenschaftlicher Literatur extrahiert. Diese Anforderungen sind thematisch gruppiert, übergeordneten Kategorien zugeordnet und auf ihre Relevanz hin bewertet. Die Relevanz basiert auf der Häufigkeit der Nennung in den analysierten Quellen.

Zur inhaltlichen Strukturierung dienen zwei methodische Bezugsrahmen; das Drei-Zyklen-Modell der Produktentstehung nach Gausemeier et al. [6] sowie die R-Strategien nach Potting [5]. Auf dieser Basis erfolgt die Zuordnung der Anforderungen entlang des Produktlebenszyklus sowie ihrer Rolle innerhalb zirkulärer Nutzungspfade. Nutzungspfade beschreiben Prozessschritte und Status, die ein zirkuläres Produkt entlang seiner Lebenszyklen durchläuft. Dies kann mehrere Zyklen der Nutzung, Rückführung und Wiederaufbereitung für eine weitere Nutzungsphase beinhalten. Je nach Grad der Abnutzung und Defekte werden verschiedene Aufbereitungsprozesse gewählt. Die Nutzungsphase kann bei verschiedenen Kunden erfolgen.

Die Anforderungen sind nach verschiedenen Aspekten gruppiert und strukturiert. Diese Gruppierung erhöht die Nutzbarkeit der Anforderungssammlung für die anschließende Modellierung zirkulärer Produktionsstrukturen:

- **Inhaltliche Übereinstimmungen:** Thematisch verwandte Anforderungen sind in Meta-Anforderungen zusammengefasst, um Redundanzen zu vermeiden und Zusammenhänge zu verdeutlichen.
- **Differenzierung nach Produkt- und Produktionsfokus:** Es wird unterschieden, ob sich eine Anforderung auf die Gestaltung zirkulärer Produktionsprozesse oder auf produktspezifische Eigenschaften bezieht, die zirkuläre Nutzung und Wiederverwertung ermöglichen.
- **Phasenzuordnung im Produktentstehungsprozess:** Die Einordnung erfolgt entlang der Entwicklungs-, Produktions- und Rückführungsphasen gemäß dem Gausemeier-Modell [6].

Im Ergebnis lassen sich die 96 Anforderungen in 25 thematische Clustern zuordnen. Daraus werden 15 priorisierte Anforderungen abgeleitet, die aufgrund der Häufigkeiten und ermittelten Zusammenhänge als relevant für die Gestaltung zirkulärer Produktionssysteme eingestuft sind. Die Zusammenhänge zeigen eine hohe Hebelwirkung der priorisierten Anforderungen bei der Realisierung von zirkulären Wertschöpfungsstrukturen. Zu den priorisierten Anforderungen zählen unter anderem:

- **Transparenz in der Lieferkette**, insbesondere zur Rückverfolgung von Materialflüssen und Herkunftsnachweisen,
- **Anpassungsfähigkeit an Planungsunsicherheiten**, beispielsweise aufgrund von durch die Produktrücknahme entstehenden Schwankungen in Material-verfügbarkeit und -qualität,
- **Lebenszyklusintegriertes Datenmanagement**, um eine durchgängige Informationsverfügbarkeit über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg sicherzustellen,
- **Aufbau von Verständnis und Kompetenzen bei Mitarbeitenden**, insbesondere im Hinblick auf Prinzipien und Ziele der zirkulären Wertschöpfung.

Die Anforderungen sind in tabellarischer Form dokumentiert und bei der Definition von Bewertungslogiken im aus CYCLOMETRIC resultierenden Softwaretool berücksichtigt. Die Analyse führt zu einer übergeordneten Unterscheidung in zwei Hauptkategorien:

- Anforderungen an zirkuläre Produktionsprozesse
- Anforderungen an Produkte für eine zirkuläre Nutzung

Die Ergebnisse bilden die konzeptionelle Grundlage für die nachfolgenden Modellierungs-aktivitäten und fließen in die weitere Ausarbeitung des Produktionssystems ein.

3.5.3 Definition generischer Prozesse für zirkuläre Produktionssysteme

Zirkuläre Produktionssysteme als Teil zirkulärer Wertschöpfungssysteme umfassen zusätzlich zu den linearen Produktionsprozessen den Rücklieferprozess vom Kunden zurück [7]. In zirkulären Wertschöpfungssystemen entstehen durch diese Rücklieferprozesse neue Entscheidungspunkte hinsichtlich der erneuten Nutzung von Komponenten, Materialien oder vollständigen Produkten. Diese Entscheidungspunkte sind systematisch erhoben, thematisch gruppiert und über Oberbegriffe strukturiert dargestellt. Die Oberbegriffe sind dabei den Phasen des Produktentstehungsprozesses zugeordnet. Diese Aspekte sind Teil des Modellierungsrahmens. Ein Modellentwurf eines verschränkten Auftragsabwicklungs- und Rücklieferprozesses (siehe Abbildung 34) berücksichtigt die Besonderheit zirkulärer Produktionssysteme.

Die durch die Implementierung von R-Strategien nach Potting [5] entstehenden Prozessverflechtungen sowie bidirektionale Material- und Informationsflüsse sind in einem generischen Modellansatz (siehe Abbildung 34) abgebildet. Dieser ermöglicht eine übersichtliche Darstellung von Prozessschleifen, Wechselwirkungen und Abhängigkeiten. Die Subprozesse strukturieren zirkuläre Prozessketten systematisch und bilden eine zentrale Komponente des Produktionssystems.

Insgesamt ermöglichen die entwickelten Subprozesse eine präzise Abbildung zirkulärer Abläufe innerhalb der Auftragsabwicklung und Rücklieferung. Sie schaffen eine flexible Grundlage für die Anwendung und Weiterentwicklung eines industrieunabhängigen Produktionssystems.

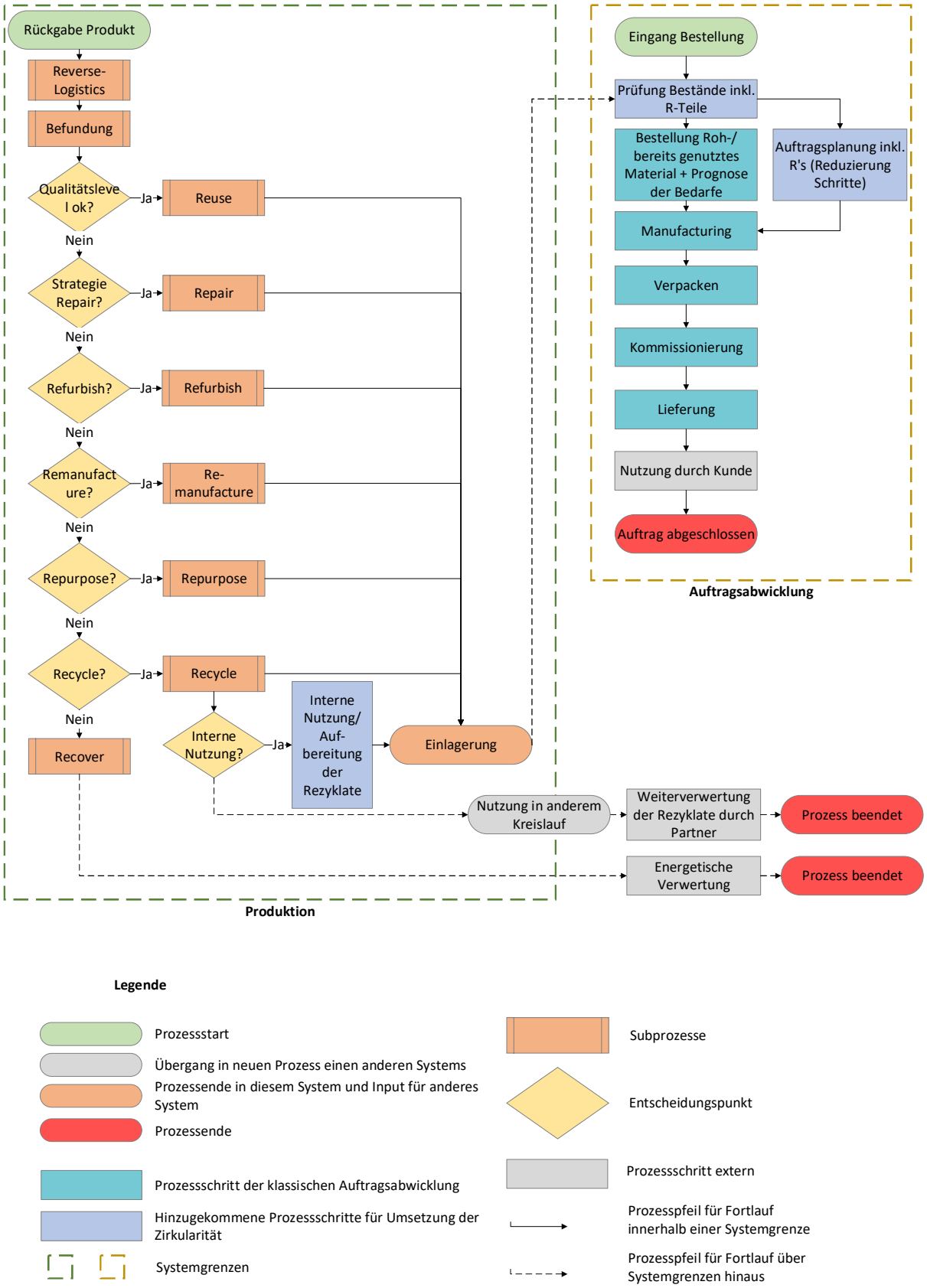


Abbildung 34: Generischer Auftragsabwicklung- und Rücklieferprozess (eigene Darstellung)

3.5.4 Wertstrommodellierung für eine zirkuläre Wertschöpfung

Die Wertstrommodellierung dient der systematischen Erfassung und Darstellung sämtlicher relevanter Material- und Informationsflüsse entlang des Produktlebenszyklus. Die Umsetzung zirkulärer Strategien im Produktionsumfeld kann mit der Wertstrommodellierung geplant und umgesetzt werden. Als Grundlage dient ein hergeleiteter, linearer Referenzprozess zur Herstellung einer Mittelkonsole (siehe Abbildung 35), auf dessen Basis Maßnahmen zur Integration zirkulärer Prinzipien abgeleitet sind. Die als Anwendungsfall genutzte Mittelkonsole wird in Kapitel 3.7 beschrieben.

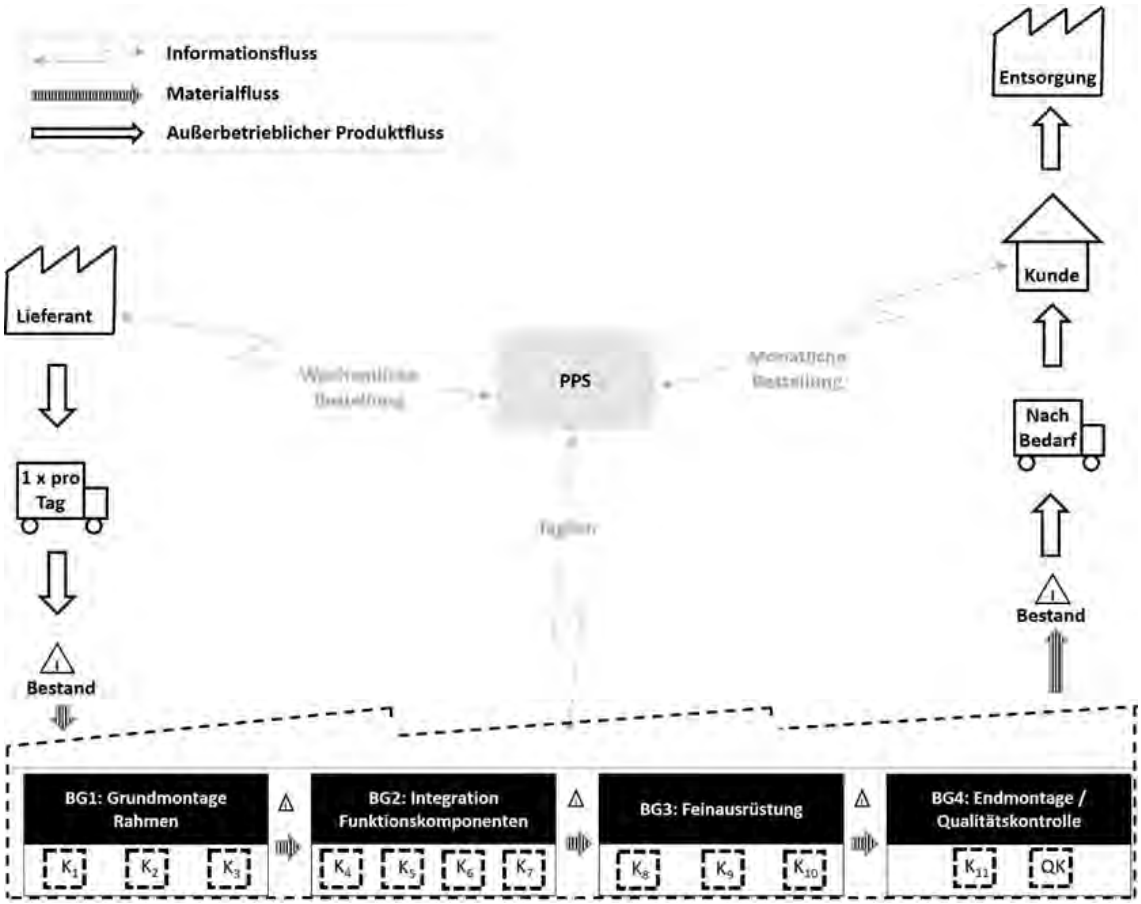


Abbildung 35: Linearer Referenzprozess zur Herstellung einer Mittelkonsole (eigene Darstellung)

Das Ergebnis der Analyse des bestehenden Systems ist ein klassisch linearer Wertstrom, bei dem der Materialfluss mit der Auslieferung des Produkts an den Endkunden endet. Es existieren weder Rückführsysteme für gebrauchte Bauteile noch Informationen über den Zustand der Produkte nach der Nutzungsphase. Die Folge ist, dass sämtliche Komponenten nach Ablauf ihrer Lebensdauer der Entsorgung zugeführt werden. Eine kreislaufwirtschaftliche Rückführung von Materialien findet im gegenwärtigen Prozess nicht statt.

Erweitert wird der Wertstrom um ein Rückgewinnungszentrum (Re-Fabrik), das als Lieferant den Rücklieferprozess vom Kunden abwickelt, die Aufbereitung durchführt und damit eine zirkuläre Wertschöpfung ermöglicht.

In diesem Rückgewinnungszentrum werden die zurückgelieferten Mittelkonsoleinheiten angenommen, demontiert, befundet und anschließend entsprechend ihrem Zustand und der jeweils angewandten R-Strategie weiterverarbeitet.

Die Verwertung erfolgt dabei entlang folgender strategischer Optionen [5]:

- **Reuse / Repair:** Einzelne Komponenten oder vollständig funktionsfähige Einheiten der Mittelkonsole werden nach Aufbereitung direkt erneut vermarktet bzw. dem Endkunden zugeführt.
- **Refurbish / Remanufacture:** Bauteile, die einer umfangreicheren Wiederaufbereitung bedürfen, werden in den bestehenden Produktionsprozess reintegriert und dort für die Herstellung neuer Produkte verwendet.
- **Recycle:** Nicht funktionsfähige Komponenten werden stofflich verwertet. Hierbei werden einzelne Bestandteile zu Sekundärrohstoffen verarbeitet und erneut dem Materialkreislauf zugeführt.
- **Recover:** Für Komponenten, die keiner der vorgenannten Strategien zugeführt werden können, erfolgt eine energetische Verwertung.

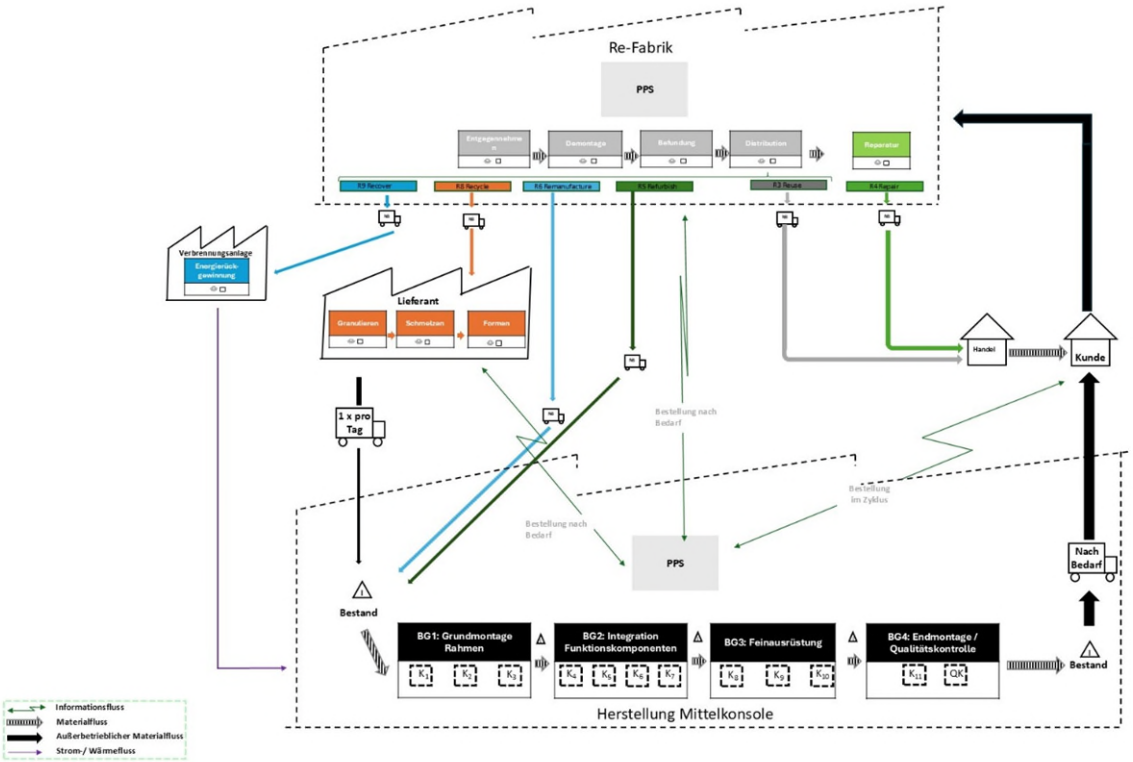


Abbildung 36: Zirkuläres Wertstrommodell - Informations- und Materialflüsse (eigene Darstellung)

Das Wertstrommodell in Abbildung 36 verdeutlicht, wie durch die Einführung eines Rückgewinnungszentrums und die strukturelle Verankerung von R-Strategien entlang des Produktlebenszyklus zirkuläre Wertschöpfungssysteme gestaltet und die Ressourceneffizienz nachhaltig erhöht werden können.

Die Abbildung der Informations- und Materialflüsse bestätigt die Erkenntnisse aus der Entwicklung des zirkulären Produktionssystems, dass die Befundung und damit zusammen-

hängende Einsteuerung aufbereiteter Produkte und Komponenten eine zentrale Rolle in kreislauffähigen Wertschöpfungssystemen spielen.

3.5.5 Reflexion von Synergie- und Symbiose-Effekten

Synergien und Symbiosen fördern die zirkuläre Wertschöpfung. Die Symbiose stellt eine Form der Kooperation zwischen Organisationen oder Arbeitsbereichen dar, beispielsweise in Form von unternehmensübergreifenden Wertschöpfungsbeziehungen oder Rücknahmesystemen. Eine Synergie bildet die Grundlage dieser Zusammenarbeit. Synergieeffekte können sich in Form von Ressourcenteilung, Wissensaustausch, der Nutzung überschüssiger Kapazitäten oder gemeinsamen Infrastrukturen manifestieren. Ein wesentliches Merkmal von Synergien zirkulärer Wertschöpfungssysteme besteht darin, dass der Output oder Überschuss einer Institution zur Deckung des Bedarfs einer anderen Institution genutzt wird. Dies erfolgt beispielsweise durch Sekundärnutzung von Materialien, geteilte Logistiklösungen oder gemeinsame Verwertungsstrategien.

Die Ergebnisse der vorangegangenen Analyse bilden die konzeptionelle Grundlage für die Entwicklung eines Modellierungsansatzes zur systematischen Abbildung von Synergieeffekten innerhalb einer softwarebasierten Umgebung. Diese Erkenntnisse dienen als Basis eines Konzepts zur Modellierung von Synergien, welches in eine Softwarelösung integriert ist.

Der entwickelte Modellierungsansatz zeigt mögliche Synergien nach Klassen auf und kann genutzt werden, um Synergiepotenziale zu identifizieren und bewerten. Er ermöglicht es, Synergiepotenziale im Sinne zirkulärer Wertschöpfung formal abzubilden – beispielsweise durch die Wiederverwendung von Materialien in neuen Produktkomponenten oder die ressourcenschonende Weitergabe von Materialien, Energie oder Informationen an externe Systeme. Die softwareseitige Implementierung erlaubt eine exemplarische Visualisierung und Analyse dieser Synergien, wodurch praktische Anwendungsfälle einer kreislaufgerechten Ressourcennutzung im digitalen Modell darstellbar und bewertbar werden.

3.5.6 Anwendungen des zirkulären Produktionssystems

Demonstrator Befundung

Die Analyse und Einsteuerung von Produkten in Subprozesse des zirkulären Produktionssystems erfolgen in der Befundung. Das macht sie zu einem zentralen Bestandteil zirkulärer Wertschöpfungsstrukturen. Dabei handelt es sich um eine zentrale Aufgabe für das Funktionieren der Kreislaufwirtschaft. Bei der Rücknahme von Produkten aus einer Nutzungsphase müssen Entscheidungen über die Aufbereitungsschritte getroffen werden. Die Entscheidungen finden auf Basis des Zustands des Produkts statt. Produkte, die aus der Nutzung für die Weiternutzung zurückgenommen werden, unterliegen jedoch Unsicherheiten bei dem Zustand beziehungsweise der Qualität des Produktes [8].

Die Befundung ist ein Prozessschritt, welcher einen hohen Einfluss auf die folgenden Aufbereitungsschritte hat. Gleichzeitig ist dieser Prozessschritt hochkomplex, da Produkte, Komponenten und Materialien mit verschiedensten Graden an physischen und funktionalen Defekten zurückgeführt werden können. Beschädigungen können zudem für das Auge unsichtbar sein und mikroskopisch klein sein. Bei der Bewertung der Beschaffenheit und Wahl von folgenden Subprozessen der zirkulären Produktion sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund ist eine technische Unterstützung des Befundungsprozess es sinnvoll.

Der Demonstrator des Befundungsprozesses im Produktionssystems sieht daher eine informatorische Unterstützung eines Mitarbeiters in der Befundung vor (siehe Abbildung 37 und Abbildung 38). Der Mitarbeiter wird in zwei Aufgaben unterstützt:

i. Vollständiges Abarbeiten des Arbeitsplans: Entscheidungen in der Befundung müssen auf Basis eines vollständigen Eindrucks des Produktes getroffen werden. Daher muss sichergestellt werden, dass alle Befundungsschritte durchgeführt werden.
ii. Erkennung möglicher Fehlerbilder: Produktbeschädigungen sind teilweise schwer identifizierbar.

Zur Unterstützung bei diesen Aufgaben bietet sich Machine Vision als Technologie an. Dabei sind zwei unterschiedliche Ansätze nötig, um beide Aufgaben abzudecken:

i. Klassifizierung von Posen: Um sicherzustellen, dass ein Produkt von allen Seiten begutachtet, wurden wird eine KI-basierte Klassifikation der Pose des Produktes durchgeführt. Auf dieser Basis kann ein Assistenzsystem kontrollieren, ob alle nötigen Posen bereits begutachtet wurden.
ii. Anomalieerkennung: Für die optische Erkennung möglicher Fehler auf einem Produkt kommen verschiedene KI-Ansätze in Frage. Lösungen aus der Domäne des supervised Learning setzen Trainingsdaten, aller möglicher Fehlerbilder voraus. Diese Daten sind gerade bei neuen Produkten jedoch nicht vorhanden, weil gewissen Fehlerbilder noch nicht aufgetreten sind. Ein alternativer Ansatz sind unsupervised Methoden zur Anomalieerkennung.

Der realisierte Demonstrator implementiert diese beiden Ansätze. Die Erkennung der Posen wird als Klassifizierung mit einem YOLO Modell realisiert [9]. Die Anomalieerkennung nutzt einen Encoder-Decoder Architektur und wurde in PyTorch implementiert [9].

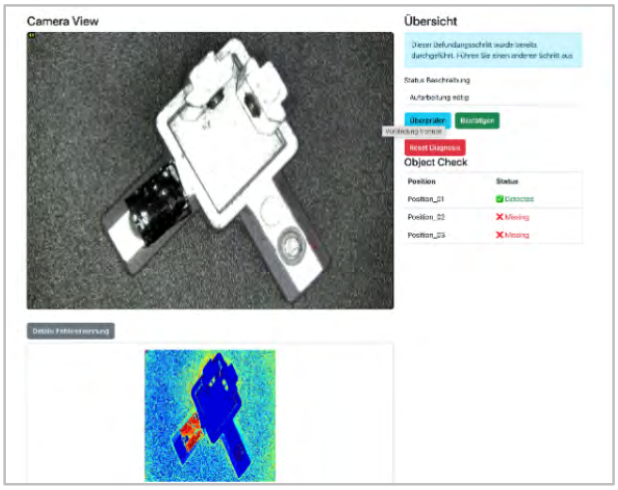


Abbildung 37: Schaubild der prototypischen Befundungseinheit – softwareseitige Unterstützung des Werkers mit Heatmap (eigene Darstellung)

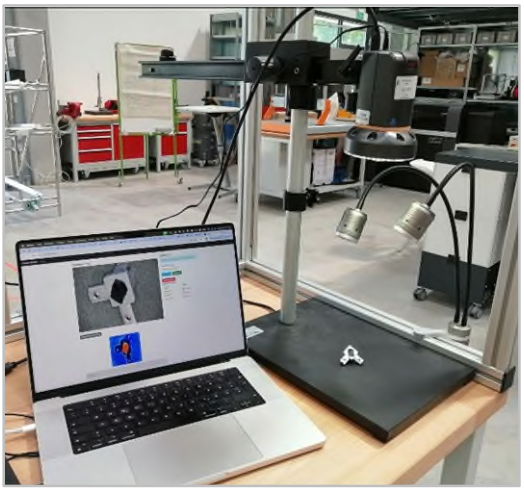


Abbildung 38: Schaubild der prototypischen Befundungseinheit – physischer Aufbau (eigene Darstellung)

Zirkuläres Manufacturing Execution Systems (MES)

Die operative Steuerung zirkulärer Wertströme innerhalb einer Produktion muss im Produktionssystems vorzusehen. Die Prozesse von zirkulären Wertschöpfungssystemen sind digital abzubilden, um diese steuern zu können. Etabliert sind auf operativer Ebene Manufacturing Execution Systems (MES). Aktuell etablierte MES-Lösungen bilden jedoch nicht die Anforderungen zirkulärer Wertschöpfungssysteme ab. Daher entwickelten Bitsch et al. [10] einen Ansatz für MES in zirkulären Wertschöpfungssystemen. Ausgehend von ist ein den Anforderungen an das MES (Legacy-Zugriff, lebenszyklusweite Datenhaltung, R-Strategie-spezifische Arbeitsanweisungen, offene Algorithmus-Integration, Nutzungsdaten-Monitoring) wird die zirkuläre MES-Architektur mit vier Diensten abgeleitet.

- **Workplan-Service:** Service für dynamische Arbeitspläne inkl. Stücklisten/Ressourcen)
- **Product-Data-Service**: Service als „digitales Produktgedächtnis“
- **Use-Service**: Service zum kontinuierliches Nutzungsmonitoring
- **Re-Entry-Service**: Service zur Zustandsbewertung und Auftragsanstoß in MES/ERP

Diese Dienste kapseln fachliche Verantwortung, sind lose gekoppelt und binden Bestands-IT über offene Schnittstellen (u. a. OPC UA, Pub/Sub) ein. Das Ergebnis ist eine praxisnahe Blaupause, wie zirkuläre Prozesse (Repair / Reuse / Remanufacturing / Recycling) trotz Legacy-Beschränkungen umgesetzt werden können: flexibel erweiterbar, in Echtzeit entscheidungsfähig und anschlussfähig für Diagnose-/Optimierungsbausteine sowie digitale Zwillinge.

Insbesondere mangelt es an funktionalen Erweiterungen, die für die Integration kreislauf-wirtschaftlicher Prozesse und R-Strategien erforderlich sind. Demnach erwiesen sich bestehende MES-Lösungen als nur eingeschränkt nutzbar für die Abbildung rückführungs- und

zustandsbasierter Produktionslogiken. Das entwickelte zirkuläre MES wird den Anforderungen gerecht und bietet hier eine Lösung.

Fazit

Die Untersuchung verdeutlicht, dass das Schließen der Wertschöpfungskreisläufe nur funktioniert, wenn alle Prozesse betrachtet und zirkulär ausgerichtet werden, von der Produktion bis hin zu den Auftragsabwicklungs- und Rücklieferprozessen. Durch die systematische Modellierung von Entscheidungspunkten, Subprozessen und Rückführungsmechanismen entsteht ein konsistentes Rahmenwerk, das die Besonderheiten bidirektionaler Material- und Informationsflüsse abbildet. Insbesondere die Anbindung vorgelagerter Befundungs- und Rückführungsprozesse verdeutlicht den Stellenwert einer sorgfältigen Prozessgestaltung für die ressourcenschonende Nutzung rückgeführter Produkte. Die entwickelten generischen Modelle und Subprozesse schaffen damit eine tragfähige Grundlage, um zirkuläre Produktionsstrukturen sowohl theoretisch fundiert zu beschreiben als auch praxisnah in industriellen Anwendungsszenarien nutzbar zu machen.

Literatur

1. Huysman S, Sala S, Mancini L et al. (2015) Toward a systematized framework for resource efficiency indicators. Resources, Conservation and Recycling 95:68–76. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.10.014
2. Skärin F, Rösiö C, Andersen A-L (2023) Towards Circular Production Systems: Outlining the Concept, Challenges and Future Research Directions. In: Valle M, Lehmhus D, Gianoglio C et al. (eds) Advances in System-Integrated Intelligence, vol 546. Springer International Publishing, Cham, pp 616–625
3. Figge F, Thorpe AS, Givry P et al. (2018) Longevity and Circularity as Indicators of Eco-Efficient Resource Use in the Circular Economy. Ecological Economics 150:297–306. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.030
4. Walter T, Riesener M, Schmitz S et al. (2025) Data-Based Modeling of Circular Economy Activities in Global Production Networks. In: Drossel W-G, Ihlenfeldt S, Dix M (eds) Production at the Leading Edge of Technology. Springer Nature Switzerland, Cham, pp 608–615
5. Potting J, Hekkert M, Worrell E et al. (2017) Circular Economy: Measuring innovation in the product chain, The Hague
6. Gausemeier J (ed) (2010) Vorausschau und Technologieplanung: 6. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, 28. und 29. Oktober 2010 in der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 276. Heinz-Nixdorf-Inst, Paderborn
7. Braungart M, McDonough W, Bollinger A (2007) Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design. Journal of Cleaner Production 15:1337–1348. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.003

8. Bressanelli G, Perona M, Saccani N (2019) Challenges in supply chain redesign for the Circular Economy: a literature review and a multiple case study. International Journal of Production Research 57:7395–7422. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1542176
9. Redmon J, Divvala S, Girshick R et al. (2015) You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection
10. Bitsch G, Senijic P, Braun A (2025) Circular Manufacturing Execution Systems in Conjunction with Legacy IT Systems., Stellenbosch

3.6 Sprachbasierte Anforderungsdefinition und multikriterielle Bewertung

Autoren: Hannes Wellmann; Felix Löser

Der Entwurf komplexer Systeme, wie er beispielsweise zu Beginn des Produktlebenszyklus eines Produkts auftritt, ist im Allgemeinen ein iterativer Prozess, in dem abwechselnd neue Varianten eines Systems entworfen (Synthese) und anschließend bewertet werden (Analyse). In der Synthese werden Modelle erstellt, welche verschiedene Disziplinen und Domänen überspannen und in verschiedensten Formaten abgebildet und berechnet werden: Beispielsweise eine EXCEL-Tabelle mit einfachen Berechnungen, ein CAD-Modell für die Geometrien, MATLAB-Modelle für Zustandsmodelle oder eine Finite-Elemente-Analyse (FEM) für strukturmechanische Analysen. Die Bewertung dieser Modelle erfolgt, um sicherzustellen, dass das entwickelte Produkt die spezifizierten Anforderungen erfüllt und die finanziellen und gesetzlichen Rahmenbedingungen einhält. Außerdem wird versucht Verbesserungen für die nächste Version des Entwurfs abzuleiten, sofern das aktuelle Ergebnis nicht zufriedenstellend ist.

Im V-Modell nach VDI 2206 erfolgt die Entwurfssynthese im linken Ast, welche in tieferen Ebenen immer detaillierter ausgearbeitet werden. Im Rechten Ast des V-Modells werden die entwickelten Komponenten schrittweise zu immer komplexeren Baugruppen und Systemen integriert. Diese Integration erfordert jedoch eine Bewertung (Verifikation) hinsichtlich Qualität und Kompatibilität mit anderen Systemkomponenten. Im Projekt CYCLOMETRIC werden, grundlegende Methoden entwickelt und implementiert, mit denen eine Bewertung der Qualität des Entwurfs umfassend und automatisiert gelingt.

3.6.1 Stand des Wissens

Mit dem Softwaretool Design Cockpit 43® (DC43) können graphenbasierte Entwurfssprachen erstellt, gespeichert, zur automatisierten Modellgenerierung maschinell ausgeführt und die Ergebnisse analysiert werden. Sowohl die Entwurfssprachen selbst auch deren generierten Modelle und Ergebnisse können zudem visualisiert werden. Als zentrales Datenmodell des Entwurfsprozesses dient der Entwurfsgraph, eine graphenbasierte Datenstruktur, welche regelbasiert mittels Transformationen aufgebaut und verändert wird. In Klassendiagrammen werden Klassen, ihre Attribute und mögliche Assoziationen definiert. Diesen können in Regeln instanziiert und dem Entwurfsgraphen hinzugefügt werden. In einem sogenannten Produktionssystem wird die Reihenfolge der Regeln als Aktivitätsdiagramm definiert, welche mit Kontrollstrukturen gesteuert werden können. So können Entwurfsentscheidungen auf Basis des aktuellen Entwurfsstandes abgebildet und maschinell durchgeführt werden. Zusätzlich können die Attribute der Klassen mit symbolischen mathematischen Gleichungen gekoppelt werden.

Diese Gleichungen werden in der Modellsynthese symbolisch gelöst, ihre Ergebnisse können für weitere Entwurfsentscheidungen im Produktionssystem verwendet werden. In Abbildung 39 ist ein Klassendiagramm beispielhaft dargestellt. Diese Fähigkeiten ermöglichen eine ganzheitliche Abbildung des V-Modells.

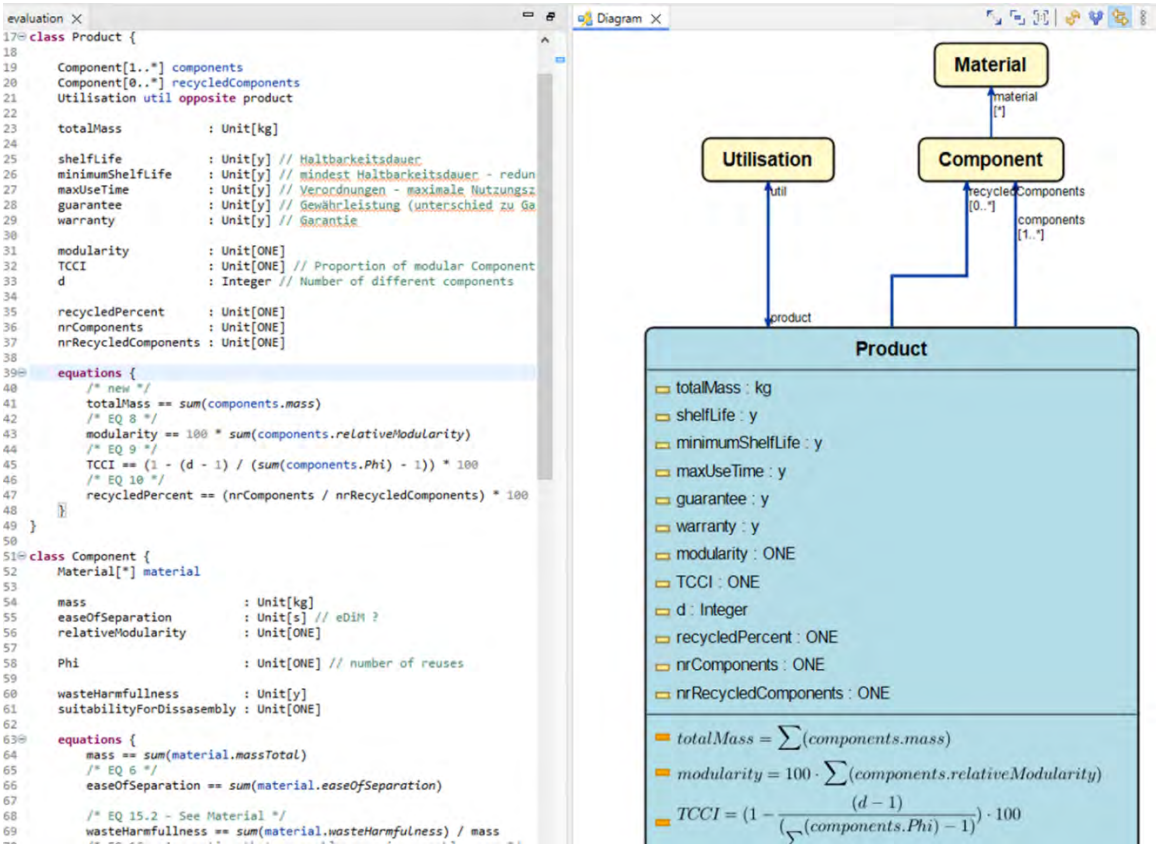


Abbildung 39: Ausschnitt des Klassendiagramms des CYCLOMETRIC-Use-Case Models in DC43 (eigene Darstellung)

3.6.2 Sprachbasierte Anforderungsdefinition

Jedes Projekt im Ingenieurwesen beginnt mit der Definition der Anforderungen, die das noch zu entwerfende Produkt zu erfüllen hat. Diese Anforderungen werden in Dokumenten, sogenannten Spezifikationen, gesammelt. Ein übliches Format zur Darstellung der Anforderungen ist das Requirement Interchange Format (reqif). Neben reqif sind auch andere Dateiformate für den Austausch üblich: zum Beispiel einfache Tabellen oder Textdokumente. Im Entwurfsprozess sind die Anforderungen ständigen Änderungen unterworfen. Die verschiedenen Beteiligten in der Produktentwicklung, zum Beispiel Kunden, Geschäftsführer oder Gesetzgeber, haben Teils widersprüchliche Interessen, deren Einfluss auf die Produktanforderungen nur iterativ nach der Bewertung eines Entwurfs ausgearbeitet werden kann. Eine automatisierte Bewertung der Anforderungen ermöglicht es, schneller verschiedene Produktvarianten hinsichtlich ihrer Qualität und Konformität zu bewerten.

Anforderungen (engl. Requirements) lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen:

- Funktionale Requirements (Verhaltensanforderungen)

- Nicht-funktionale Requirements (Entwurfsanforderungen)

Funktionale Requirements beschreiben des Verhaltens des Produkts im Betrieb (im Sinne eines abstrakten Automaten) [1]. Nicht-funktionale Requirements hingegen beschreiben die Eigenschaften des fertigen Produkts oder dessen Herstellung und Entwurf [2]. Ein nicht-funktionales Requirement ist beispielsweise, dass die Mittelkonsole eines PKW dem Lastfall „Aufstützen des Ellenbogens durch (Bei-)Fahrer“ ohne zu beulen, knicken oder brechen standhalten muss. Der Nachweis erfolgt dann z. B. indem die Mittelkonsole in einem Modell abgebildet und dort ein Punkt durch eine Punktlast belastet wird. Mithilfe einer geeignete (FEM) Simulation wird der Lastfall modelliert und anschließend die Erfüllung der Anforderung verifiziert. Im Rahmen des Projekt CYCLOMETRIC werden nur diese *nicht-funktionale* Requirements berücksichtigt.

Anforderungen jeglicher Art sind meist in natürlicher Sprache formuliert und können nicht ohne Weiteres maschinell interpretiert werden. Sie müssen in einem ersten Schritt formalisiert werden. Hierfür wird eine objektorientierte Analyse durchgeführt, in der die Substantive eines Textes die Kandidaten für die Klassenbegriffe in einem Klassendiagramm darstellen (z. B. Punktlast oder Belastungsort). Anschließend kann der Entwurfsgraph hinsichtlich Instanzen der jeweiligen Klassen untersucht werden und diese hinsichtlich der formalisierten Anforderung ausgewertet werden.

Folgende beispielhafte Anforderung soll die Methodik erläutern: „Alle Schraubverbindungen müssen gesichert sein“. Um diese Entwurfsvorschrift im Entwurfsgraphen zu prüfen, müssen die Klassenbegriffe Schraube und Sicherung im Entwurf vorhanden und assoziiert sein. Eine einfache Suche im Graph ergibt daher aller Schrauben mit Sicherung. In manchen Fällen ist dies bereits als Verifikation der Anforderung ausreichend, jedoch muss noch detaillierter auf den Entwurf eingegangen werden, da sonst Schrauben ohne Sicherung nicht gefunden werden. Eine Umformulierung der Anforderung ermöglicht eine präzisere Verifikation der Anforderung: „Wenn eine Schraubverbindung genutzt wird, dann muss diese entsprechend gesichert sein“. Hinter dieser Formulierung verbirgt sich der mathematische Operator der Implikation, wie in Tabelle 8 dargestellt. Im ersten Schritt wird nach allen Schraubverbindungen im Entwurfsgraph gesucht und anschließend geprüft, ob diese auch entsprechend gesichert sind. In Abbildung 40 werden verschiedene Anforderung in einem Editor für reqif Dateien dargestellt. Abbildung 41 zeigt die Visualisierung einer der in DC43 als Graphpattern modellierten Anforderungen. Die Formulierung der Anforderung als Implikation hat einen weiteren Vorteil: Wird in einem Entwurf keine Schraube verwendet, schlägt die Verifikation nicht fehl, da bei keiner gefundenen Vorbedingung die Implikation immer „wahr“ ist. Daher können Anforderungen aus allgemeinen Vorschriften auch für andere Projekte wiederverwendet werden.

a	b	$a \rightarrow b$
wahr	wahr	Wahr
wahr	falsch	Falsch
falsch	wahr	Wahr
falsch	falsch	Wahr

Tabelle 8: Mathematische Implikation: $a \rightarrow b$ wird gelesen als „Wenn a, dann b“. Für den Fall $a = falsch$ ist eine Implikation immer wahr und b wird nicht weiter berücksichtigt.

Zur Unterstützung der Formalisierung der Anforderungen steht eine graphische Nutzerschnittstelle (GUI) sowie eine Visualisierung der formalisierten Anforderung zur Verfügung. Die GUI erlaubt die Auswahl einer *reqif*-Datei und stellt anschließend alle gefundenen Anforderungstypen dar. Es kann ausgewählt werden, ob nur Anforderungen eines bestimmten Typs oder alle Anforderungen berücksichtigt werden sollen. Anschließend werden alle Anforderungen mit korrekter Identifikationsnummer, Versionsnummer und Definitionstext generiert. Auf Wunsch kann in der *reqif*-Datei ein Verweis auf die formalisierte Anforderung hinterlegt werden. Dann müssen lediglich die Graphpatterns manuell definiert werden. Hier stehen unterstützend die für Softwareentwicklungsumgebungen typischen Hilfsmittel wie ein *Content Assist* (Assistenz zur inhaltlichen Vervollständigung) zur Verfügung.

Die beschriebene Methode wird für Überprüfung der FEM-Analyse für die Ermittlung der minimale Lagendicke des Faserverbundwerkstoffes der Mittelkonsole verwendet. Die hierfür erforderliche Topologieoptimierung ist in einer entsprechenden Entwurfssprache implementiert (siehe Kapitel 4.4). Die Lastfälle sind in einem Tabellendokument definiert. Nach der Überführung in eine *reqif*-Datei, werden die Anforderungen auf die beschriebene Weise verarbeitet. Nach der Formalisierung der Anforderungen kann automatisiert verifiziert werden, dass die Entwurfssprache zur Topologieoptimierung den externen Optimierungs-Solver mit den richtigen Randbedingungen ansteuert.

	ID	Description	Lastfall	Art	Groesse
1	1	Requirement Betriebslasten maximale Verformung			
1.1	1.1		Vertikal hinten	Punktlast	150 N
2	2	Requirement Misuse			
2.1	2.1		Längsrichtung von hinten	Punktlast	400 N
2.2	2.2		Längsrichtung von vorne	Punktlast	400 N
2.3	2.3		Seitlich vorne	Punktlast	400 N
2.4	2.4		Vertikal vorne	Punktlast	900 N

Abbildung 40: Anforderungen Betriebslast im reqif-Editor ReqIFStudio (eigene Darstellung)

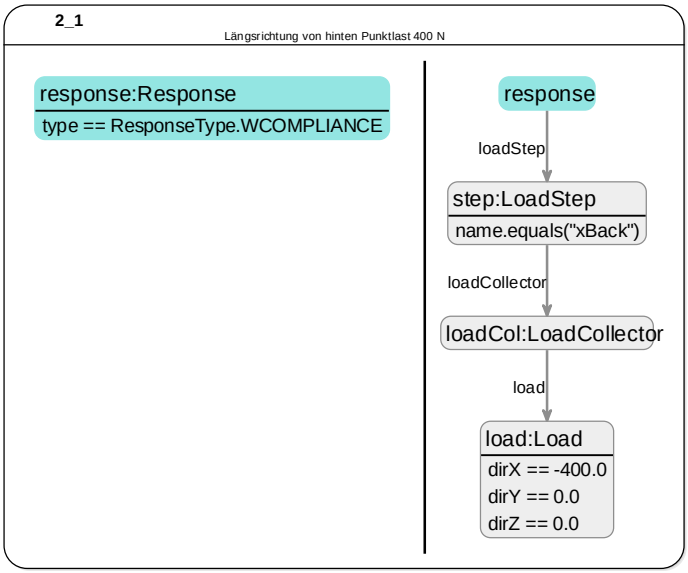


Abbildung 41: Diagramm der formalisierten Anforderung mit ID 2.1 "Requirement Misuse: Längsrichtung von hinten" (eigene Darstellung)

3.6.3 Multikriterielle Analyse und Bewertung

Die Analyse und Bewertung von Entwürfen sind, wie eingangs beschrieben, ein elementarer Baustein, um das Ziel eines verifizierten und optimalen Entwurfs zu erreichen. Zur Bewertung komplexer Systeme ist in der Regel eine Vielzahl von Aspekten und Subsystemen zu betrachten und all deren Einzelbewertungen müssen zu einer Gesamtbewertung des gesamten Entwurfs zusammengeführt werden. Dabei ist es essenziell, die Gesamtbewertung möglichst objektiv zu aggregieren, um letztendlich den objektiv besten Entwurf zu erhalten. Klassischerweise ist die Aggregation aber einfach eine gewichtete Summe mit selbst festgelegten Gewichten.

Einen objektiven Ansatz zur Bestimmung der Gesamtbewertung liefert das Pi-Theorem von Buckingham. Denn grundsätzlich erfolgt die Bewertung eines Entwurfs stets auf Basis der physikalischen Größen, in denen das Entwurfsobjekt beschrieben wird. Das Beschreibungsmodell soll dabei dimensionshomogen (physikalisch sinnvolle Größen) und vollständig sein, das Bewertungsmodell hingegen dimensionslos (unabhängig von den gewählten Einheiten) und minimal (kein Aspekt soll mehrfach einfließen), was Abbildung 42 schematisch darstellt.

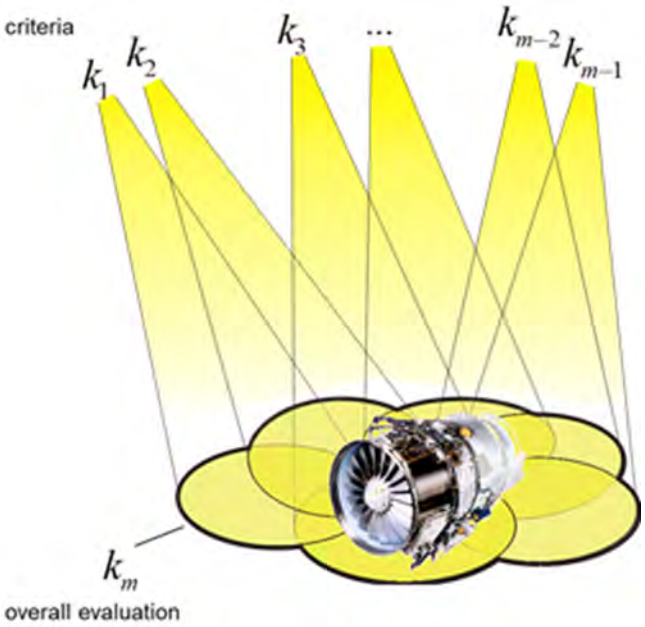


Abbildung 42: Schematische Darstellung der „Mehrfach Betrachtung“ einer physikalischen Beschreibung (eigene Darstellung)

Das Pi-Theorem besagt, dass jede dimensionsbehaftete, physikalisch vollständige Gleichung in eine entsprechende dimensionslose Gleichung umgeformt werden kann [3]. Die dimensionsbehafteten Größen werden dabei in entsprechende dimensionslose Ähnlichkeitskennzahlen bzw. Invarianten (PIs) transformiert. Die Transformation erfolgt mittels Dimensionsanalyse, aus der auch die Definitionsgleichungen der PIs ermittelt werden [4]. Dies ist für Einzelsysteme selbst dann möglich, wenn die exakte (analytische) Gleichung nicht bekannt ist. Es ist lediglich die Kenntnis der physikalischen Größen, die in einer Gleichung vorkommen, notwendig (sog. *Relevanzliste*) sowie deren Einheiten. Beispielsweise Einsetzen bekannter Messwerte für die physikalischen Größen in die Definitionsgleichung ergibt direkt die Werte der entsprechenden PIs. Die Anzahl der PIs ist gemäß des Pi-Theorems minimal und

damit kleiner oder gleich der Zahl der ursprünglichen dimensionsbehafteten Größen. Die so ermittelten PIs haben somit die für Bewertungskriterien geforderten Eigenschaften und können direkt, als Bewertung verwendet werden.

Im Rahmen des Projekts CYCLOMETRIC ist diese Methodik als Feature in DC43 implementiert. Die PIs werden, basierend auf den im Klassendiagramm definierten Gleichungen, mittels Dimensionsanalyse berechnet. Die Einheiten der physikalischen Größen werden direkt aus den Einheiten der im Klassendiagramm definierten entsprechenden Attribute (siehe Abbildung 39) übernommen. Die definierten Gleichungen werden anschließend in ihre dimensionslose Form überführt und die PIs eliminiert, die in mehreren Gleichungen enthalten sind. Um aus den Einzelbewertungen im letzten Schritt die Gesamtbewertung zu aggregieren, wird mithilfe der dimensionslosen Gleichungen ein Graph der Abhängigkeit der PIs erstellt. Die Wurzel-Knoten dieses Graphs sind die PIs, die die Gesamtbewertungen repräsentieren und deren Werte nach einer topologischen Sortierung aus den Subsystem PIs ausgerechnet werden können. All dies ist vollständig automatisiert. In der ebenfalls implementierten Visualisierung der Ergebnisse werden sowohl die Definitionsgleichungen der einzelnen Ähnlichkeitskennzahlen dargestellt als auch ihre Beziehungen untereinander verdeutlicht.

Für den Use-Case einer Mittelkonsole existiert ein vereinfachtes, in DC43 erstelltes und analysiertes Modell. Ausschnitte der Ergebnisse sind in Abbildung 43 dargestellt.

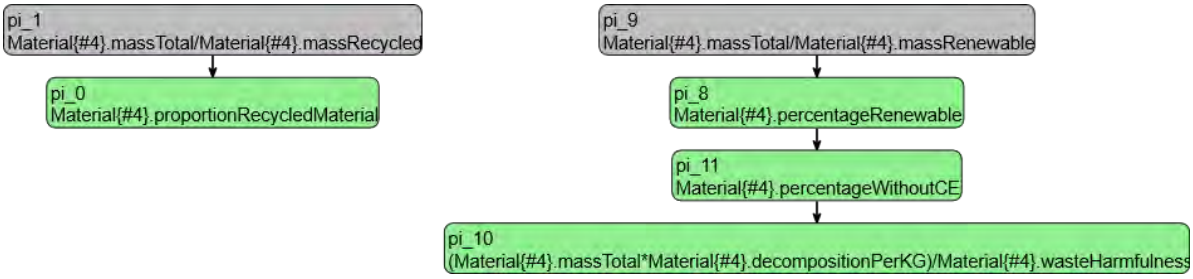


Abbildung 43: Abhängigkeiten ausgewählter dimensionsloser PIs im Mittelkonsolenmodell (eigene Darstellung)

3.6.4 Sensitivitätsanalyse

Zur effizienten Optimierung der Parameter eines Entwurfs ist neben der eigentlichen Bewertung die Sensitivität des Systems bezüglich der einzelnen Parameter von großem Interesse. Diese drückt aus, wie stark eine Änderung einer gegebenen Größe, die sich daraus ergebenden anderen Größen des Entwurfs, beeinflusst. Parameter mit großem Einfluss auf andere werden als *Design-Driver* bezeichnet.

Für CYCLOMETRIC ist die Sensitivitätsanalyse in DC43 auf Basis einer numerischen Differentiation implementiert. Dazu wird das Gleichungssystem mit systematisch veränderten Werten seiner Konstanten wiederholt ausgewertet, sodass der Einfluss der jeweiligen konstanten Attribute auf die Werte der berechneten Attribute bestimmt werden kann [5]. Die so ermittelten Tangentensteigungen werden in einer sogenannten Heat-Map visualisiert, siehe Abbildung 44. In dieser Heatmap sind in jeweils einer Spalte eine Konstante und in einer Zeile eine Variable repräsentiert. Jede Zelle wird entsprechend der Steigung der Tangente der Variable

eingefärbt, die diese entlang der Dimension, die die Konstante repräsentiert am Arbeitspunkt des Modells hat. Die Design-Driver lassen sich so einfach anhand ihrer farblichen Hervorhebung identifizieren. Starke positive Einflüsse auf das Entwurfsziel sind in einem kräftigen Rot dargestellt, starken negativen Einflüsse Blau. Die sortierten Absolutbeträge ergeben dann die Liste der wichtigsten Einflussgrößen (Design-Driver) auf den Entwurf (nicht dargestellt).

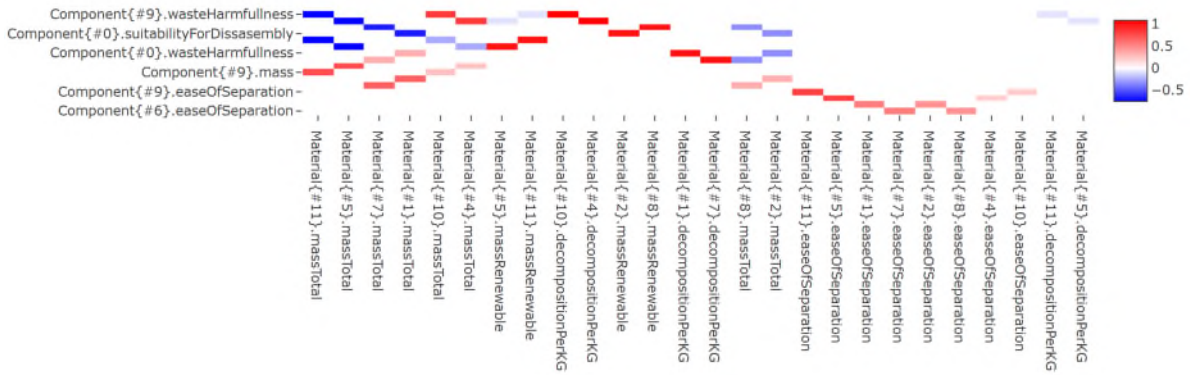


Abbildung 44: Sensitivitätsanalyse des Mittelkonsolenmodells (Heat-Map) (eigene Darstellung)

Fazit

Die im Rahmen des Projektes CYCLOMETRIC erzielten Ergebnis, ermöglichen die automatisierte Verifikation von nichtfunktionalen Anforderungen mit Hilfe von graphenbasierten Entwurfssprachen. Die Voraussetzung hierfür ist ein Entwurfsgraph sowie eine objektorientiert modellierte Begriffsontologie in Form eines Klassendiagramms, mit deren Hilfe die Anforderungen als Graphensuchmuster formalisiert und automatisiert im Entwurf gefunden und ausgeprägt werden können. Die formalisierten Anforderungen können so auch für andere Projekte übernommen werden und können sowohl als *reqif*- als auch als *Eclipse EMF Ecore* Datei ausgetauscht werden.

Ebenso ist ein Unterstützungswerkzeug für die automatisierte Bewertung von Systemen verfügbar. Dieses ermöglicht es vollständig automatisch, aus den im Klassendiagramm modellierten Informationen die dimensionslosen Ähnlichkeitskennzahlen zu ermitteln und zu verknüpfen, die eine neutrale Bewertung des entworfenen Systems ermöglichen. Die erstellte Visualisierung vereinfacht die Auswertung. Mit Hilfe der umgesetzten automatisierte Sensitivitätsanalyse sind die Design-Driver eines Entwurfs leicht zu identifizieren. Den damit realisierten Entwurfszyklus für eine Mittelkonsole zeigt Abbildung 45.

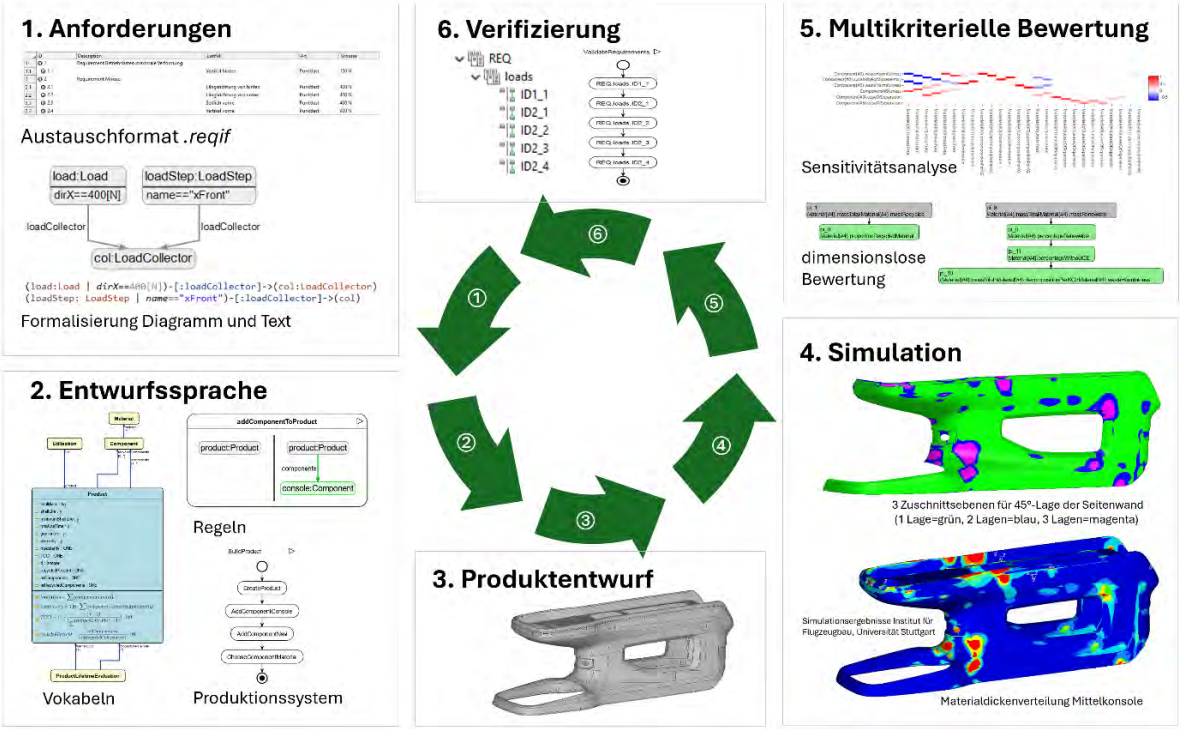


Abbildung 45: Entwurfszyklus der Mittelkonsole, implementiert mit graphenbasierten Entwurfssprachen. (eigene Darstellung)

Literatur

1. IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology. Accessed 14 Aug 2025
2. Glinz M (2007) On Non-Functional Requirements. In: 15th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE 2007). IEEE, pp 21–26
3. Buckingham E (1914) On Physically Similar Systems; Illustrations of the Use of Dimensional Equations. Phys Rev 4:345–376. https://doi.org/10.1103/PhysRev.4.345
4. Rudolph S (2002) Übertragung von Ähnlichkeitsbegriffen. Zugl.: Stuttgart, Univ., Habil.-Schr., 2002. Bericht aus dem Institut / Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Universität Stuttgart, 37-2002. Inst. für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Stuttgart
5. Bölling M (2015) Lösungspfadbasierte Analysen im Entwurf komplexer Systeme. Universität Stuttgart

3.7 Kreislauforientierte Konstruktions- und Fügeprinzipien

Autoren: Robin Ritter; Oliver Schweizer

Eines der größten Hemmnisse der Kreislauffähigkeit von Produkten ist die dauerhafte mechanische Verbindung ihrer Komponenten. Dadurch wird ein sortenreines Zerlegen am Ende des Product-Life-Cycle sehr aufwendig oder gar unmöglich. Da das Zerlegen eines Produkts sowie die Rückführung der darin enthaltenen Ressourcen am Ende der Nutzungsdauer nicht in die Pflicht des Herstellers fallen, gab es für den Produzenten in der Vergangenheit keine Anreize, diesen Prozess wirtschaftlich zu optimieren.

Viele R-Strategien (siehe Kapitel 2) beruhen jedoch auf der Möglichkeit, Produkte wieder sortenrein in ihre einzelnen Komponenten und Rohmaterialien auftrennen zu können, um diese dann materialgerecht weiter verwenden zu können. Bei Materialien wie Duroplasten, die während der Herstellung beispielsweise eine chemische Reaktion eingehen, oder bei Bauteilen, die miteinander verklebt werden, ist dies entweder technisch nicht mehr möglich oder wirtschaftlich so aufwendig, dass das Material nur noch gedowncycelt werden kann.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der intensiveren Nutzung von reversiblen Konstruktions- und Fügeprinzipien, die in zwei Stufen unterteilt werden kann. Im ersten Fall sind die Komponenten auf eine Art und Weise miteinander verbunden, mit der sie beliebig oft ausgetauscht werden können, während sie nicht beschädigt werden und ihre Funktion damit erhalten bleibt. Im zweiten Fall kann die Komponente zumindest so zerlegt werden, dass eine sortenreine Trennung möglich ist, auch wenn dies zur Zerstörung und dem damit verbundenen Wertverlust des Bauteils führt.

In beiden Fällen ist das Ziel, das enthaltene Ressourcenkapital ideal weiter nutzen zu können, damit dessen Wert zu erhalten und das Einführen neuen Materials in den Kreislauf zu verhindern.

3.7.1 Alternative Fügeprinzipien

Der Demonstrator der eigens entworfenen Mittelkonsole dient nicht nur als neutrale Grundlage zur beispielhaften Berechnung für die entwickelten Modelle und Softwaretools, sondern auch als visuelles Kommunikationsmittel für das gesamte Projekt. Durch eine offene und ehrliche Produktsemantik stellen die Designentwürfe die alternativen Fügeprinzipien zur Schau. Die Komponenten sowie deren Funktionsweise sollen nicht wie üblich versteckt werden, sondern als Design-Thema präsent und für den Betrachter nachvollziehbar sein.

Im Folgenden sind Prinzipien dargestellt, die Komponenten durch lösbare Verbindungen zusammenhalten. Die sehr simpel gewählten Bauweisen sollen als bewusste Provokation gegenüber dem Status-Quo marktüblicher Konstruktionen im Pkw-Interieur verstanden werden. Diese Form der „Überzeichnung“ dient in frühen Kreativphasen der klaren Darstellung von Konzepten.

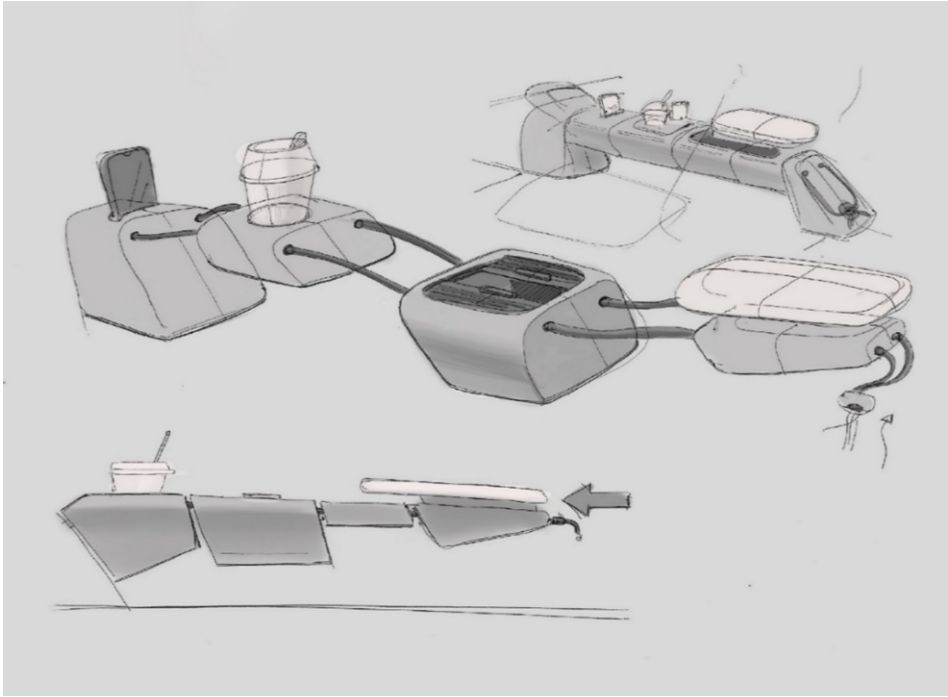


Abbildung 46: Studie zur Produktsemantik als Leitbild für das Produktdesign der Mittelkonsole. Ein einziger Seilzug hält mehrere Komponenten zusammen. Über einen einfachen Verschluss am Seilzug kann das gesamte System aufgelöst oder gespannt werden. (eigene Darstellung)

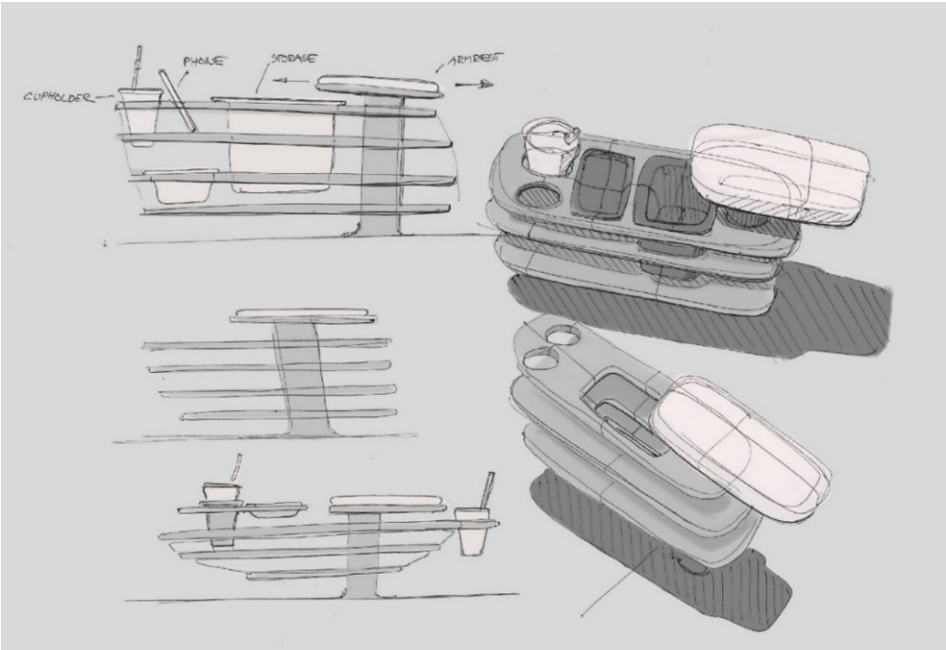


Abbildung 47: Studie zur Produktsemantik als Leitbild für das Produktdesign der Mittelkonsole. Mehrere Spanten definieren den Körper der Mittelkonsole und sind zugleich Halter diverser Funktionselemente, die ohne mechanische Verbindung platziert werden. (eigene Darstellung)

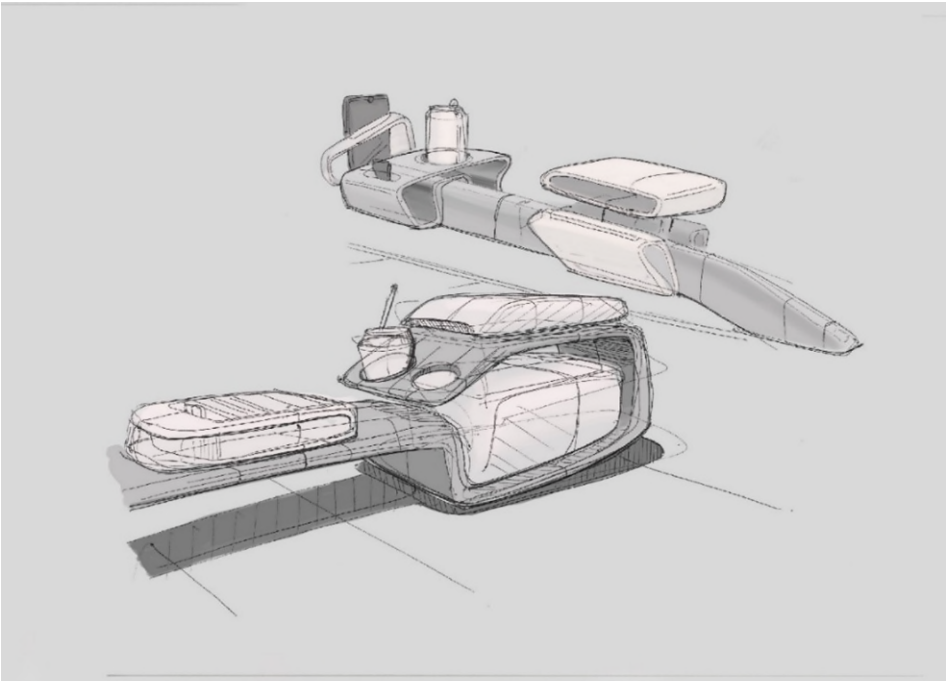


Abbildung 48: Studie zur Produktsemantik als Leitbild für das Produktdesign der Mittelkonsole. Der Einsatz von Formholz (oder vergleichbarer Schichtmaterialien) ermöglicht die Gestaltung von Körpern, die Statik, Funktion und Ästhetik verbinden. (eigene Darstellung)

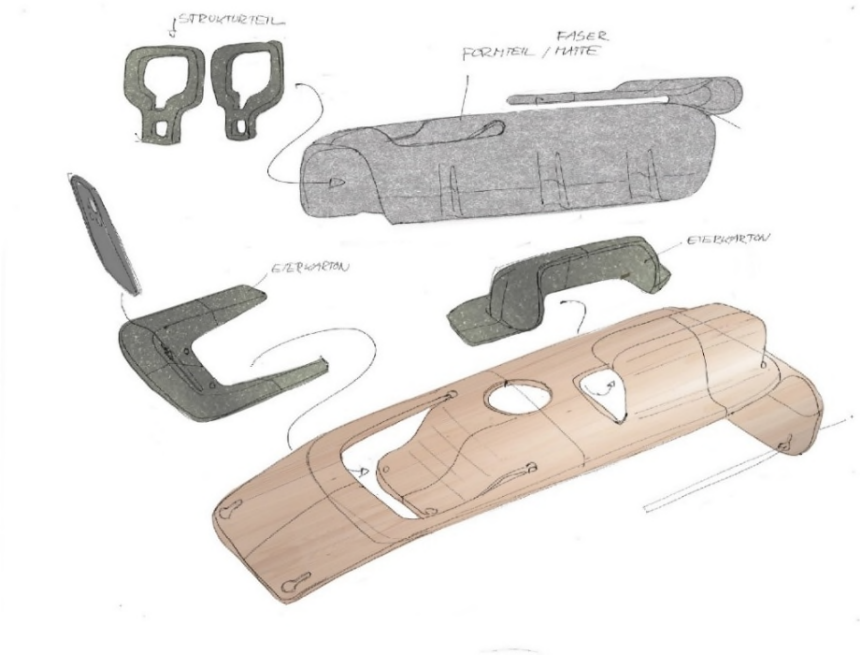


Abbildung 49: Studie zur Produktsemantik als Leitbild für das Produktdesign der Mittelkonsole. „Materialgerechte Konstruktion“ am Beispiel von Schichtholz, Presspappe und Filz. (eigene Darstellung)

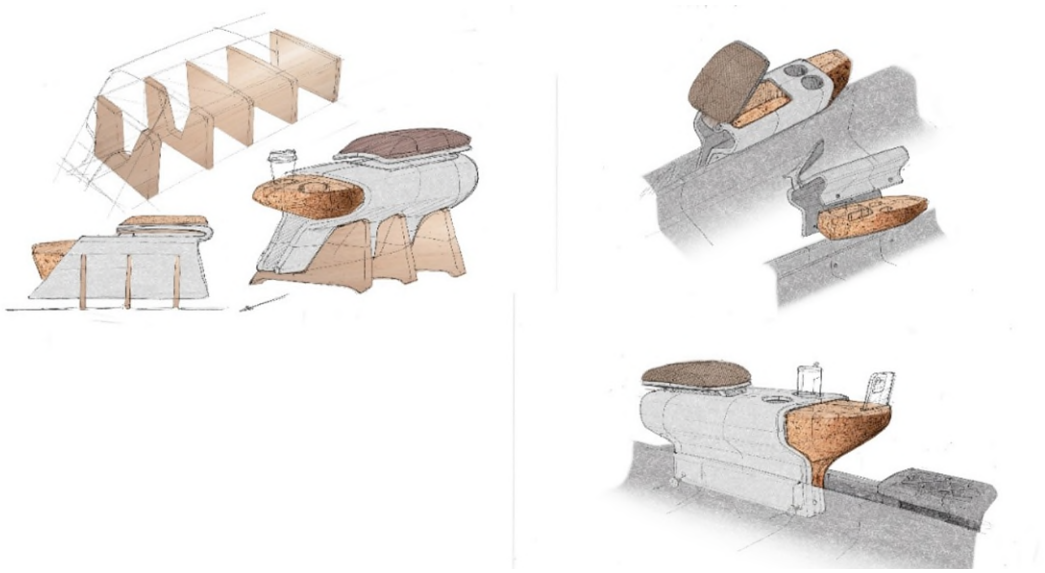


Abbildung 50: Studie zur Produktsemantik als Leitbild für das Produktdesign der Mittelkonsole. Variation und Kombination der vorangegangenen Prinzipien. Ein Körper aus Kork bildet den Kern, das umwickelte Fasermaterial (z. B. Filz) ermöglicht Funktionen und schafft gleichzeitig Stabilität. (eigene Darstellung)

Die dargestellten Entwürfe nutzen weitere Kreativtechniken, um neue Impulse und Alternativen zur Problemlösung zu finden:

- Übertragung und Assoziation – Prinzipien und Materialien werden aus anderen Kategorien / Branchen, hier zum Beispiel dem Möbelbau, übernommen.
- Einschränkung und Reduktion – die Anzahl der Materialien und oder Fertigungsmethoden wird beschränkt oder geändert.

Durch das radikale Verändern dieser Faktoren entsteht eine neue, für das Produkt ungewohnte Ästhetik, sowie Ideen und Denkanstöße, die zunächst nicht umsetzbar sind, aber in veränderter oder abgeschwächter Form viele Lösungsansätze und Alternativen für das resultierende Produkt liefern können.

3.7.2 Sammlung allgemeiner Verschluss- und Füge-Prinzipien

Der Demonstrator der Mittelkonsole ist als vollkommen zerlegbare Baugruppe gestaltet, um den Anspruch an ein zirkuläres Produkt zu unterstreichen. Er nutzt dabei Verschluss- und Fügeprinzipien wie beispielsweise Stecken, Schrauben, Klipsen, Pressen, Nähen, Nieten oder Umspannen. Im Folgenden ist eine Sammlung an Verschluss-Prinzipien dargestellt, die ein einfaches, werkzeugloses Öffnen bzw. Trennen von Bauteilen ermöglichen.

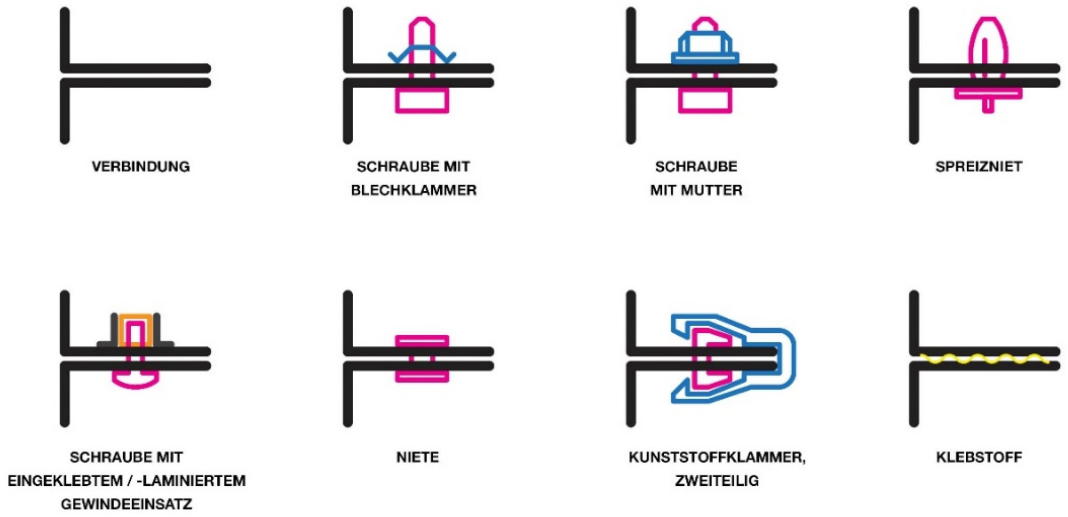


Abbildung 51: Sammlung von Fügeverfahren für Materialien mit konstanter Wandstärke. (eigene Darstellung)

Je nach Material, Anwendungszweck und Einbauposition lassen Komponenten manche Fügekonzepte zu, während sie für andere eher ungeeignet sind. In der folgenden Darstellung werden beispielsweise Fügetechniken speziell für Halbschalen untersucht, die aufgrund ihres Herstellungsprinzips nur eine konstante Wandstärke aufweisen können.

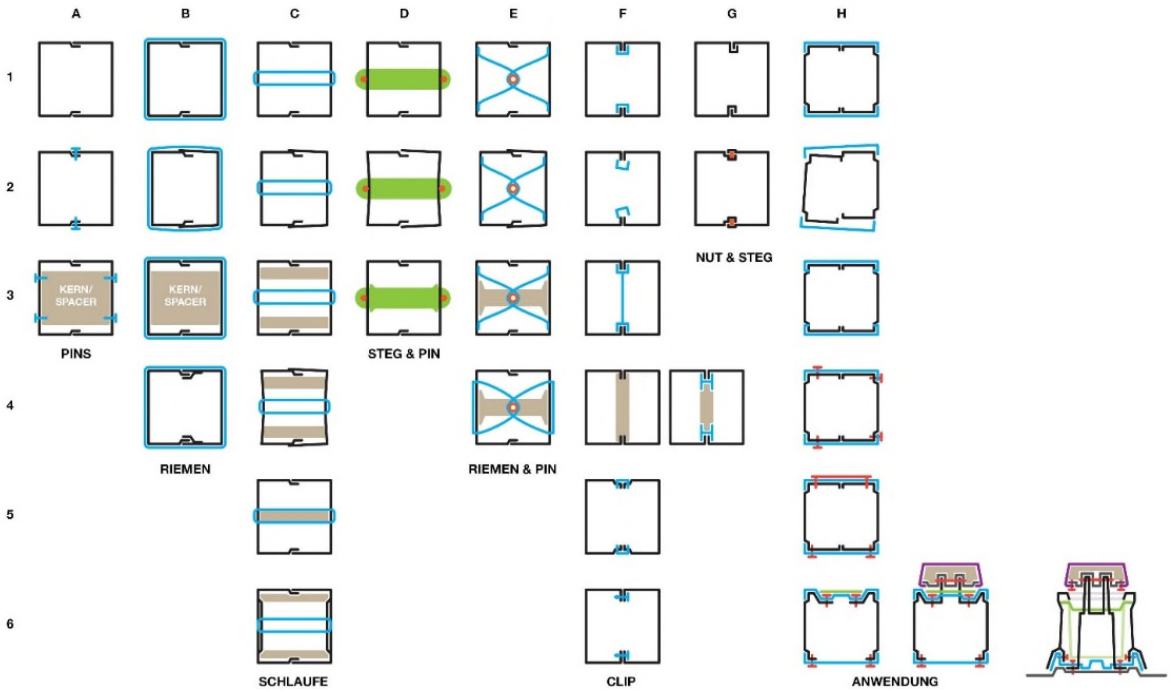
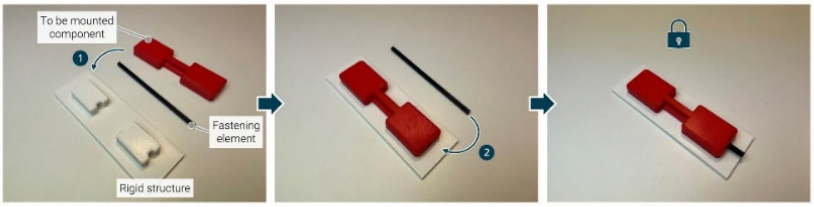
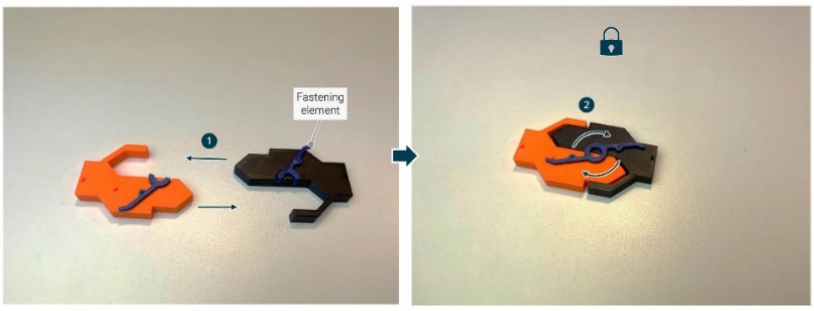
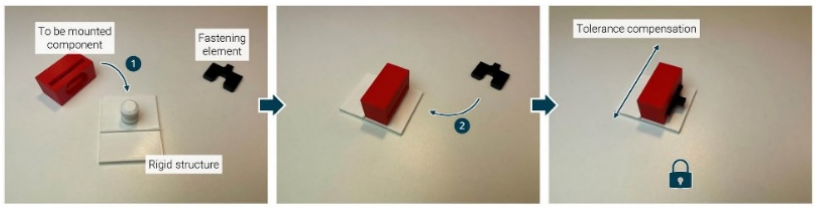


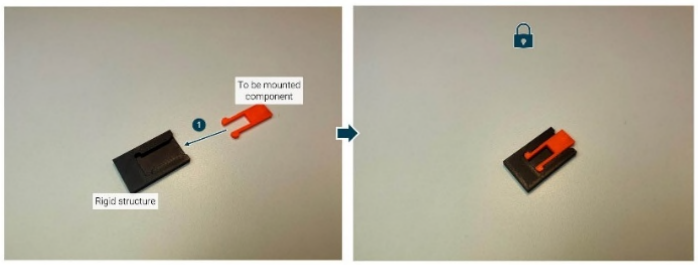
Abbildung 52: Beispielhafte Verbindungsprinzipien für die Halbschalen der Mittelkonsole. (eigene Darstellung)

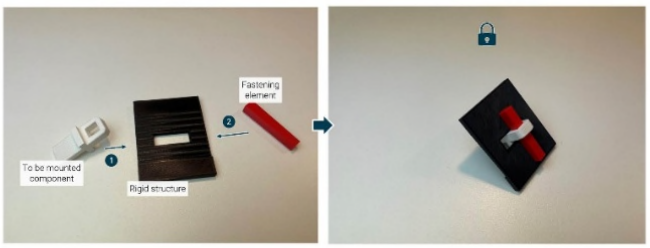
Einige Verschluss- und Fügeprinzipien werden im 3D-Druck-Verfahren hergestellt und getestet. Diese Untersuchung ergibt einen Pool an Methoden, auf die bei der Konstruktion des Demonstrators zurückgegriffen werden kann.

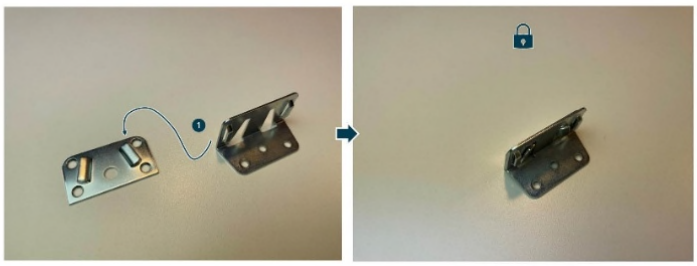

To be mounted component
Fastening element
Rigid structure


Fastening element


To be mounted component
Fastening element
Rigid structure
Tolerance compensation


To be mounted component
Rigid structure


Fastening element
To be mounted component
Rigid structure



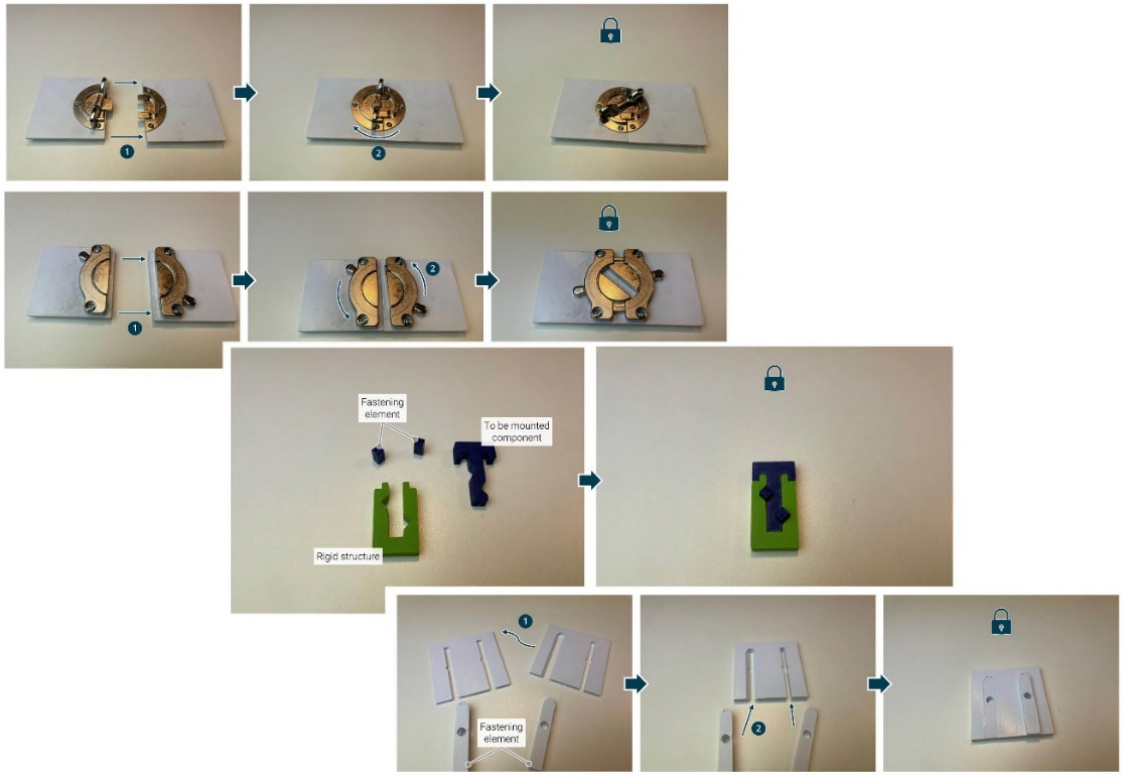


Abbildung 53: Verschluss- und Fügeprinzipien im Test (© Forward Engineering)

3.7.3 Übertragung der ausgewählten Prinzipien auf die Demonstrator-Mittelkonsole

Mit den ausgewählten Verschluss- und Fügeprinzipien wird die Demonstrator-Mittelkonsole unter Berücksichtigung der definierten Nutzervorgaben konstruiert und im Detail gestaltet.

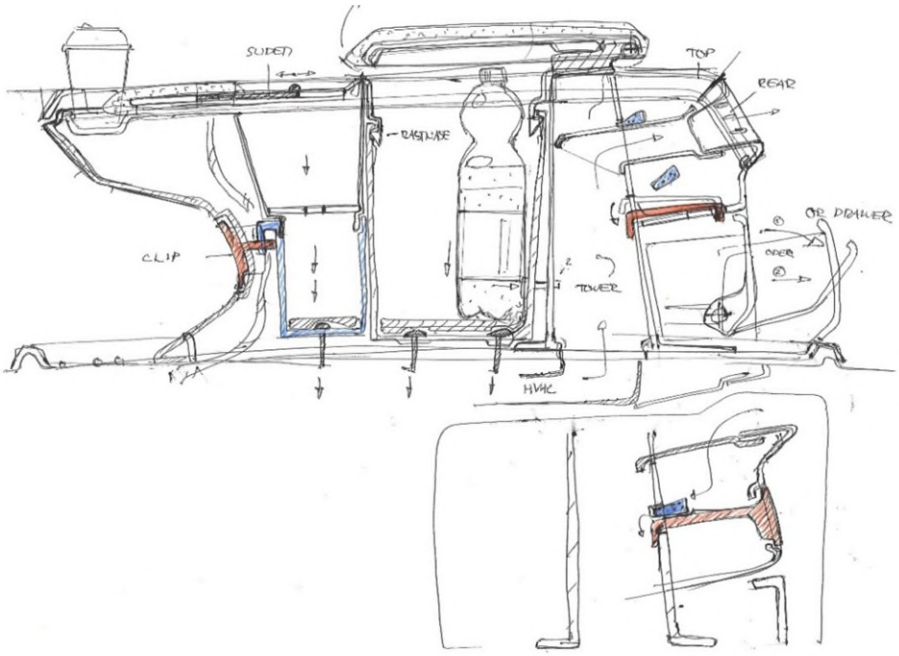


Abbildung 54: Schnittdarstellung zeigt den Prinzip-Aufbau der Mittelkonsole. (eigene Darstellung)

Den Hauptkörper der Mittelkonsole stellen die beiden großen, Halbschalen dar. Diese müssen so verbunden werden, dass sie auch unter mechanischer Belastung – z. B. Vibrieren und Rütteln des Fahrzeugs, Temperaturunterschieden und dem Tragen großer Lasten (sich abstützende Insassen) – zuverlässig zusammenhalten.

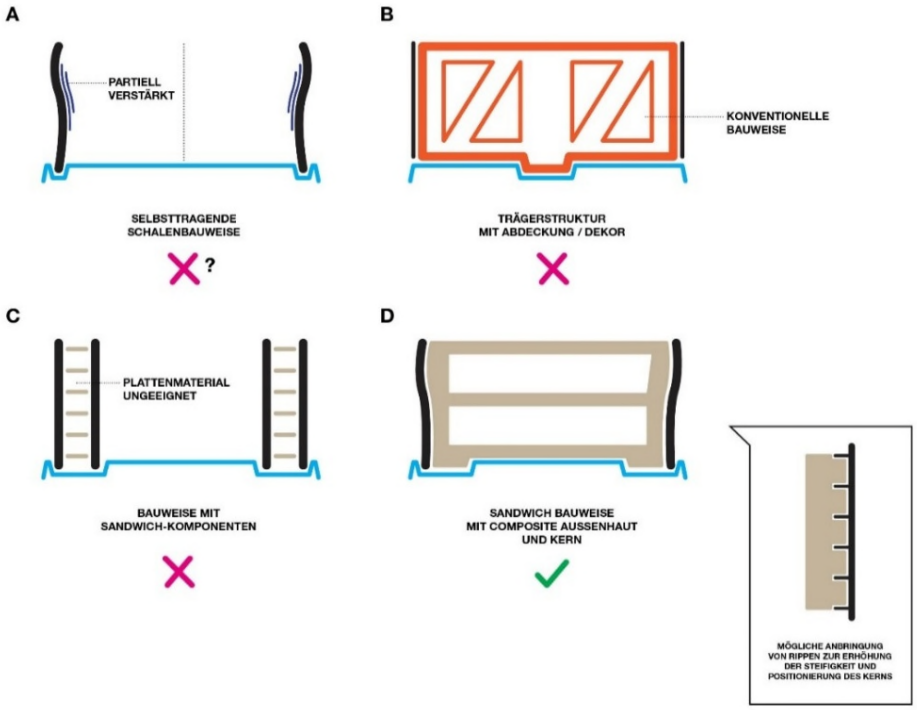


Abbildung 55: Skizze zur Bewertung und Auswahl des für die Anwendung am besten geeigneten Prinzips. (eigene Darstellung)

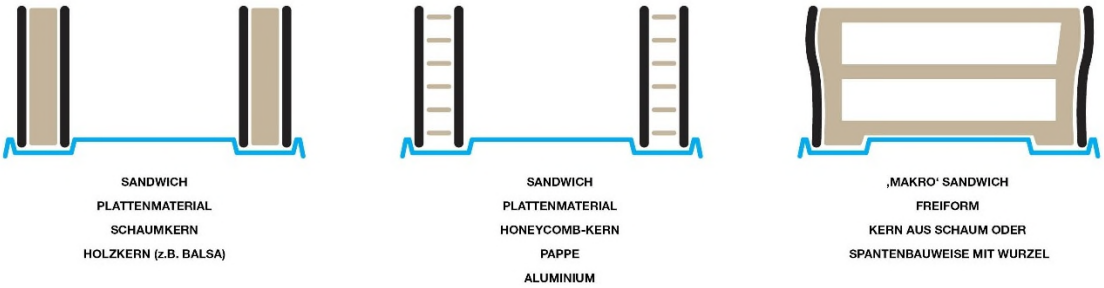


Abbildung 56: Beispiele von Sandwichbauweisen, abgeleitete Prinzipskizzen zur Übertragung auf den Anwendungsfall. Evaluation sogenannter „Sandwich"-Prinzipien, bei denen sich Materialien mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften zu einer hochfesten, aber trotzdem sehr leichten Gehäuseschale verbinden. (eigene Darstellung)

Um dies zu gewährleisten, werden sie aus nachhaltigem Faserverbundwerkstoff gefertigt. Das Material zeichnet sich durch eine hohe Steifigkeit bei geringem Gewicht aus. Die in Abschnitt 3.7.1 erläuterte Abstufung der Zerleg- bzw. Trennbarkeit zeigt sich anhand dieses Bauteils: das Bauteil kann zwar ohne Beschädigung aus der Baugruppe herausgenommen und ausgetauscht werden, die Fasern und das Kunstharz innerhalb des Bauteils selbst können allerdings nicht mehr sortenrein vollständig voneinander getrennt werden.

In der Matrix dieser Komponente kommen jedoch natürliche Flachsfasern zum Einsatz, die eine hohe Zugkraft aufweisen. Auf Basis dieser Materialvorgabe sind die Schalen so entworfen, dass das Potenzial des Materials zur Schau gestellt werden kann.

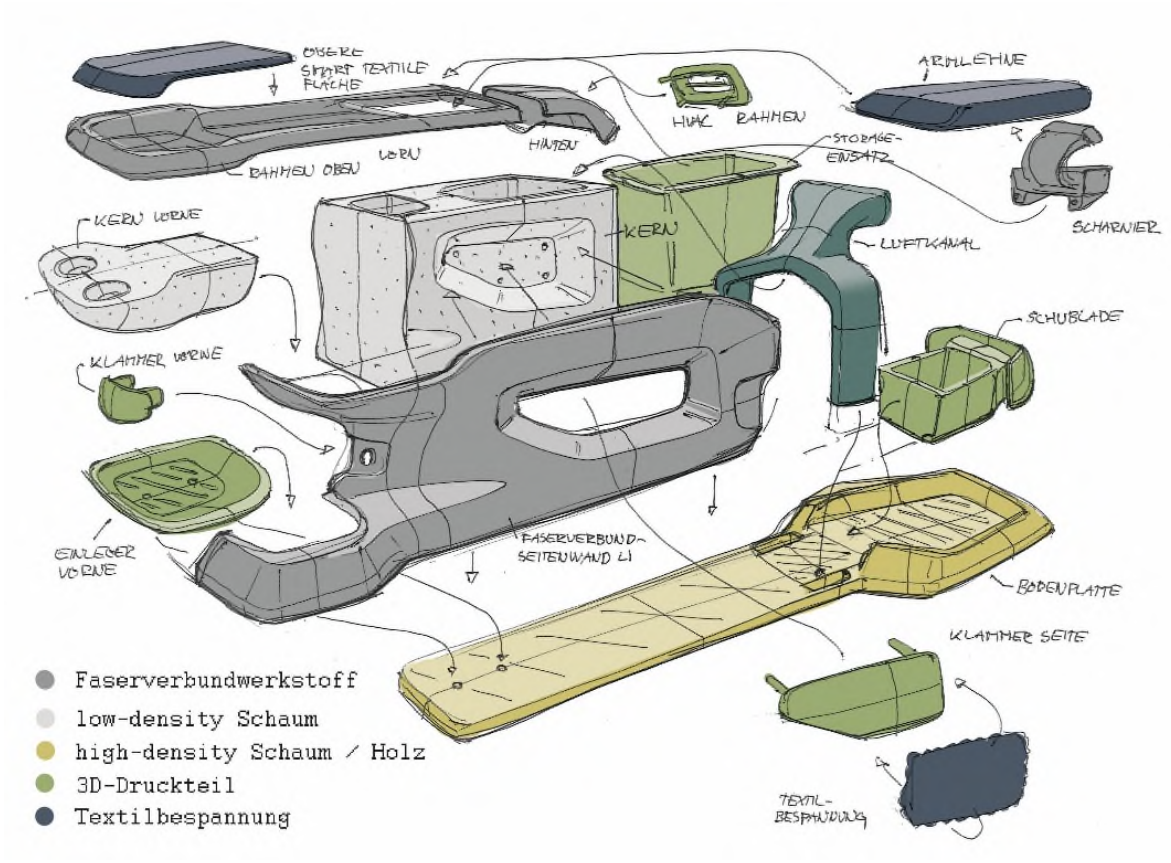


Abbildung 57: Explosionsdarstellung der Mittelkonsole während des Entwurfsprozesses. (eigene Darstellung)

Die beiden Schalen werden oben von einem Rahmen umfasst, der die Oberseite und damit die hauptsächlich dem Nutzer zugewandte Seite darstellt. Der Rahmen ist ebenfalls aus Faserverbundwerkstoff gefertigt. Im vorderen Bereich befinden sich die beiden integrierten Cupholder. Im Inneren des Rahmens ist mittig und ergonomisch günstig die digitale Interaktionsfläche untergebracht, im hinteren Bereich die Armauflage und darunter ein großer Storage-Container. Hinter diesem geschlossenen Staufach befindet sich noch der Klimaausströmer für die Fond-Passagiere samt dessen in das Textil integrierte Bedienfeld, sowie darunter eine Schublade mit einem weiteren Staufach.

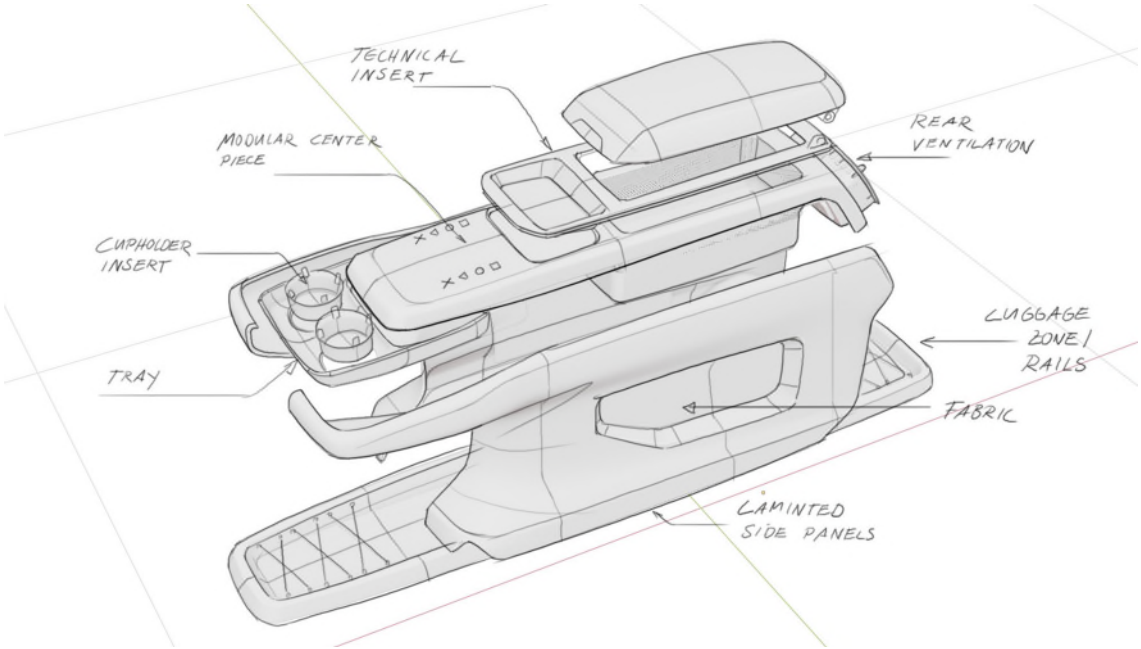


Abbildung 58: Explosionsdarstellung der Mittelkonsole. Der Hauptkörper besteht aus zwei Halbschalen zwischen die sich oben die Funktionselemente klemmen. (eigene Darstellung)

Während der Rahmen die beiden Hauptkörper-Schalen im oberen Bereich zusammenhält, werden diese vorne durch eine zusätzliche Klammer gehalten. Die Interaktionsfläche wird mit ihrem Grundkörper am oberen Rahmen verschraubt, während der Storage-Einsatz von oben unter der Armauflage eingeführt wird und so die Stabilität der gesamten Konstruktion erhöht. Die Armauflage besitzt kein traditionelles, aufwendiges und schweres Scharnier, sondern wird lediglich durch einen Riemen mit der Mittelkonsole verbunden. Im geschlossenen Zustand findet sie durch Formschluss ihre Position oberhalb des Staufachs.

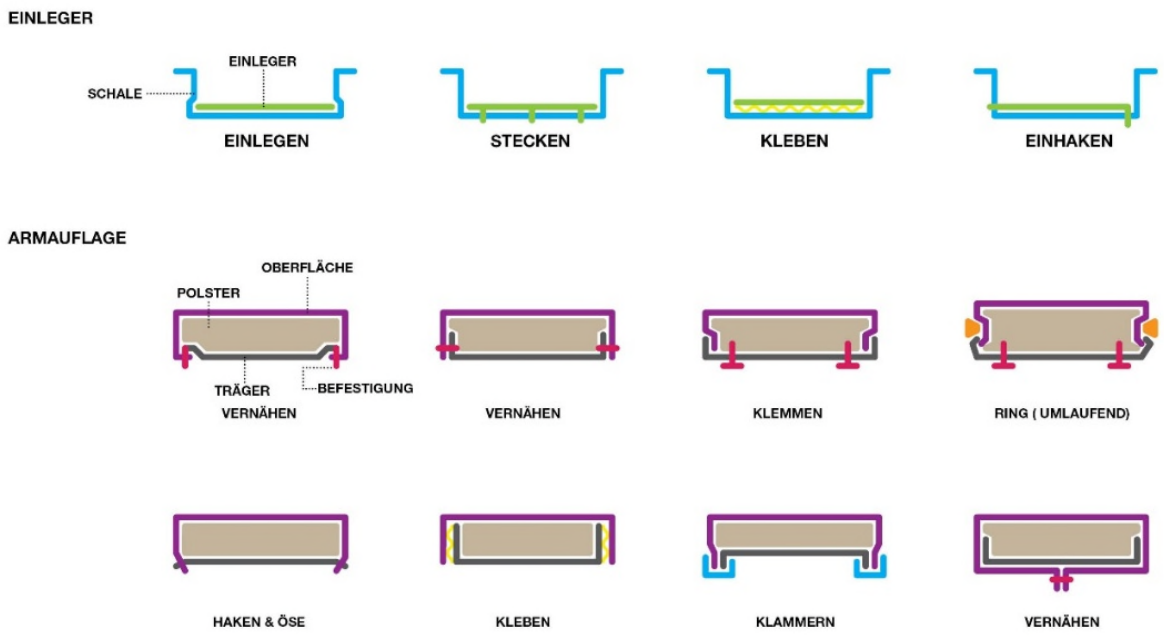


Abbildung 59: Detailskizzen. Übertragung der gesammelten Fügeverfahren angewendet auf Einleger und Armauflage. (eigene Darstellung)

Die Mittelkonsole sitzt insgesamt auf einem länglichen Grundträger, der vorne und hinten eine weitere Ablagemöglichkeit bietet und die Verbindung zum Fahrzeugboden darstellt.

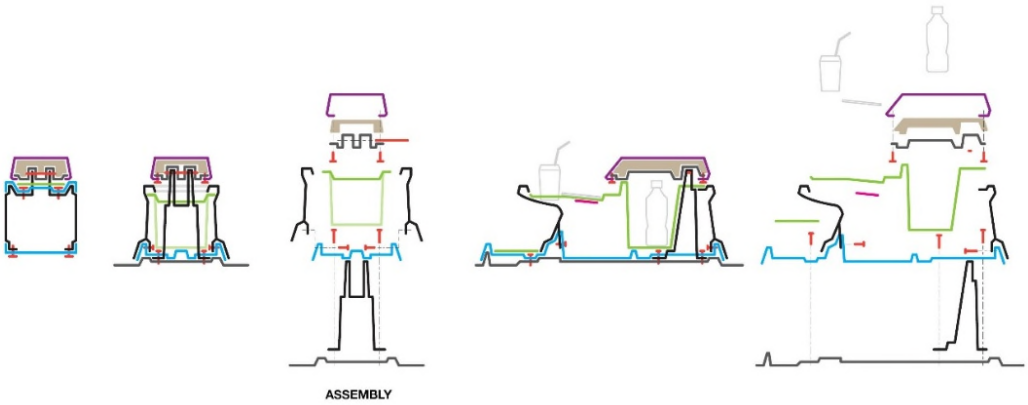


Abbildung 60: Schnittzeichnungen und Prinzipskizzen. Konzept zur Verbindung der Einzelteile, dargestellt durch Quer- und Längsschnitte. (eigene Darstellung)

Das materialgerechte Verwenden von nachhaltigen Rohstoffen sowie die Limitierung auf reversible Fügeprinzipien führt zunächst zu radikalen Entwürfen, die nicht alle Anforderungen an die industrielle Fertigung erfüllen können. Es können jedoch einige durch diese Methode entstandenen Ideen in die finale Version des Demonstrators übernommen werden.

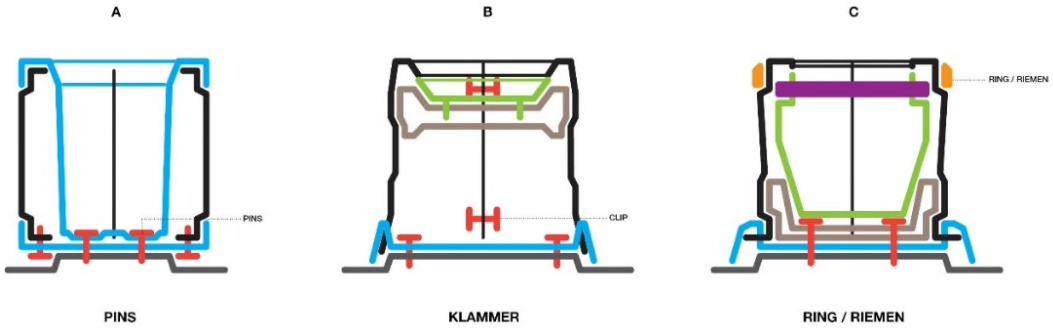


Abbildung 61: Schnittzeichnung. Prinzipien angewendet auf Mittelkonsole. (eigene Darstellung)

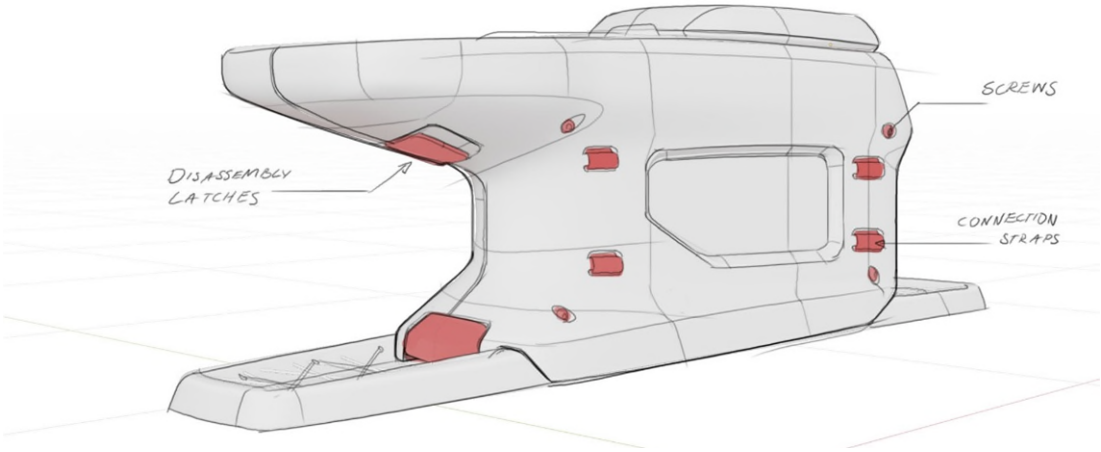


Abbildung 62: Skizze aus dem späteren Designprozess. Offen zur Schau gestellte Verbindungselemente: Klammern, Bänder und Bolzen sollen sichtbar sein. (eigene Darstellung)

Im Ergebnis kommt die Mittelkonsole ohne das Verwenden von Klebstoffen aus. Alle Bauteile sind so miteinander verbunden, dass ein Austauschen oder endgültiges Zerlegen möglich ist. Symbolisch dargestellt wird diese Eigenschaft durch die Klammer an der unteren Vorderseite, welche die beiden Hälften der Hauptstruktur der Mittelkonsole zusammenhält.

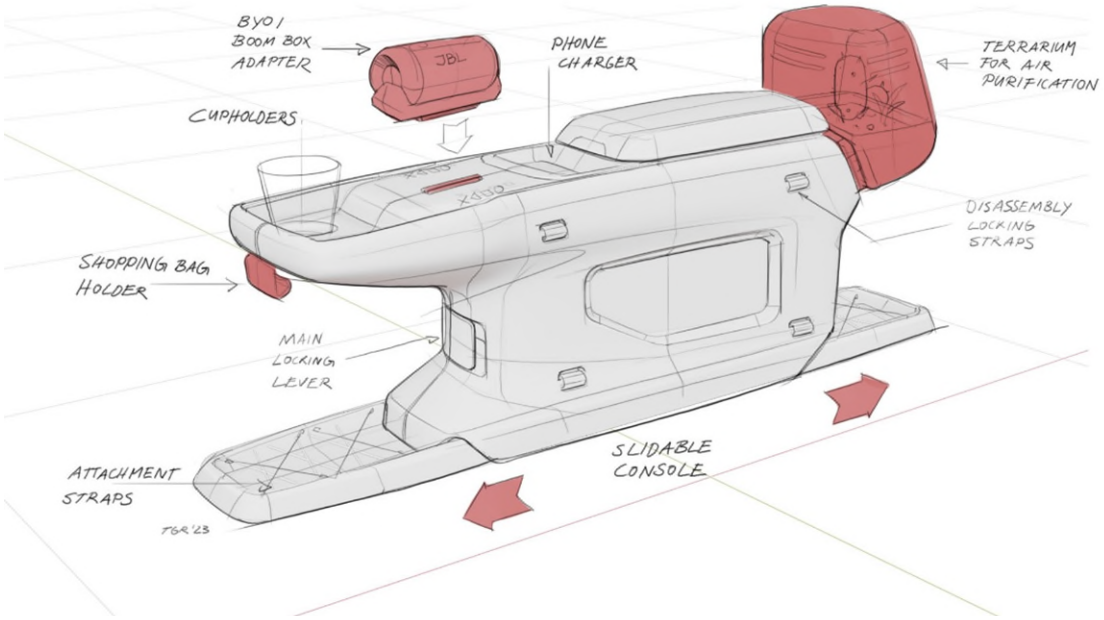


Abbildung 63: Skizze aus dem späteren Designprozess. Flexible Steckverbindungen ermöglichen das Anbringen zusätzlicher Features. (eigene Darstellung)

4 Entwicklung einer kreislauforientierten, smarten Mittelkonsole

Im folgenden Kapitel werden einzelne Elemente beschrieben, die bei der Entwicklung und Umsetzung einer kreislauforientierten Mittelkonsole beigetragen haben. Zunächst wird eine kreislauforientierte Design Methode vorgestellt, die auf Basis eines Wheel of Circularity mehrere Konzepte von Design Varianten ermöglicht. Im Weiteren werden auf Basis dieser Varianten die Ausführungen zur Realisierung einer kreislauforientierten Leichtbau-Mittelkonsole vorgestellt. Zusätzlich wird im Weiteren über das Simulation Data Management und den Einsatz von textilen Materialien bei der Umsetzung einer Mittelkonsole berichtet. Im Anschluss daran erfolgt eine ökobilanzielle Bewertung der Mittelkonsole, bevor zum Ende des Kapitels noch über den industriellen Transfer der Erkenntnisse berichtet wird.

4.1 Kreislauforientierte Design Methode

Autor:in: Franziska Braun; Fabian Edel

Der Designprozess in der Produktentwicklung umfasst mehrere wesentliche Phasen, die darauf abzielen, ein funktionales und ansprechendes Produkt zu schaffen. In der Regel leitet ein Designbriefing den Gestaltungsprozess ein. Dieses beinhaltet das Ziel des Projekts bzw. die Funktionen, die das Produkt erfüllen muss, eine Zielgruppendefinition, grundsätzliche Designanforderungen (bsp. Markenspezifische Stilistik, relevante Trends, etc.), Budget und Zeitplan und sonstige Anforderungen beispielsweise hinsichtlich Usability oder zu integrierende Technologien.

Eine Recherche und Analyse des Ist-Zustands bilden das Verständnis für die zu adressierende Problematik bzw. der Marktlücke. Im nächsten Schritt folgt eine Anforderungsdefinition, ähnlich dem Briefing, welches die Anforderungen von Seiten der Zielgruppe, der Funktionalität, Materialität und von technischer Seite aus analysiert und zusammenfasst. Diese Informationen dienen als Rahmen für die Konzeptphase, in der erste Ideen skizziert werden. In der anschließenden Entwurfsphase werden einzelne Ideen vertieft und digital oder physisch in Form von Prototypen umgesetzt. In Test- und Evaluationsschleifen wird Nutzerfeedback eingeholt und das Produktkonzept auf seine Machbarkeit geprüft. Das Design ist in der Produktentwicklung von zentraler Bedeutung und bildet die Grundlage für die erfolgreiche Umsetzung von Ideen in marktfähige und erfolgreiche Produkte. Es ermöglicht es, die Bedürfnisse und Wünsche der Nutzer zu verstehen und in funktionale und ästhetisch ansprechende Lösungen zu übersetzen. Durch strukturierte Phasen wie Forschung, Problem- und Bedarfsanalysen, kreative Ideenphase, Prototyping und Tests wird sichergestellt, dass das Endprodukt nicht nur ästhetisch ansprechend, sondern auch funktional und benutzerfreundlich ist. Zudem minimiert ein gut geplanter Designprozess Risiken und Kosten, indem potenzielle Probleme frühzeitig identifiziert und behoben werden. Insgesamt trägt ein effektiver Designprozess entscheidend zur Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft eines Unternehmens bei.

Status Quo

Betrachtet man Designprozesse für kreislauffähige Produkte, liegt der Fokus entweder auf dem reinen Recycling von Produkten oder der abstrakten Darstellung eines kreislauffähigen Ökosystems. Ein Vorgehen, welches Entwickler:innen und/oder Designer:innen Schritt für Schritt methodisch anleitet, ein nachhaltiges Produkt zu gestalten, wurde bisher vernachlässigt.

„Design for Disassembly“ [1] und „Design for Recycling (DfR) / VDI-Richtlinie 2243“ [2]

„Design for Recycling“ (recyclinggerechtes Design) fokussiert sich auf den Materialkreislauf und wird oft mit „Design for Disassembly“ kombiniert. Der Begriff wurde Ende der 70er von Prof. Dr. Walter Jorden eingeführt und Anfang der 90er durch die VDI-Richtlinie 2243 dokumentiert. Diese bietet qualitative und quantitative Methoden, um Recyclingkriterien früh in der Produktentwicklung zu berücksichtigen, etwa durch Checklisten und Analysewerkzeuge. Kritisiert wird, dass die Richtlinie nur das Recycling betrachtet, keine ganzheitliche Kreislaufstrategie bietet, seit 2002 nicht aktualisiert wurde und neue Technologien sowie interdisziplinäre Zusammenarbeit nicht berücksichtigt. Zudem erfordert sie tiefes Fachwissen, was den Einsatz erschwert.

Butterfly Diagramm „Visualizing the Circular Economy” Ellen MacArthur Foundation [3]

Das Circular Economy Model der Ellen MacArthur Foundation zielt auf eine effizientere Ressourcennutzung durch Recycling, Wiederverwendung und Langlebigkeit statt der „Take-Make-Waste“-Wirtschaft. Es unterscheidet zwischen biologischen und technischen Kreisläufen und zeigt, wie Materialien zirkulieren können. Als ganzheitliches System erleichtert es das Verständnis von Zirkulationswegen und betont Designstrategien zur Abfallvermeidung, Nutzungserhaltung und Regeneration natürlicher Systeme. Es ist skalierbar und für Unternehmen jeder Größe geeignet. Allerdings fehlen konkrete Leitlinien oder ein methodisches Vorgehen, was die praktische Umsetzung erschwert.

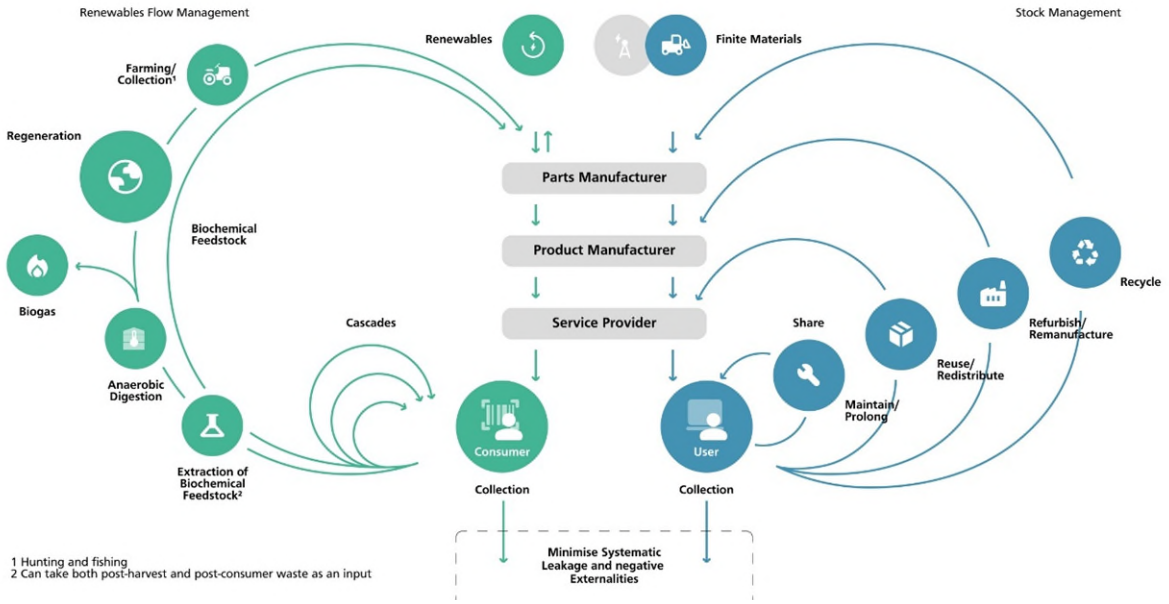


Abbildung 64: Butterfly Diagramm in Anlehnung an Ellen MacArthur Foundation (Eigene Darstellung) [3]

4.1.1 Methodischer Ansatz

Um den Designprozess für die Entwicklung kreislauforientierter Produkte anzupassen, wird eine Beispielkomponente in Form einer Fahrzeugmittelkonsole gewählt. An dieser Beispiel-

komponente wird ein neuer Ansatz für den Designprozess entwickelt. Durch die praxisnahe Umsetzung werden zudem übergeordnete Gestaltungsprinzipien definiert und evaluiert. Ziel ist es eine technische und designgetriebene Gestaltung der smarten Mittelkonsole und eine Ermittlung von Marktszenarien und Nutzungspotenzialen.

Um ein methodisches Vorgehen für die kreislauforientierte Gestaltung zu entwickeln, erfolgt zunächst eine Reflexion bestehender Designprozesse. Dabei lassen sich die einzelnen Prozessschritte nach Zweck, Informationsfluss, methodischem Vorgehen und Ziel clustern. Die Nachhaltigkeitsziele und die Bedingungen, diese zu realisieren, werden im Prozess verortet. Um die Beziehung zwischen den einzelnen Clustern reflektieren zu können, werden die einzelnen Perspektiven der beteiligten Stakeholder in einem dreidimensionalen Modell dargestellt (siehe Abbildung 65). Hierzu zählt beispielsweise die Kundenperspektive, welche demografische und psychografische Merkmale mit sich bringt, die bei der Gestaltung berücksichtigt werden müssen. Ebenso ist die Unternehmensperspektive relevant, welche beispielsweise ökonomische, ökologische und soziale Ziele verfolgt, die ebenfalls beachtet werden müssen.

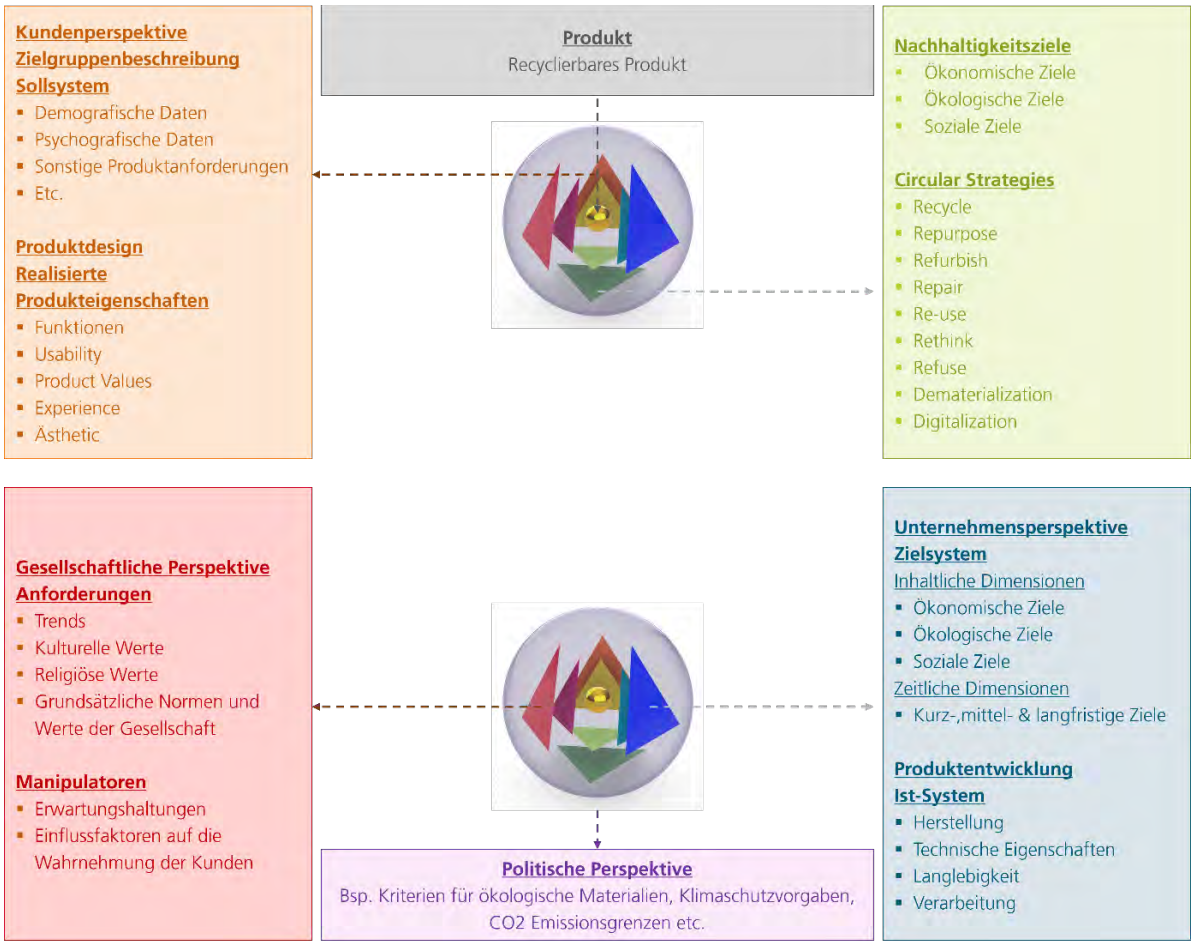


Abbildung 65: 3-dimensionales Cluster der einzelnen Perspektiven und deren Ziele und Anforderungen (eigene Darstellung)

Durch die Kombination mit den Nachhaltigkeitszeilen und Circular Strategies wird aus dem Cluster Set Up (siehe Abbildung 65) im Austausch mit einem interdisziplinären Team eine Entscheidungshierarchie definiert und als Kreisdiagramm (siehe Abbildung 66) visualisiert.

4.1.2 Wheel of Circularity

Das „Wheel of Circularity” startet auf der übergeordneten Zielebene, wo grundsätzliche Parameter wie Kosten, Zielgruppe, Fahrzeugsegment etc. festgelegt werden. Im nächsten Schritt werden die Nachhaltigkeitsziele definiert. Diese können sich allgemein auf den Emissionsverbrauch beziehen oder auf spezifische Werte wie den Wasserbrauch in der Herstellung oder Ähnliches. Die Ziele werden in einer Hierarchie priorisiert. Im Anschluss wird auf der Funktionsebene beschrieben, welche Eigenschaften das Produkt abbilden muss, um die Ziele zu erfüllen. Dies bildet die Spezifikationsebene. Im nächsten Schritt werden Geschäftsmodell und passende R-Maßnahmen/C-Strategien parallel gedacht. Hierbei wird das Anforderungsprofil der Nutzer berücksichtigt, welches sich im Zentrum des Wheels befindet. Das Nutzerprofil besteht aus funktionalen, emotionalen, persönlichen und gesellschaftsrelevanten Werten, die erfüllt werden sollen. Darauf basierend wird das Produktdesign definiert, bestehend aus Bauteilebene, Interface und Software. Die Designkonzeptebene schließt wieder an der Zielebene an und gewährleistet so die anschließende Reflexion der Ziele.

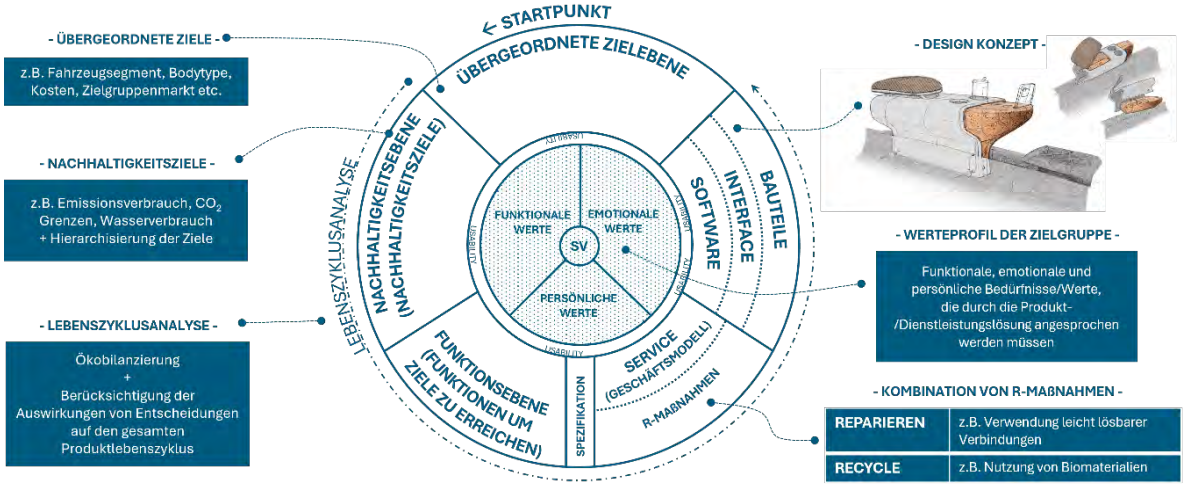


Abbildung 66: „Wheel of Circularity“ (eigene Darstellung)

Das „Wheel of Circularity” (siehe Abbildung 66) stellt eine Gliederung der Prozessschritte dar. Um dieses praktisch anwenden zu können, wird es in ein Flussdiagramm mit Handlungsanweisungen überführt (siehe Abbildung 67). Im ersten Schritt wird der bzw. die Trigger definiert, welche das Unternehmen beziehungsweise die Entscheidung, ein kreislauforientiertes Produkt zu entwickeln, motiviert hat. Dies können beispielsweise neue Regulatorien hinsichtlich des Wasserverbrauches oder CO_2 Emissionen sein, oder eine neue Technologie, die eine Optimierung des bestehenden Produkts bzw. Produktportfolios ermöglicht.

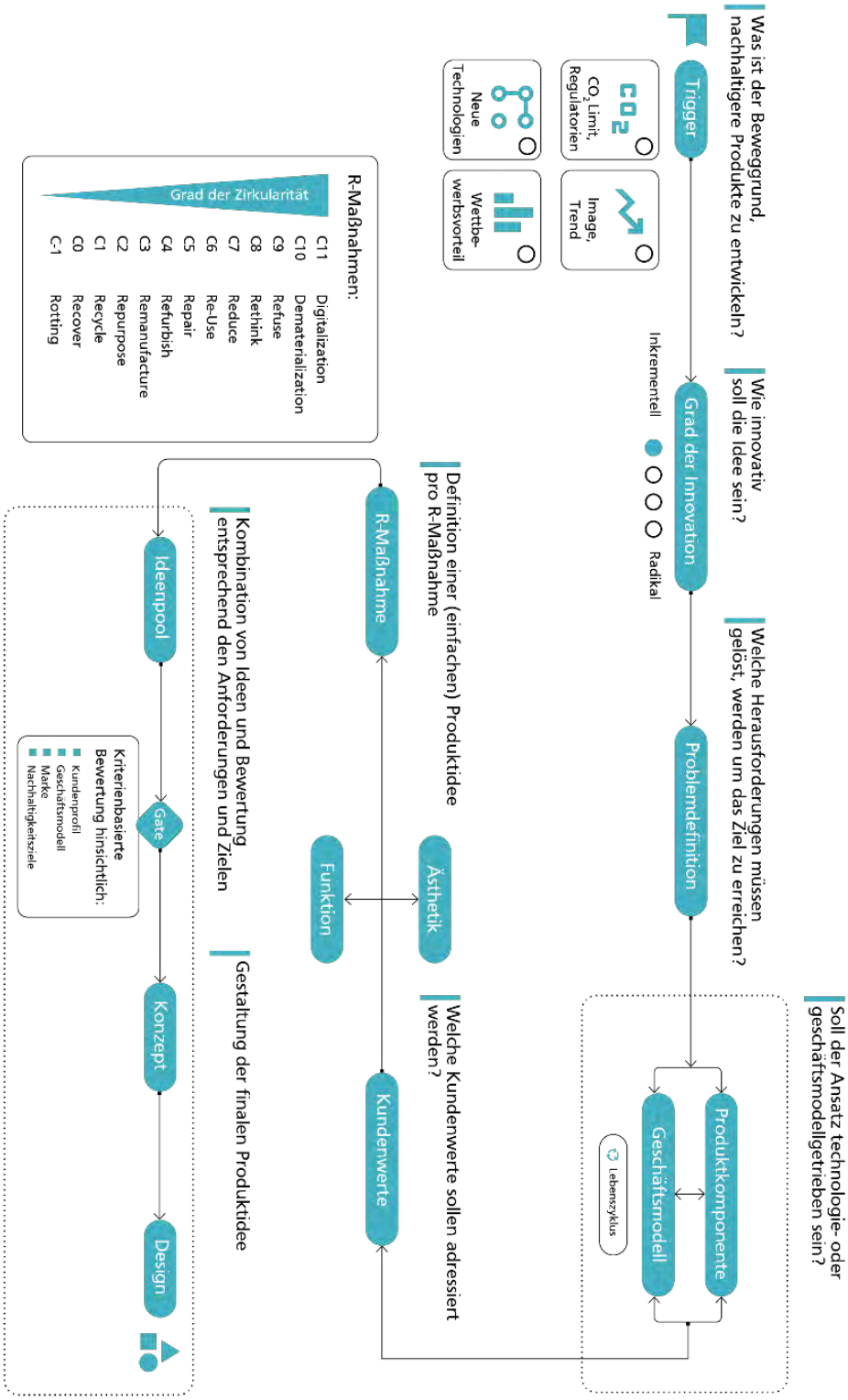


Abbildung 67: Methodisches Vorgehen (eigene Darstellung)

Im nächsten Schritt definiert das Entwicklungsteam den Innovationsgrad des Produkts. Hierbei kann zwischen einem inkrementellen oder einem zunehmend bis gänzlich radikalen Ansatz gewählt werden. Davon abhängig reflektieren die Teams die Herausforderungen und Barrieren aus ihrer aktuellen Position heraus, um in dem Grad innovativ zu arbeiten. Beispielsweise möchte man sehr inkrementell bleiben, aber dennoch die neue CO_2 Emissionsgrenze erreichen,

was wiederum bedeutet, dass das aktuelle Produkt oder der aktuelle Produktionsprozess nicht oder nur kaum verändert werden darf. Dadurch würden sich im späteren Verlauf eher R-Maßnahmen aus dem unteren oder oberen Bereich eignen, die sich auf die Rückführung und Materialität fokussieren oder auf die Reduktion und Digitalisierung von bestehenden Komponenten. Im nächsten Schritt wird zwischen einem technologie- oder geschäftsmodell-getriebenen Ansatz entschieden, welcher festlegt, ob vom Geschäftsmodell oder einer spezifischen Produktkomponente aus gestartet wird. Ein Geschäftsmodellgetriebener Prozess ist dabei meist radikaler da es voraussetzt, dass das Produkt gänzlich neu gedacht werden darf. Darauffolgend beschäftigen sich die Teams mit dem adressierten Kundenwert und Kundennutzen, den das Geschäftsmodell oder das Produkt liefern soll. Dem folgen die Funktionalität und Anmutung des Produkts beziehungsweise bei einem Geschäftsmodell-getriebenen Ansatz eine Attraktivität und Kundennutzenbeschreibung. Die Informationen dienen als Rahmen für die Anwendung der R-Maßnahmen. Diese sind hilfreiche Prinzipien, wie die Lebenszeit eines Produkts, einer Produktkomponente oder eines Materials verlängert werden kann, um CO_2 Emissionen einzusparen. Das Entwicklungsteam kann an dieser Stelle kreativ durchspielen, wie sich welche R-Maßnahme auf ihr Produkt oder Geschäftsmodell auswirkt, und kreativ Ideen entwickeln. Für gezielte Sprints oder spielerische Challenges kann zudem der Cyclo Cube (siehe Abbildung 68) in Workshops verwendet werden.

Abbildung 68: Cyclo Cube (eigene Darstellung)

Mit dem Ideenpool startet das Team in die kriterienbasierte Bewertung. Dabei wird für jede Idee reflektiert, wie gut diese zum zuvor definierten Kundenprofil, Geschäftsmodell, zum Unternehmen und zu den angestrebten Nachhaltigkeitszielen passt. Die Idee, die den Anforderungskatalog am besten erfüllt, wird im darauffolgenden Schritt als Konzept ausgestaltet und bildet damit den Abschluss des methodischen Prozesses.

Literatur

1. McDonough W, Braungart M (2002) Cradle to cradle: remaking the way we make things, vol 40
2. (2002) Recyclingorientierte Produktentwicklung // Richtlinie VDI 2243: Recyclingorientierte Produktentwicklung, vol 57
3. Ellen Macarthur Foundation (2021) Butterfly Diagramm: Visualising the circular economy. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram

4.2 Konzeption und Design einer kreislauforientierten Mittelkonsole

Autor:in: Franziska Braun; Fabian Edel

Die Konzeption einer Mittelkonsole diente zum einen als Anwendungsbeispiel für die Entwicklung der Designmethodik (siehe Abbildung 69) aus Kapitel 4.1. Zum anderen visualisiert sie hilfreiche Gestaltungsprinzipien, um Produkte kreislauforientiert zu gestalten.

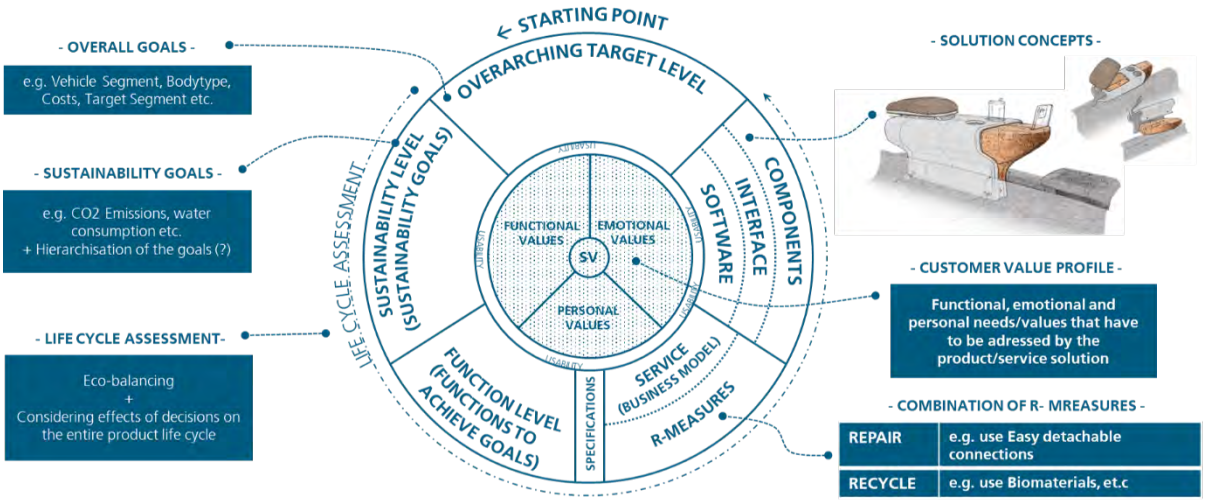


Abbildung 69: „Wheel of Circularity"- Übergeordnete Struktur des Entwicklungsprozesses kreislauffähiger Produkte (eigene Darstellung)

Zu Beginn des kreislauforientierten Designprozess wird eine Trendrecherche in den folgenden Bereichen durchgeführt:

- Materialität: nachhaltigen Materialien
- Konstruktion: Verbindungstechniken
- Formalität: Form- und Materialästhetik
- Bauteil: Fahrzeug-Mittelkonsolen

Die durchgeführten Trendrecherchen liefern erste Erkenntnisse zum aktuellen Entwicklungsstand von Mittelkonsolen im Produktdesign. Darüber hinaus ermöglichen sie eine fundierte Übersicht über nachhaltige Materialien, die sowohl im Automobilbereich als auch in anderen Branchen Anwendung finden können. Neben funktionalen Eigenschaften werden dabei auch ästhetische Qualitäten und gestalterische Potenziale innovativer Werkstoffe systematisch erfasst und bewertet.

Neben der Materialität spielen die Verbindungstechniken des Produkts eine entscheidende Rolle. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass Bauteile einfach zerlegbar sind und nicht beispielsweise verklebt oder verschweißt. Dadurch ist es einfacher Produkte während der

Nutzungszeit zu reparieren oder upzudaten. Zudem können dadurch am Produktlebensende Bauteile einfacher zerlegt, Materialien getrennt und wiederaufbereitet oder recycelt werden. Mögliche Verbindungslösungen aus dem Bereich der mechanischen Fügeverfahren sind beispielsweise Schraub-, Steck- und Klemmverbindungen. In Kapitel 3.7 wird das Thema „Verbindungstechniken“ näher ausgeführt.

Basierend auf dem Recherchewissen wurden ergänzend einige grundlegende Daten festgelegt, um erste Design Varianten generieren zu können. Hierzu zählen zum einen eine fiktive Zielgruppe, ein Zielfahrzeugtyp und eine Zielfahrzeugklasse, welche Teile des Designbriefings und der Zielebene sind. Der Zielfahrzeugtyp wurde auf ein Sport-utility-vehicle (SUV) bzw. Limousine festgelegt. Die Zielgruppe wurde, wie in Abbildung 70 abgebildet, definiert. Hierbei wurde auf eine Studie des Fraunhofer IAO zurückgegriffen, um ein realitätsnahes Zielgruppensegment abzubilden [1].

Feature	Frequency
Automated Functionalities	40,0%
Driver Assistance Systems	50,9%
Reduces Costs	34,5%
Quality	47,3%
Variety	7,3%
Sensory Appeal	9,1%
Infotainment	16,4%
Safes Time	20,0%
Good Usability	25,5%
Makes Money	3,6%
Reduces Risk	23,6%
Organisational Possibilities	9,1%
Connectivity (Outside)	1,8%
Connectivity (Inside)	10,9%
Wellness	10,9%
Therapeutic Value	25,5%
Fun and Entertainment	23,6%
Attractiveness	23,6%
Trends	36,4%
Reduces Stress	52,7%
Rewards the Driver	14,5%
Nostalgia	1,8%
Personalisation	10,9%
Lifestyle	0,0%
Motivation	30,9%
Heirloom	10,9%
Affiliation and Belonging	32,7%
Rewards oneself	23,6%
Self Actualization	1,8%
Self Transcendence	52,7%

Abbildung 70: Zielgruppendefinition (eigene Darstellung und KI generiert mit ChatGPT)

Diese Informationen dienten als Anforderungskatalog, um erste typologische Konzepte zu entwickeln. Darunter unterschiedliche Arten und Varianten der Mittelkonsole für Front- und Fondpassagiere. Abbildung 71 zeigt die unterschiedlichen Varianten. Dabei ist A ein Insel-freistehendes Konzept, B ein Tief-Extrudiertes Konzept, C ein hoch-ansteigendes Konzept und D ein am Sitz befestigtes Konzept.

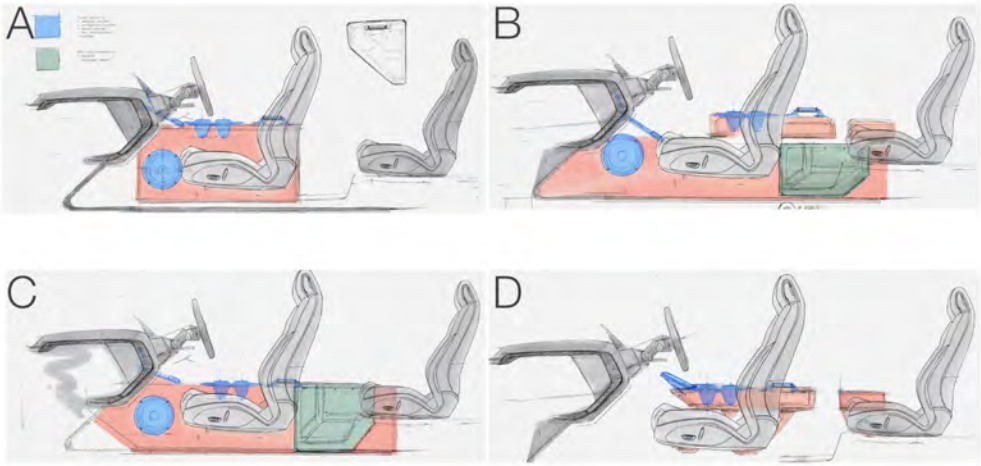


Abbildung 71: Übersicht der typologischen Konzepte (eigene Darstellung)

Anschließend wurden mit Hilfe eines morphologischen Kastens Design-Konzepte entwickelt. Dabei spielten die typologischen Formvarianten, die Design-Sprache, Konstruktions-/ Verbindungs- / Fügekonzepte, Materialien samt Klassifizierung und Kreislaufstrategien eine wesentliche Rolle (Abbildung 72). Bei den Kreislaufstrategien wurde auf die Kreislaufmaßnahmen (siehe Kapitel 3.2) zurückgegriffen.

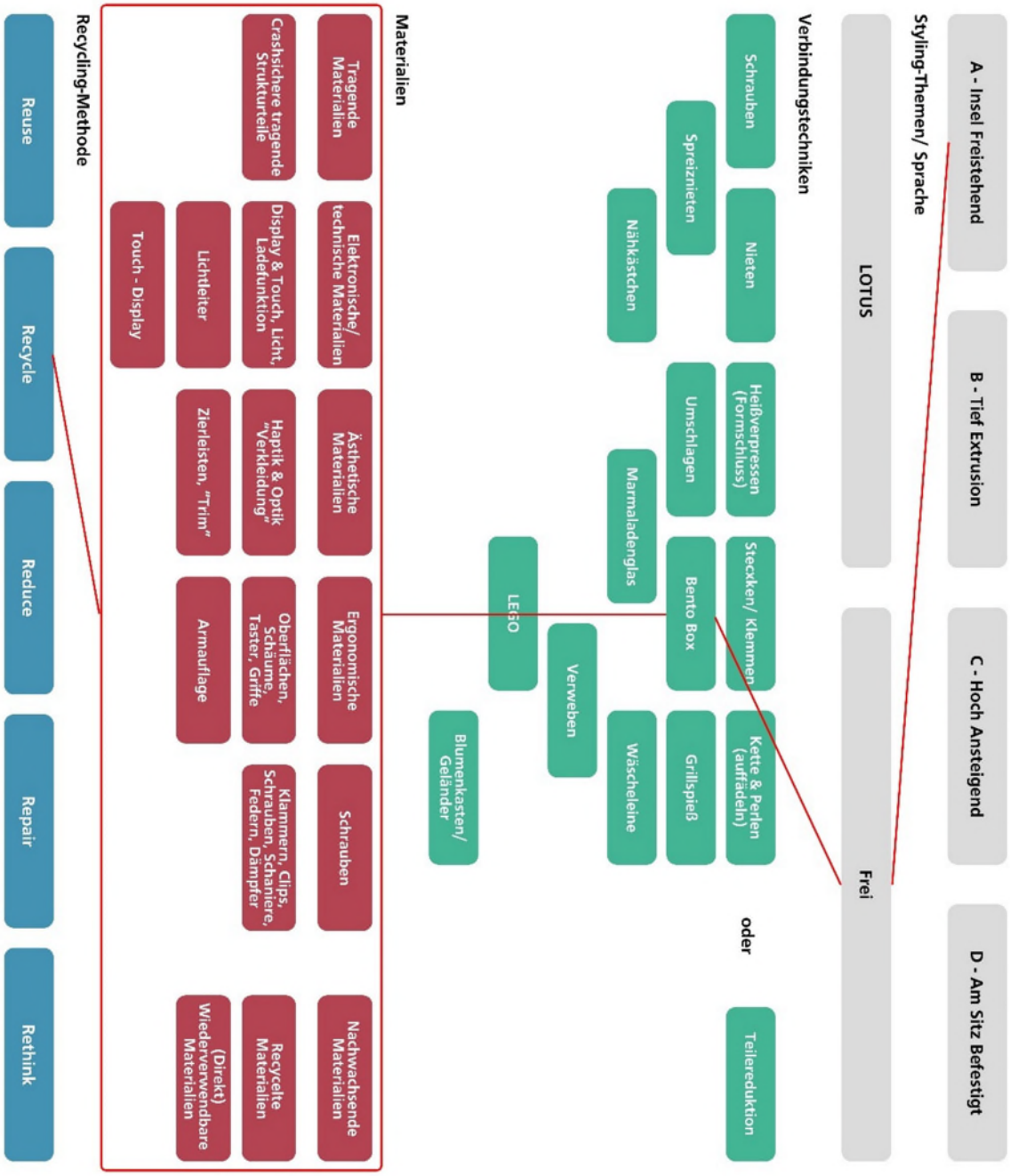


Abbildung 72: Morphologischer Kasten (eigene Darstellung)

Anhand der Ergebnisse des morphologischen Kastens wurden Konzeptstudien entwickelt. Diese unterschieden sich zwischen einer freistehenden Insel (Abbildung 73), einem durchgehenden Tunnel (Abbildung 74) und Konzeptstudien zum Material (Abbildung 75). Für jedes Konzept wurden verschiedene Verbindungstechniken (Abbildung 76) reflektiert sowie die Produkt-Kunden-Passung (Product-Customer-Fit).

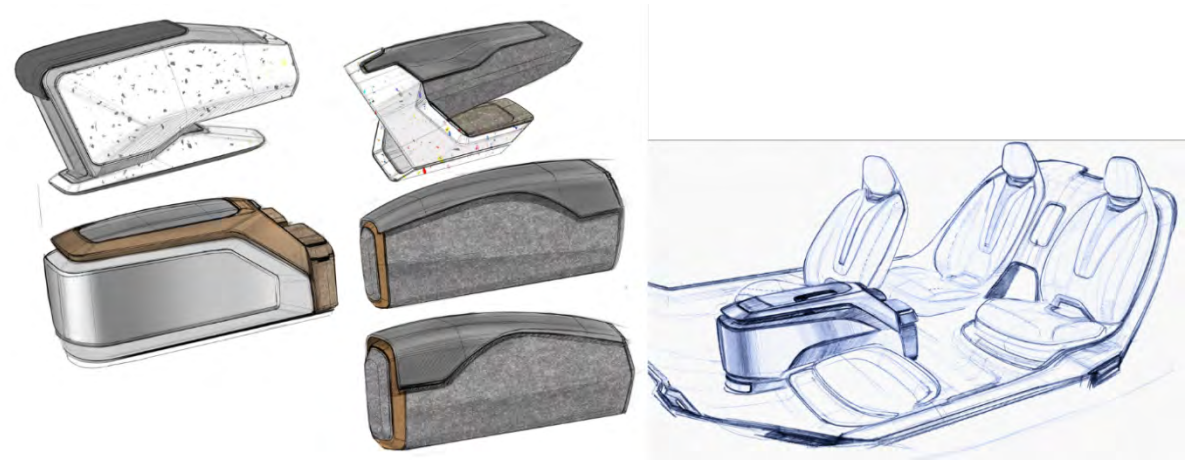


Abbildung 73: Konzeptstudie „freistehende Insel“ (eigene Darstellung)

Abbildung 74: Konzeptstudie „durchgehender Tunnel“ (eigene Darstellung)

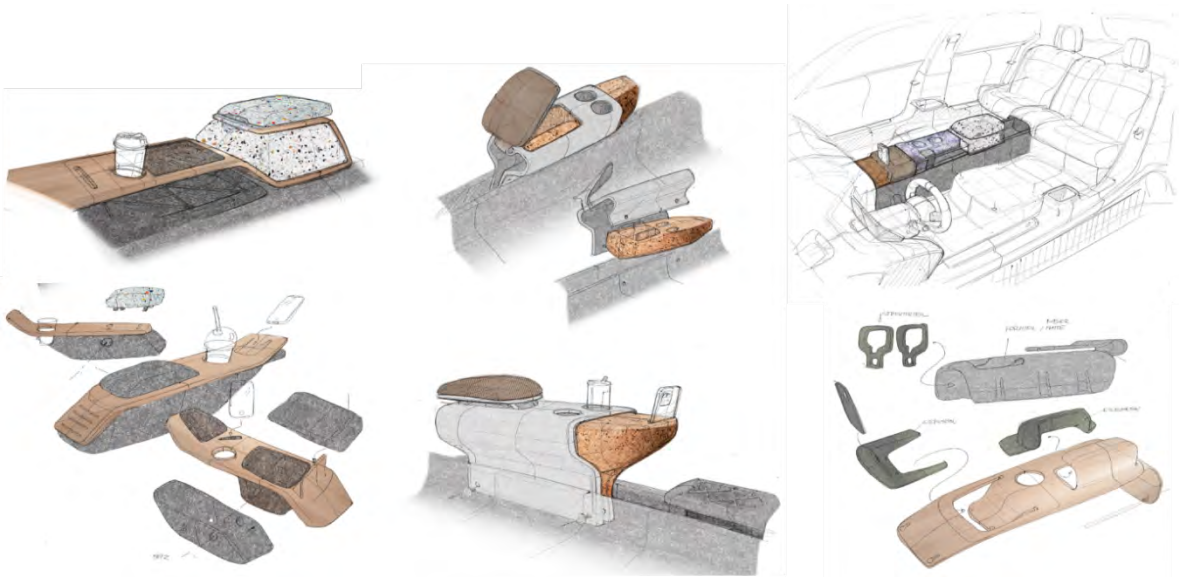


Abbildung 75: Konzeptstudie „Material“ (eigene Darstellung)

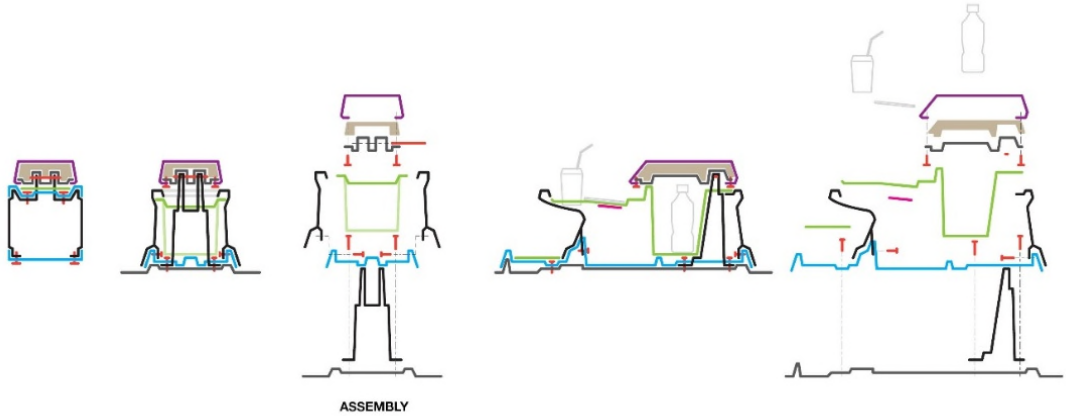


Abbildung 76: Schematisch dargestellte Verbindungslösung der Mittelkonsole (eigene Darstellung)

Mittels der ersten Konzeptstudien wurde ein Workshop durchgeführt, in dem die Effekte einzelner Designentscheidungen in Hinblick auf Nachhaltigkeit, Funktionalität, Ergonomie, Ästhetik, Experience und Preis reflektiert und bewertet wurden. Anhand der Erkenntnisse wurden erste Designvarianten der Mittelkonsole erstellt und der Funktionsumfang sowie mögliche Materialien definiert (Abbildung 77).

Abbildung 77: Designvarianten der Konzeptphase (eigene Darstellung)

Im Anschluss folgte eine Bewertung im Hinblick auf die verwendeten Kreislaufstrategien und welche Anforderungen und welchen Mehrwert sie mit sich bringen. Dadurch konnte ein Grundentwurf der Mittelkonsole erstellt werden. An diesem Punkt wurde die Entwicklung zweigleisig fortgeführt. Einerseits wurden digitale Modelle erstellt, um den Designprozess fortzuführen, andererseits wurde ein physisches Anschauungsmodell entwickelt. Abbildung 78 zeigt die Aufteilung grafisch.

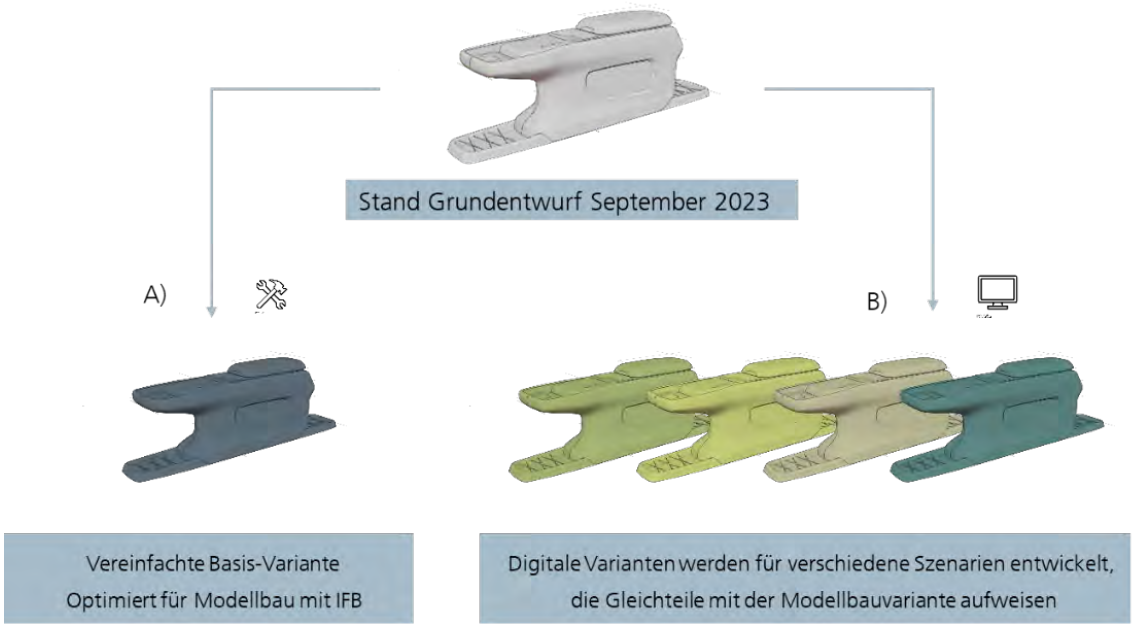


Abbildung 78: Aufteilung der Entwicklung in digitale und physische Modelle (eigene Darstellung)

Im Folgendem werden die digitalen Varianten vertieft. (Mehr zum physischen Modell ist in den Kapiteln 4.3 bis 4.5 zu finden.) Für die digitalen Modelle wurden 4 Konzepte erarbeitet. Darunter das Konzept „Bring your own device“ (Abbildung 79). Die Zielgruppe sind junge, urbane Familien mit einer hohen Technologieaffinität. Das Konzept zielt darauf ab, das Mitbringen und Integrieren verschiedener Devices zu ermöglichen. Bei dem ästhetischen Design wurden Trends aus den Bereichen Fashion und Sportswear berücksichtigt.

Abbildung 79: Konzept 01: Bring your own device (eigene Darstellung)

Ein weiteres Konzept ist „Zen und Spa“ (Abbildung 80). Der Fokus liegt auf der Integration innovativer, natürlicher und nachhaltiger Materialien im Fahrzeug-Interieur. Ziel ist es, einen Rückzugsort zum Entspannen und Wohlfühlen zu schaffen. Ein schlichtes, ruhiges Design und hochwertige Materialien definieren den „New Luxury“ im Fahrzeug.

Abbildung 80: Konzept 02: Zen und Spa (eigene Darstellung)

Das dritte Konzept ist „Luxury“ (Abbildung 81) und konzentriert sich auf das Premium-segment. Die Materialien sind sowohl hochwertig als auch nachhaltig. Das Konzept ist deutlich komplexer gestaltet als die anderen Varianten.

Abbildung 81: Konzept 03: Luxury (eigene Darstellung)

Ein weiteres Konzept ist „Rental“ (Abbildung 82). Das vierte Konzept konzentriert sich auf Miet- und Sharing-Fahrzeuge mit hoher Abnutzung. Die gewählten Materialien sind kostengünstig, widerstandsfähig und einfach zu reinigen. Die Anzahl an Bauteilen ist niedrig gehalten und die Bauweise einfach und belastbar.

Abbildung 82: Konzept 04: Rental (eigene Darstellung)

Um die Kreislauffähigkeit der Konzepte darstellen zu können, wurden für diese jeweils die Bauteile, mögliche Undesired States und der Lebenszyklus definiert. In Abbildung 83 ist ein Auszug einer solchen Tabelle dargestellt.

Eine Armlehne aus Ureol mit einem Bezug aus recyceltem Leder hat nach zirka 2 Jahren erste Spuren von Abrieb, welche bei Bedarf mit Lederkleber ausgebessert werden können, was der R-Maßnahme „Repair“ entspricht. Die Armlehne kann zudem wiederverwendet werden (Reuse), beispielsweise in einem geringwertigeren Fahrzeugtyp wie einem Sharingfahrzeug.

Bauteilübersicht_Volumen//Material//Gewicht_für Life Cycle Assessment						
Material (Demonstrator | Massenproduktion)	**Nr**	**Bauteil**	**R- Maßnahme**	**Undesired states**	**Time when undesired state occurs**	**Lifecycle**
Faserverbund (3mm)	1	Rahmen	Repair	Kratzer; werden ausgebessert (in Handarbeit mit Kunststoffpflege)	> 10 Jahre	wird 1:1 wiederverwendet in einem minderwertigeren Fahrzeug (bsp. Baugleiches Sharingfahrzeug), Verlängerung Lebenszyklus um 100%
Trägermaterial: Frästeil aus Ureol (in Serie Schaum), Textil: Wollfilz oder Flachs	2	Einsatz mit smartem Textil	Reuse; (Elektronik abziehen, Elektronik ist nicht verklebt, kann daher abgezogen werden, Bezugstoff ist bestickt die Elektronik liegt dadrunter Stoff kann ausgetauscht werden)	Smartes Garn wird beschädigt, Elektronik kann in einer neuen Mittelkonsole wieder verwendet werden oder	> 2 Jahre	wird 1:1 wiederverwendet in selbem Fahrzeug, gegebenenfalls ist das smarte Textilelement defekt, Verlängerung Lebenszyklus um 100%
Trägermaterial: Frästeil aus Ureol (in Serie Schaum), Textil: Wollfilz oder Flachs	2	Einsatz mit smartem Textil	Refuse (Elektronik wird ersatzlos entnommen)	Smartes Garn wird beschädigt, Elektronik kann in einer neuen Mittelkonsole wieder verwendet werden oder	> 5 Jahre	minderwertigeren Fahrzeug (bsp. Baugleiches Sharingfahrzeug), in dem diese Funktion nichtmehr angeboten wird, d.h. Lifecycle Ende
Trägermaterial: Frästeil aus Ureol (in Serie Schaum), recyceltes Leder mit Naturkautschuk	3	Armlehne	Repair, Recycle (wird geschreddert und wird nochmal neu verklebt mit Naturkautschuk)	Abrieb der Oberfläche; Ausbesserung mit Lederkleber	> 2 Jahre	minderwertigeren Fahrzeug (bsp. Baugleiches Sharingfahrzeug), Material wird so gut es geht aufbereitet, geht jedoch nach einer kürzeren Lebenszeit kaputt, Die Reperatur erfolgt durch ausbessern von Abnutzungspuren wie Löchern im Textil mithilfe von Textilkleber, das Material wird danach Recycelt, Verlängerung Lebenszyklus um 80%

Abbildung 83: Auszug aus der Übersicht zu Undesired States einer Mittelkonsole (eigene Darstellung)

Für das finale Konzept wurde ein Life Cycle Assessment (LCA) durchgeführt, um die Effekte der einzelnen R-Maßnahmen und der jeweiligen Materialwahl ökobilanziell abschätzen zu können. In Kapitel 3.3 wird das Konzept der LCA-Bewertung tiefergehend erläutert und in Kapitel 4.6 auf die Mittelkonsole angewandt.

Literatur

1. Stegmüller S, Ardilio A, Braun F (2023) Value oriented design of vehicles along emotional personality structures and character traits of customers. In: Creativity, Innovation and Entrepreneurship. AHFE International

4.3 Kreislauforientierte Leichtbaukonstruktion

Autoren: Johannes Baur; Jakob Gugliuzza; Stefan Carosella

Die Entwicklung innovativer Leichtbaukonzepte im Automobilsektor ist maßgeblich getrieben durch den Bedarf an Ressourceneffizienz, Emissionsreduktion und Nachhaltigkeit. Neben der Gewichtsersparnis rücken zunehmend auch Aspekte der Kreislaufwirtschaft in den Fokus, wie Reparierbarkeit, Wiederverwendung und Recyclingfähigkeit. Klassische Innenraumkomponenten, wie beispielsweise die Mittelkonsole, sind häufig als komplexe Baugruppen mit zahlreichen Einzelteilen ausgeführt, deren Demontage und stoffliche Verwertung nur eingeschränkt möglich ist. Durch die Integration von Leichtbauprinzipien in Kombination mit faserverbundbasierten Fertigungstechnologien entsteht die Möglichkeit, Funktionalität, Gewichtsreduktion und Nachhaltigkeit miteinander zu vereinen und damit einen Beitrag zur Transformation des Fahrzeuginterieurs in Richtung Kreislauffähigkeit zu leisten.

Die Umsetzung solcher Konzepte ist jedoch mit mehreren Herausforderungen verbunden. Konventionelle Konstruktions- und Fertigungsansätze berücksichtigen die Anforderungen der Demontierbarkeit und Wiederverwertung nur unzureichend, insbesondere im Umgang mit Faserverbundwerkstoffen. Darüber hinaus besteht die Notwendigkeit, eine konstruktive Lösung zu entwickeln, die einerseits eine tragfähige, funktionsintegrierte und gleichzeitig leichte Bauweise ermöglicht, andererseits aber auch durch lösbare Verbindungstechniken die R-Strategien unterstützt. Ergänzend erfordert der Fertigungsprozess eine hohe Flexibilität, um unterschiedliche Materialsysteme – einschließlich bio-basierter und recycelbarer Varianten – verarbeiten zu können. Damit ergibt sich die zentrale Fragestellung, wie sich ein Baugruppen- und Fertigungskonzept gestalten lässt, das Leichtbau, Funktionsintegration und Kreislauffähigkeit gleichermaßen gewährleistet.

Basierend auf dem in Kapitel 4.2 vorgestellten Entwurf wird eine nachhaltige Leichtbaukonstruktion entwickelt. Diese besteht aus einer dreiteiligen Baugruppe für eine Mittelkonsole im Fahrzeuginnenraum, die das Grundgerüst bildet, in das alle weiteren Komponenten angebaut werden. Durch regelmäßigen interdisziplinären Austausch während der Konzeptions- und Designphase können bereits zu frühen Zeitpunkten der Entwicklung Leichtbau- und fertigungstechnische Aspekte in die Komponentengestaltung einfließen. So setzt sich die tragende Struktur aus zwei Halbschalen zusammen, ergänzt durch eine Deckelkomponente, die die Schalen formschlüssig miteinander verbindet. Dieser Aufbau und die einzelnen Komponenten sind beispielhaft in Abbildung 84 dargestellt.

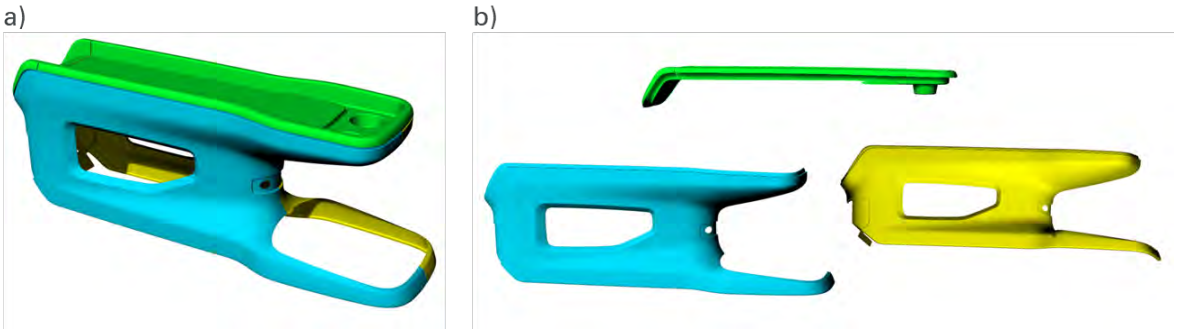


Abbildung 84: Dreiteilige Grundstruktur der Mittelkonsole in Leichtbauweise: a) Zusammenbau, b) Explosionsansicht (eigene Darstellung)

Die entwickelte Baugruppe soll dank lösbarer Verbindungstechnik demontierbar sein, wodurch insbesondere die R-Strategien *Repair*, *Reuse* und *Recycle* gefördert werden. Zudem sollen in dieser Abdeckung unterschiedliche Funktionen integriert werden.

Der Fertigungsprozess hierfür baut auf etablierten Verfahren und Methoden aus der Faserverbund-Fertigungstechnik auf. Er wird flexibel gestaltet, so dass möglichst leicht auf wechselnde Anforderungen, vornehmlich aus der Kreislaufwirtschaft, reagiert werden kann. So lassen sich unterschiedlichste Faser- und Matrix-Systeme mit diesem Konzept verarbeiten. Hier sind insbesondere recyclebare, bio-basierte und bio-abbaubare Systeme interessant. Diese ermöglichen eine Rückführung in bestehende technische oder ökologische Kreisläufe am Ende des Produktlebens. Auch die Langlebigkeit des Produkts kann ein entscheidender Nachhaltigkeits-Faktor sein. Um die mechanische Stabilität bei geringem Materialeinsatz und hoher Gewichtseinsparung zu gewährleisten, fließen die Ergebnisse aus FEM-Simulationen und Optimierungszyklen, vorgestellt in Kapitel 4.4 ein. Daraus ergibt sich der Lagenaufbau für die Faserverbund-Schale sowie eine lastgerechte Verstärkungsstruktur.

Die Herstellung dieser optimierten Strukturen wird durch den Einsatz automatisierter Preforming-Prozesse ermöglicht. Mit dem Dry Fiber Placement (DFP) können trockene, bebinderte Fasertapes automatisiert linear abgelegt werden. Das Tailored Fiber Placement (TFP) ist ein variabelaxialer Faserablage-Prozess bei dem eine modifizierte Stickanlage verwendet wird. Sowohl DFP als auch TFP erlauben die Fertigung lastpfadgerechter Strukturen mit sehr hohem Leichtbaucharakter. Sie begünstigen die Einsparung von Ressourcen, indem Fasern endkonturnah abgelegt werden. Hierdurch wird der Verschnitt gesenkt und auch der Materialeinsatz für die Struktur wird minimiert. Zeitgleich weisen beide Verfahren auch eine gute Skalierbarkeit auf. Abbildung 85 zeigt Anlagen, die zu diesem Zweck zum Einsatz kommen können.

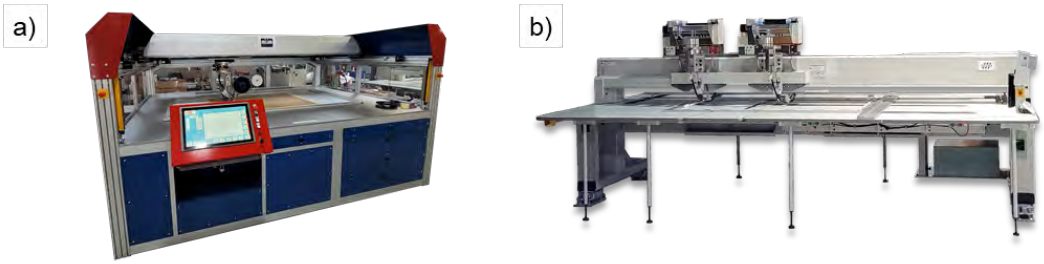


Abbildung 85: Anlagen für Faserlegeverfahren (eigene Darstellung): a) DFP; b) TFP

4.3.1 Prototypische Umsetzung - kreislauforientierte Leichtbaukonstruktion

Für die Umsetzung des vorgestellten Leichtbaukonzepts ist eine enge Verzahnung von Entwurf, Fertigung und Validierung erforderlich. Die experimentelle Erprobung einzelner Prozessschritte ermöglicht eine frühzeitige Absicherung der Produktionsprozesse und liefert entscheidende Erkenntnisse für die spätere Serienumsetzung. Ergänzend bilden CAD-Modelle von Werkzeugen und Hilfsmitteln die Grundlage für eine präzise und reproduzierbare Herstellung der Baugruppen. Der Aufbau einer geeigneten Fertigungsumgebung sowie die Herstellung von Halbzeugen und Bauteilen schaffen die praktischen Voraussetzungen für die Umsetzung des Konzepts. Durch die systematische Dokumentation der Fertigungsparameter können die erzielten Ergebnisse objektiv bewertet und Optimierungspotenziale gezielt identifiziert werden.

Die prototypische Herstellung der Mittelkonsole hilft also, die Abläufe im Fertigungsprozess sowie dabei entstehende Rohstoff- und Energieflüsse besser zu verstehen. Entlang der gesamten Prozesskette werden die hierfür nötigen Daten digital erfasst, gespeichert und weiterverarbeitet. So können sie beispielsweise zur Optimierung von Prozessabläufen oder der Ökobilanzierung eingesetzt werden.

Die Prototyp-Mittelkonsole wird als Naturfaser-Kunststoff-Verbund (NFK) gefertigt. Naturfasern (NF) bieten gegenüber synthetischen Fasern wie Glasfasern (GF) oder Kohlenstofffasern (CF) besonders aus Sicht der Nachhaltigkeit Vorteile. Sie binden während der jährlichen Wachstumsperioden CO_2 aus der Atmosphäre und weisen einen deutlich geringeren ökologischen Fußabdruck auf. Die dichtespezifischen Eigenschaften von NF wie Hanf oder Flachs können durchaus mit denen von GF konkurrieren.

Gleichzeitig bringt der Einsatz von NF-Halbzeugen in Faserverbund aber auch einige Herausforderungen mit sich, da sie sich anders, wie die synthetischen Fasern verhalten. NF neigen zur Aufnahme von Wasser aus der Umgebung, wodurch die mechanischen Eigenschaften beeinflusst werden. Zudem ist die Drapierbarkeit der NF-Halbzeuge aufgrund der Reibung durch unregelmäßige Faseroberflächen eingeschränkt. Diese Eigenschaften gilt es, besonders zur berücksichtigen.

4.3.2 Auswahl von Fertigungskonzepten und Werkstoffen

Für die Herstellung der drei Formteile werden trockene Prefoms mit Hilfe von Vakuum mit einem reaktiven Harzsystem infiltriert und anschließend ausgehärtet. Vakuum-Infusions-prozesse bieten sich besonders für den Bau von Prototypen und Kleinserien an, da sie mit lediglich einer Werkzeug-Formhälfte je Bauteil auskommen. Hierdurch können Kosten und Ressourcen eingespart werden. Der Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI) Prozess ist industriell am weitesten verbreitet. Jedoch können hier für komplexe Geometrien Lufteinschlüsse und Fehlstellen entstehen, die die Festigkeit des Verbunds später beeinflussen. Daher wird für die Herstellung des Prototyps der Vacuum Assisted Process (VAP®) eingesetzt.

Hierbei handelt es sich prinzipiell auch um einen VARI-Prozess, der aber durch eine semi-permeable Membran unterstützt wird. Dadurch wird die Bauteilqualität sichergestellt. Die hierfür entworfenen Werkzeugformen sind in Abbildung 86 als CAD-Modell und als finale Fertigungsmittel dargestellt.

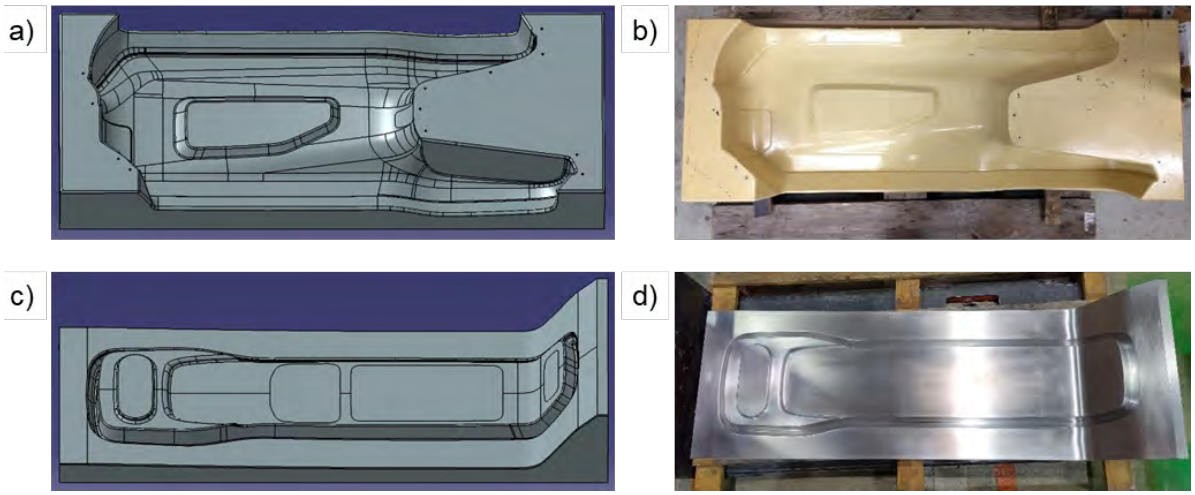


Abbildung 86: Fertigungswerkzeuge: a) CAD-Modell des Werkzeugs der linken Halbschale; b) Werkzeug der linken Halbschale; c) CAD-Modell des Werkzeugs der Deckelkomponente; d) Werkzeug der Deckelkomponente (eigene Darstellung)

Die Preforms für die NFK-Komponenten werden mit Hilfe der Ergebnisse aus der FEM-Simulation definiert. Sie zeichnen sich insbesondere durch selektive, lastpfadgerechte Verstärkungen aus. Hierbei werden unidirektionale Tapes entlang der Haupt-Lastpfade platziert, um die Festigkeit und Steifigkeit der Struktur zu steigern, ohne das Gewicht signifikant zu erhöhen. Zur Verstärkung werden trockene Hanffaser-Tapes Micro der FUSE GmbH mit einer Breite von 20 mm verwendet. Hierbei handelt es sich aktuell um das einzige kommerziell verfügbare NF-Tape. Die Außenhaut der Struktur wird aus einem 2/2 Köper (+/-90) Flachsfaser-Gewebe der Circular Structures GmbH aufgebaut. Vorversuche zeigten, dass dieses im Vergleich zu anderen NF-Geweben die beste Drapierbarkeit aufweist. Beide NF-Halbzeuge sind zu 100 % bio-basiert und haben daher deutlich geringere ökologische Auswirkungen als die synthetischen Alternativen CF und GF.

Auch für die Polymermatrix sind nachhaltige Optionen besonders interessant. Für Infiltrationsverfahren eignen sich vornehmlich thermoplastische, recyclingfähige Reaktionsharze wie Elium (Arkema France) oder bio-basierte Epoxidharze wie FormuLITE (Cardolite Specialty Chemicals Europe NV). Diese wurden in Kombination mit NF auch schon erfolgreich erprobt. Jedoch müssen für ihren Einsatz noch genauere Studien zu Werkzeug-Trennmittel-Kombinationen durchgeführt werden, um hochwertige Bauteile zu gewährleisten. Um den Fertigungsprozess bereits ohne diese Studien prototypisch aufzubauen, kommt daher das synthetische Epoxidharz EPIKOTE™ RIMR 135/RIMH 137 von Westlake Epoxy zum Einsatz. Hierdurch kann direkt eine sichere Prozessführung gewährleistet werden und der Einfluss der nachhaltigen Polymer-Varianten kann dennoch in der Ökobilanzierung berücksichtigt werden.

4.3.3 Fertigungsprozess Mittelkonsole

Der Fertigungsprozess beginnt mit dem Eintrennen und der sorgfältigen Vorbereitung der Werkzeugformen, um eine saubere und maßhaltige Bauteilherstellung zu gewährleisten. Anschließend werden die Gelege drapiert und die UD-Verstärkungen positionsgenau eingebracht, sodass eine lastgerechte Faserorientierung erzielt wird. Darauf folgt der Aufbau des Vakuum-Infusionssystems einschließlich des Angusskonzepts, dass eine gleichmäßige Harzverteilung sicherstellt. Im letzten Schritt erfolgt die Infiltration des Faserpakets sowie die Aushärtung, wodurch die finale Bauteilstruktur mit den gewünschten mechanischen Eigenschaften entsteht. Der Ablauf des prototypischen Herstellprozesses ist in Abbildung 87 vereinfacht dargestellt.

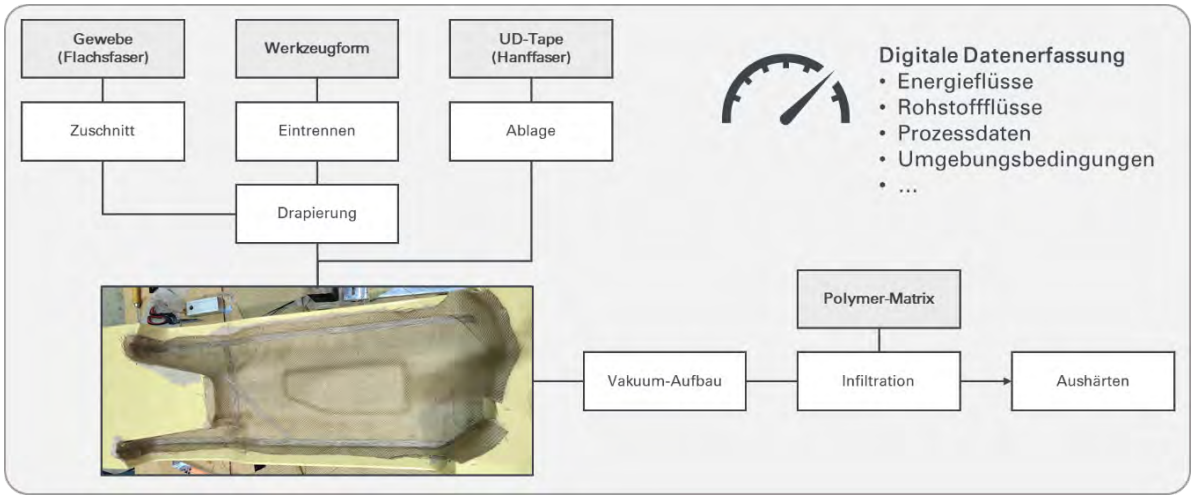


Abbildung 87: Prozessschaubild des prototypischen Fertigungsprozesses für eine Mittelkonsolen-Halbschale (eigene Darstellung)

Während der Fertigung werden zentrale Parameter wie Materialeinsatz, Energieverbrauch, Prozessdaten und Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Druck erfasst. Der Vakuuminfiltrationsprozess inklusive des Aufbaus zur Datenerfassung ist in Abbildung 89 dargestellt. Die Diagramme zeigen zudem exemplarisch die relative Luftfeuchtigkeit und die Umgebungstemperatur. Die digitale Datenerfassung erfolgt hierbei lokal über ein Monitoring-System, das künftig als Edge-Device mit Cloud-Anbindung weiterentwickelt wird.

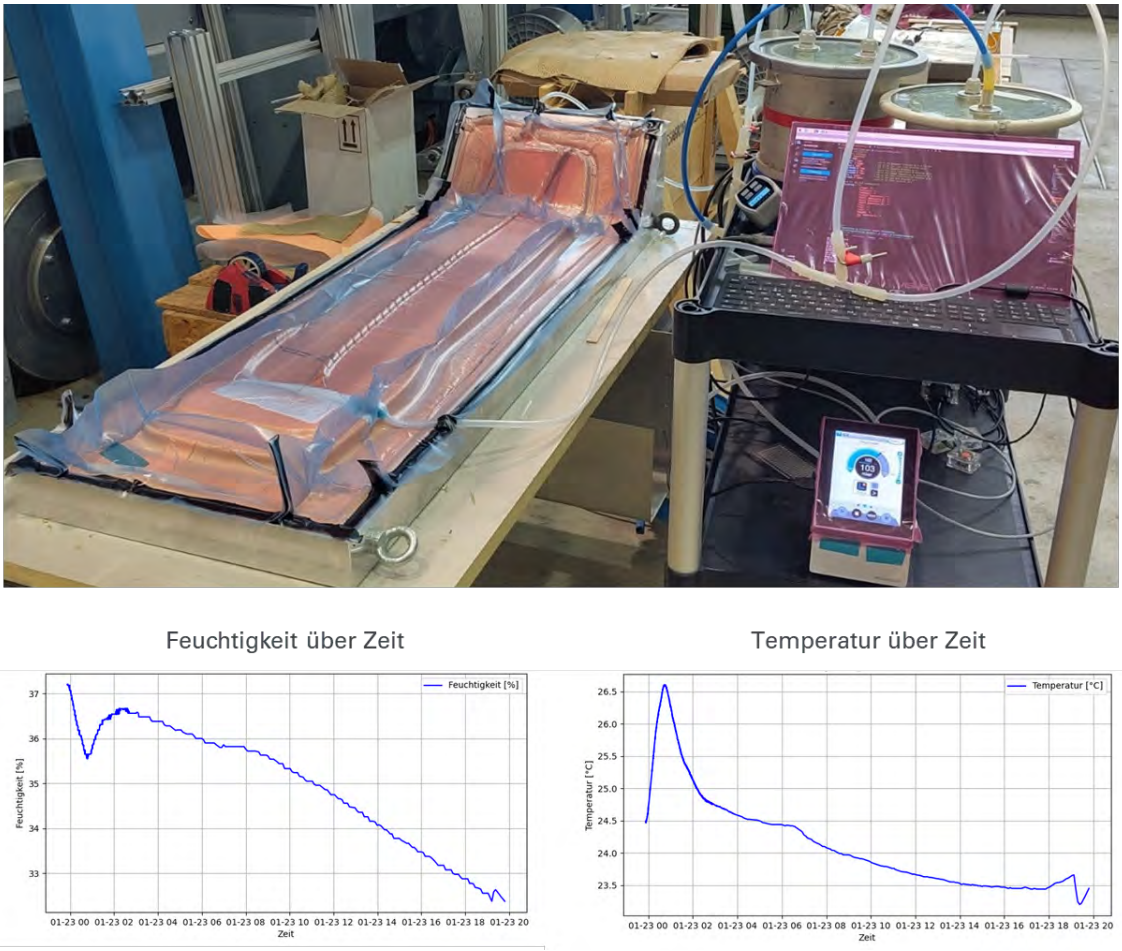


Abbildung 88: Vakuumaufbau mit digitaler Datenerfassung und Messkurven für die Umgebungsbedingungen Feuchtigkeit und Temperatur (eigene Darstellung)

Nach der Aushärtung erfolgt die Entformung der Bauteile aus den Werkzeugen. Anschließend werden die Kanten besäumt und die Einzelteile durch geeignete Fügeverfahren, vornehmlich formschlüssig, zur Gesamtstruktur zusammengefügt. Abbildung 89 zeigt die erforderliche Nacharbeit und die gefügte Mittelkonsole.

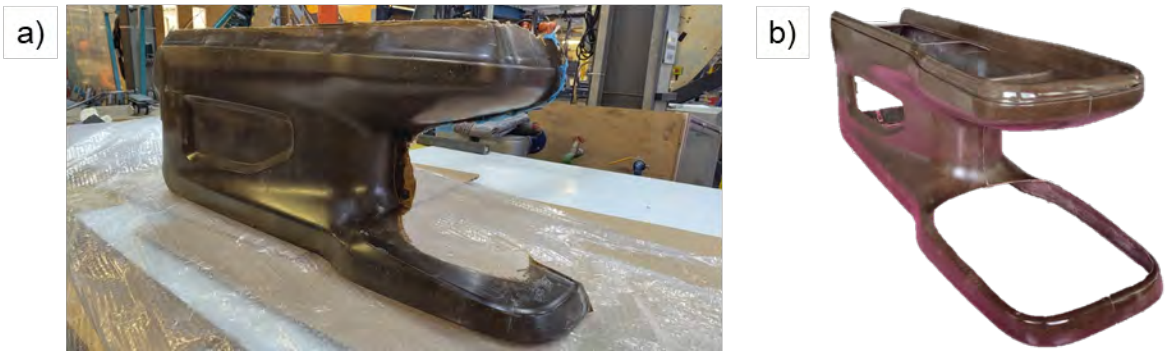


Abbildung 89: Mittelkonsolen-Struktur: a) infiltrierte, entformte und unbesäumte NFK-Halbschale; b) Zusammenbau der besäumten Mittelkonsolen-Struktur (eigene Darstellung)

In einem letzten Schritt erfolgt die Integration mit ergänzenden Komponenten (siehe Kapitel 4.5), sodass ein funktionsfähiger Strukturdemonstrator entsteht. Der finale Aufbau des Demonstrators der Mittelkonsole ist in Abbildung 90 dargestellt.

Abbildung 90: Demonstrator der Mittelkonsole (Parsyak © Fraunhofer IAO)

Fazit

Die vorgestellte Entwicklung einer kreislauforientierten Leichtbaukonstruktion zeigt, dass sich Nachhaltigkeit und Funktionsintegration im Automobilinterieur miteinander vereinen lassen. Durch den modularen Aufbau der Mittelkonsole mit lösbaren Verbindungstechniken wird die Grundlage für Reparatur, Wiederverwendung und Recycling geschaffen. Die Einbindung von NF-Verstärkungen trägt wesentlich zur Reduktion des ökologischen Fußabdrucks bei und eröffnet neue Perspektiven für den Serieneinsatz. Gleichzeitig stellen die spezifischen Materialeigenschaften von Naturfasern besondere Anforderungen an Drapierbarkeit, Feuchtigkeitsaufnahme und Prozessführung. Somit zeigt die entwickelte Baugruppe das Potenzial von Naturfaserverbundkonstruktionen im Leichtbau, aber auch die komplexen und mehrdimensionalen Zusammenhänge in der Auslegung und Fertigung von NFK Bauteilen. Daher sind für eine Umsetzung und Skalierung insbesondere die NFK-Materialmodellierung und -Optimierung sowie geeignete Recyclingkonzepte weiter zu erforschen. Dank des Einsatzes etablierter, jedoch angepasster Faserverbund-Fertigungstechnologien konnte ein flexibler Prozess entwickelt werden, der verschiedene Materialsysteme berücksichtigt. Die prototypische Herstellung hat gezeigt, dass digitale Prozessdatenerfassung wertvolle Grundlagen für eine spätere Optimierung und Ökobilanzierung liefert. Diese können in die Weiterentwicklung digitaler Analyse- und Bewertungstools einfließen. Die Kombination von FEM-Simulationen und automatisierten Preforming-Verfahren führte zu einer lastpfad-gerechten Verstärkungsstruktur mit hohem Leichtbaupotenzial. Der abschließende Aufbau des Strukturdemonstrators verdeutlicht die technische Machbarkeit und bestätigt das Potenzial für zukünftige Anwendungen. Insgesamt wird damit ein wichtiger Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Leichtbaustrukturen im Fahrzeuginterieur geleistet, der sowohl ökologische als auch funktionale Anforderungen erfüllt.

4.4 Prototypische Umsetzung - Simulation Data Management einer Mittelkonsole

Autor: Jonas Braiger

Im Bereich des Simulation Data Managements der prototypischen Umsetzung sind zwei Entwurfssprachen entwickelt worden, um die Fertigung der Mittelkonsole zu unterstützen. Die erste Entwurfssprache verwendet Geometrie-, Last- und Materialdaten als Input, um daraus automatisch eine Lagenoptimierung zu starten, welche in Altair Hypermesh durchgeführt wird. Die Lagenoptimierung dient anschließend zusammen mit Fertigungs- und Materialdaten als Grundlage für die zweite Entwurfssprache, welche ausgewählte KPIs des Herstellungsprozesses ermittelt. Eine Gesamtprozesskette ist in Abbildung 91 dargestellt. [1]

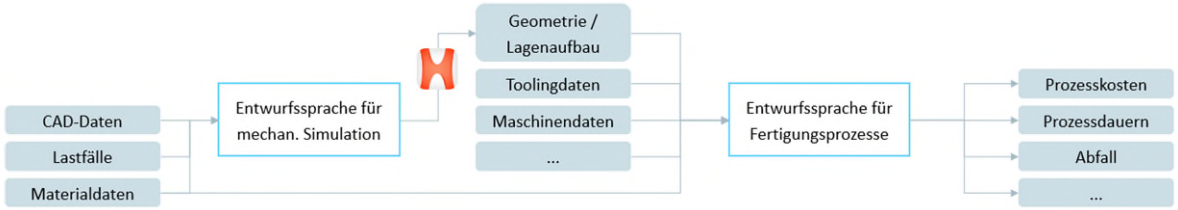


Abbildung 91: Prozesskette des Simulation Data Managements mit Entwurfssprachen (eigene Darstellung)

4.4.1.1 Optimierung und Simulation der Mittelkonsole

Die Mittelkonsole ist als technisches Bauteil verschiedenen Lastszenarien ausgesetzt. Der Großteil der mechanischen Lasten liegt dabei auf den aus Faserverbundmaterial gefertigten Seitenschalen und dem Deckel. Diese Bauteile müssen dementsprechend stabil genug ausgelegt werden, um die auftretenden Kräfte sicher und ohne Beschädigung aufzunehmen, sollen gleichzeitig aber aus Gründen des Rohstoffverbrauchs und Leichtbaus möglichst wenig Material verwenden. Bei dieser Abwägung handelt es sich um ein klassisches Optimierungsproblem.

Für derartige Optimierungsprobleme eignen sich Finite-Elemente-Solver, bei welchen das gesamte Bauteil in kleinere Einzelelemente aufgeteilt wird, in welchen jeweils individuell konstante Zustände bezüglich Lasten oder Materialien angenommen werden können. Basis für das Finite-Elemente-Netz ist dabei die Grundgeometrie, die in Kapitel 4.3 vorgestellt wird.

Für die Lastfälle, anhand welcher die Strukturoptimierung ausgelegt ist, werden Annahmen vom Projektpartner Lotus Cars übernommen. Dabei handelt es sich sowohl um Betriebslasten, welche während der alltäglichen Verwendung auftreten, und bezüglich der dabei auftretenden Verformungen beschränkt werden, als auch um Misuse-Lasten, welche die Lastgrenzen beschreiben, die noch zerstörungsfrei abgefangen werden müssen.

Zur FEM-Optimierung wird das Programm Altair Hypermesh mit angeschlossenem Optistruct-Solver verwendet. Um das Optimierungsproblem in Gänze zu beschreiben, ist eine Entwurfs-

sprache entwickelt worden, welche alle Daten zusammenfasst [2]. In dieser Entwurfssprache sind alle relevanten Funktionalitäten enthalten, um ein vollständiges Optimierungsproblem in Hypermesh aufzubauen. Dazu zählen eigene Klassen für Geometrieobjekte, Lasten, Randbedingungen und zur Steuerung der Simulations- und Optimierungsparameter. Ein Teil dieser Klassen ist in Abbildung 92 beispielhaft dargestellt. Über diese Entwurfssprache können weitere Daten wie die aus Kapitel 4.2 stammenden Requirements in den Entwurf übernommen werden. So kann das komplette Optimierungsproblem dynamisch anhand der vorgegebenen Grundanforderungen erstellt werden.

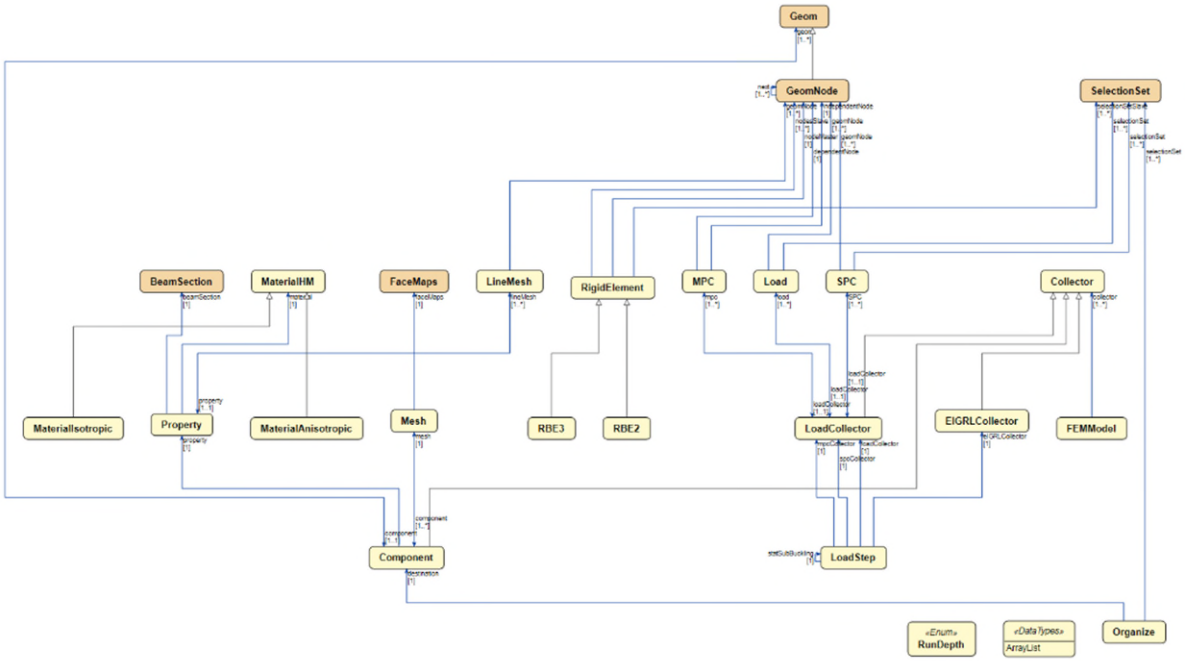


Abbildung 92: Ausschnitt aus dem Klassendiagramm für die Nachbildung der Funktionalitäten des Topologieoptimierungsprogramms (eigene Darstellung)

Die Entwurfssprache erzeugt aus Instanzen der definierten Klassen einen Entwurfsgraphen, welcher alle Informationen enthält, die für das Optimierungsproblem relevant sind. In Abbildung 93 ist ein kleiner Ausschnitt dieses Entwurfsgraphen mit Objekten für die Lasten, Randbedingungen und dazugehörigen Selektoren dargestellt. Die Schnittstelle zum FEM-Programm liest diesen Entwurfsgraphen systematisch ein und erzeugt aus den enthaltenen Objekten ein .tcl-Skript, über welches automatisch Hypermesh gestartet, das Optimierungsproblem aufgebaut und die Optimierung anschließend durchgeführt wird.

Als Grundlage für die Optimierung wurde ein doppelter 0°/45°/90°/-45°/0°-Lagenaufbau angenommen. Die äußerste Lage wird dabei nicht optimiert, um eine durchgängige Außenhaut zu erreichen. Die inneren Lagen können dagegen in ihrer Dicke variiert werden. Das Dickenprofil folgt dabei den Lastpfaden, die bei den jeweiligen Belastungsfällen vorliegen. Es zeigte sich dabei, dass die Anforderungen der Betriebslasten gegenüber den Misuse-Lasten in den Hintergrund treten und vernachlässigt werden können.

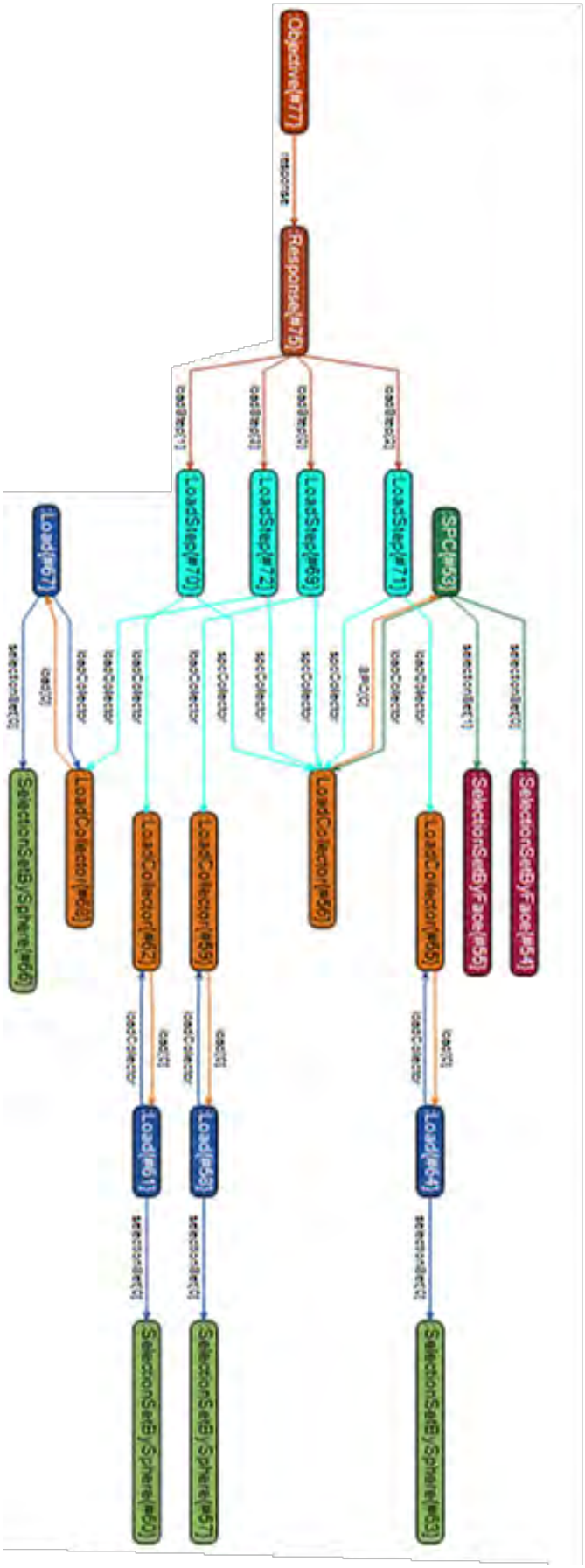


Abbildung 93: Ausschnitt aus dem erzeugten Entwurfsgraphen (eigene Darstellung)

Das initiale Optimierungsergebnis zeigt die Stellen, an welcher mehr Material benötigt wird, um die strukturelle Integrität der Konsole zu gewährleisten. Diese Verstärkungen finden sich wie in Abbildung 94 dargestellt vor allem in Bereichen mit Knicken, Kanten und überlagerten Krümmungen.

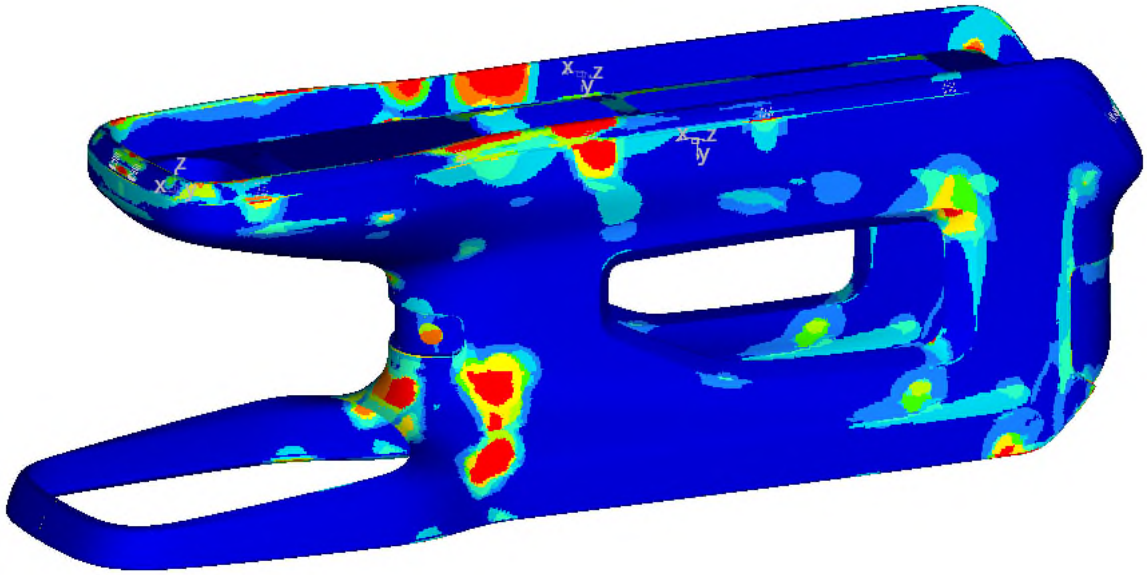


Abbildung 94: Dickenverteilung der optimierten Mittelkonsole (eigene Darstellung)

Diese Optimierung liefert anschließend die Grundlage für die tatsächliche Fertigung der prototypischen Mittelkonsole in Kapitel 4.3.

4.4.1.2 Analyse der Fertigung

Ein wichtiger Punkt bei der Bewertung eines Entwurfs ist die Fertigung an sich. Dafür wird eine weitere Entwurfssprache entwickelt, welche anhand des gewählten tatsächlichen Lagenaufbaus, des Fertigungsverfahrens und im Voraus ermittelter Maschinen-, Arbeiter- und anderer Kennzahlen wichtige KPIs wie die Prozesskosten, Herstellungsdauern oder Abfallmengen abschätzt [3, 4].

Zunächst wird dabei der Aufbau des Bauteils in die Entwurfssprache eingelesen. Dies beinhaltet die Größe, Lage und Zusammenstellung der einzelnen FV-Lagen wie auch von Verstärkungstapes. Für jedes Teil wird ein eigenes Objekt in den Entwurfsgraphen geschrieben, die dort hierarchisch gegliedert sind, etwas in einzelne Lagen oder Stacks. Anschließend öffnet sich im Programmablauf eine GUI, über welche der Benutzer einzelne Fertigungsschritte genauer spezifizieren kann, beispielsweise hinsichtlich der verwendeten Maschinen. Danach werden, wie schon für die Bauteilobjekte, für jeden so gewählten Fertigungsschritt nacheinander entsprechende Objekte in den Entwurfsgraphen geschrieben, wobei diese zum einen in ihrer Abfolge untereinander verknüpft sind (jeder Prozessschritt kennt seine vorgelagerten oder nachfolgenden Prozessschritte), sowie das Bauteilobjekt, auf welchem dieser Prozessschritt operiert. Beispielsweise gibt es für jede FV-Lage einen eigenen Drapier-Arbeitsschritt, während das Aushärten des Gesamtbauteils im Ofen nur einmal pro Baugruppe geschieht. Innerhalb der

Prozessschritte findet eine weitere Unterteilung in einen oder mehrere Subprozessschritte statt. Beispielsweise finden sich im Prozessschritt „prepareResin“, welcher die Vorbereitung des Harzes beschreibt, drei Subprozessschritte, die das Abwiegen, Mischen und Entgasen repräsentieren. Für jeden Subprozessschritt werden individuell die gewünschten KPIs berechnet. Zunächst werden dabei Prozess- und (falls die Arbeit von einem Menschen durchgeführt wird) Arbeitszeiten ermittelt. Diese ergeben sich in der Regel aus einer Kombination aus der Bauteilgeometrie (Fläche, Krümmungen, …) und maschinen- oder arbeiterspezifischen Kennzahlen, die im Voraus ermittelt oder abgeschätzt wurden. Darunter fallen für Maschinen beispielsweise Heizraten, Pumpdurchsätze oder Fahrgeschwindigkeiten, während bei menschlichen Arbeitern unterschiedlichste Arbeitsgeschwindigkeiten für verschiedene Aufgaben vorliegen.

Mithilfe der so ermittelten Zeitdauern für die einzelnen Subprozessschritte können auch die Prozesskosten abgeschätzt werden. Darunter fallen beispielsweise Stromkosten (Dauer des maschinengestützten Subprozessschritts multipliziert mit Energieverbrauch der Maschine und Strompreis pro kWh), Lohnkosten (Dauer des arbeitergestützten Subprozessschritts multipliziert mit Stundenlohn eines Arbeiters) oder Materialkosten. Fällt bei einem Arbeitsschritt Abfall an, etwa als Verschnitt oder Verbrauchsmaterial, wird die Menge ebenfalls vermerkt. Die KPIs werden dann aus den Subprozessschritten für den übergelagerten Prozessschritt aggregiert. Daraus wiederum kann eine Abschätzung für den gesamten Fertigungsprozess getroffen werden.

Diese Simulation wird zum einen für ein nicht optimiertes Mittelkonsolen-Bauteil mit doppeltem 0°-/45°-/90°-/-45°-/0°-Lagenaufbau, zum anderen für das gefertigte Bauteil mit nur einfachem Lagenaufbau und Verstärkungstapes durchgeführt und mit den realen Daten verglichen (siehe Tabelle 9).

	Unoptimierte Geometrie – Abschätzung	Optimierte Geometrie - Abschätzung	Reales Bauteil
Aufbau	Jew. 10 Lagen für Seitenschalen und Deckel	Jew. 5 Lagen für Seitenschalen und Deckel + Verstärkungstapes	Jew. 5 Lagen für Seitenschalen und Deckel + Verstärkungstapes
Ausgewählte Arbeitsschritte mit größeren Abweichungen zwischen den Varianten:			
Verschnitt pro Lage	Pauschale Annahme: 30%	Pauschale Annahme: 30%	Deckel etwa 30%, Seitenschale etwa 50%
Drapierzeit pro Lage	Pauschal 45 min	Pauschal 45 min	Deckel etwa 45 min, Seitenschale etwa 60 min
Dauer Applikation Eintrennmittel	11 h 33 min	5 h 46 min	6 h 40 min
Besäumen	6h/Baugruppe	6h/Baugruppe	1 AT (8h)/Baugruppe
Gesamte Abschätzung der Fertigung			
Gesamtprozessdauer	64 h	44 h	56 h
Gesamtfertigungs-kosten	8432 €	4912 €	unbekannt

Tabelle 9: Übersicht relevanter Fertigungs-KPIs für unterschiedliche Bauteilkonfigurationen

Die über die Entwurfssprache ermittelte Gesamtprozessdauer weicht zwar noch deutlich von der realen Fertigung ab, diese Diskrepanz ist allerdings dadurch erklärbar, da insbesondere die Seitenschalen eine sehr komplexe Bauteilgeometrie aufweisen, was die Drapierzeiten erhöht und tendenziell intensivere Nachbearbeitung erfordert. Außerdem wurde mit dem Naturfaserwerkstoff ein Material verwendet, zu welchem bisher noch keine Erfahrungen vorlagen. Dies wirkt sich ebenfalls auf die Gesamtprozessdauer aus.

Die Gesamtfertigungskosten für das reale Bauteil konnten nicht vollständig erfasst werden, da es Probleme beim Aufzeichnen der Maschinen-Stromverbräuche gab. Der Großteil der Fertigungskosten fällt in den Simulationen auf die Lohnkosten der Arbeiter ab, bei einer stärker automatisierten Fertigung könnten hier deutliche Einsparungen erzielt werden.

Literatur

1. Braiger J, Baur J, Gugliuzza J et al. (eds) (2024) Design Automation of Fibre Composite Parts via Graph-Based Design Language
2. Ramsaier M (2020) Integration der Topologie- und Formoptimierung in den automatisierten digitalen Entwurf von Fachwerkstrukturen. Dissertation, Shaker Verlag
3. Holland M, Paul N, Linder C et al. (2023) Model-driven Approach for integrated Design and Process Planning of Fiber Composite Aerostructures, Mardid
4. Chaudhari K, Holland M, Schuster J et al. (2024) Model-based design for manufacturing of automated fiber placement (AFP) composite structures, Belfast

4.5 Prototypische Umsetzung – Einsatz textiler Materialien

Autor:innen: Lena Pfeiffer; Sarah Kim; Sven Kuijpens

Mit dem zunehmenden Wunsch nach individualisierten, funktionalen und zugleich nachhaltigen Fahrzeuginnenräumen rückt die Integration smarter Materialien in den Fokus der Automobilentwicklung. Besonders textile Materialien bieten dabei ein hohes Innovationspotenzial, da sie nicht nur als Träger traditioneller Oberflächenfunktionen dienen, sondern auch aktive technische Eigenschaften wie Sensorik, Aktorik oder Bedienfunktionen übernehmen können. Die Herausforderung besteht jedoch darin, diese intelligenten Funktionen so in das Bauteil zu integrieren, dass sie wartbar, ressourcenschonend und für den Nutzer intuitiv bedienbar bleiben. Ein Ansatz, der sowohl die funktionale Erweiterung als auch die Anforderungen an eine zirkuläre Wertschöpfung berücksichtigt, kann hier entscheidende Impulse für zukünftige Fahrzeuginnenraumkonzepte liefern.

Die klassische Integration elektronischer Funktionen in Fahrzeuginnenräume erfolgt meist über fest verbaute Komponenten, die bei Defekt oder Designänderung nur mit hohem Aufwand ersetzt werden können. Dies erschwert nicht nur Reparatur und Recycling, sondern steht auch im Widerspruch zu nachhaltigen Designprinzipien und den Anforderungen an eine modulare Produktgestaltung. Zudem fehlt es oft an Konzepten, die eine funktionale Erweiterung mittels textiler Technologien mit Aspekten der Demontierbarkeit, Austauschbarkeit und Materialtrennung vereinen. Es bedarf daher eines innovativen Lösungsansatzes, der smarte textile Funktionen in ein mehrlagiges, modulares System integriert und damit die Grundlage für eine langlebige, anpassbare und ressourceneffiziente Mittelkonsole schafft.

4.5.1.1 Nachhaltige Smartifizierung einer Mittelkonsolen durch modularen Lagenaufbau

Die Möglichkeiten sind vielseitig, daher werden im Rahmen von Workshops, Konzepte zur Integration smarter Funktionen in die textilen Komponenten der Fahrzeugmittelkonsole entwickelt (Abbildung 95). Die Smartifizierung basierte dabei auf modular für verschiedene Nutzsituationen einsetzbaren, textilbasierten Funktionsflächen, die sich nahtlos in bestehende Bauteile integrieren lassen. Ziel ist es, funktionale und nachhaltige Lösungen zu erarbeiten, die sowohl den Anforderungen an intuitive Bedienbarkeit als auch an ökologische Nachhaltigkeit genügen.

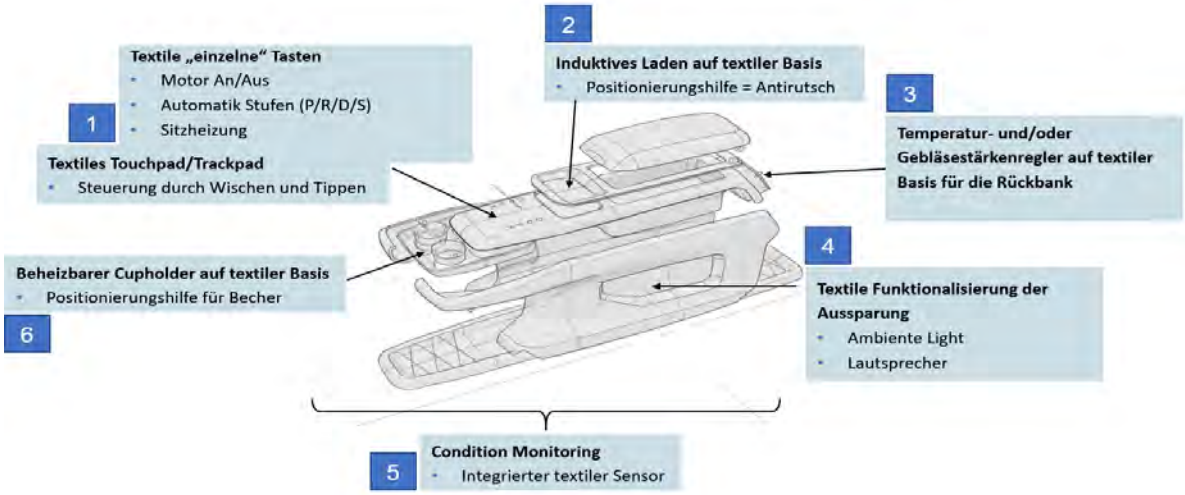


Abbildung 95: Entwickelte Smartifizierungskonzepte (eigene Darstellung)

Durch einen Lagenaufbau sollen R-Maßnahmen (z. B. Reuse, Repair, Recycle) im Sinne einer zirkulären Produktgestaltung ermöglicht werden.

Im Rahmen der prototypischen Umsetzung werden verschiedene Smartifizierungskonzepte ausgewählt. Dabei stehen insbesondere Komponenten im Fokus, welche über ein textiles Bezugssystem in das jeweilige (Faserverbund-)Bauteil integriert bzw. appliziert werden können. Zu den weiterentwickelten und in der Mittelkonsole prototypisch umgesetzten Funktionselementen zählen ein textiles Touchpad sowie textilbasierte Druckknöpfe, welche beispielsweise zur Steuerung der Sitzheizung dienen. Ergänzt werden diese durch einen textilen Regler zur Bedienung von Temperatur- und Gebläsestufen im Fondbereich (vgl. Abbildung 96).

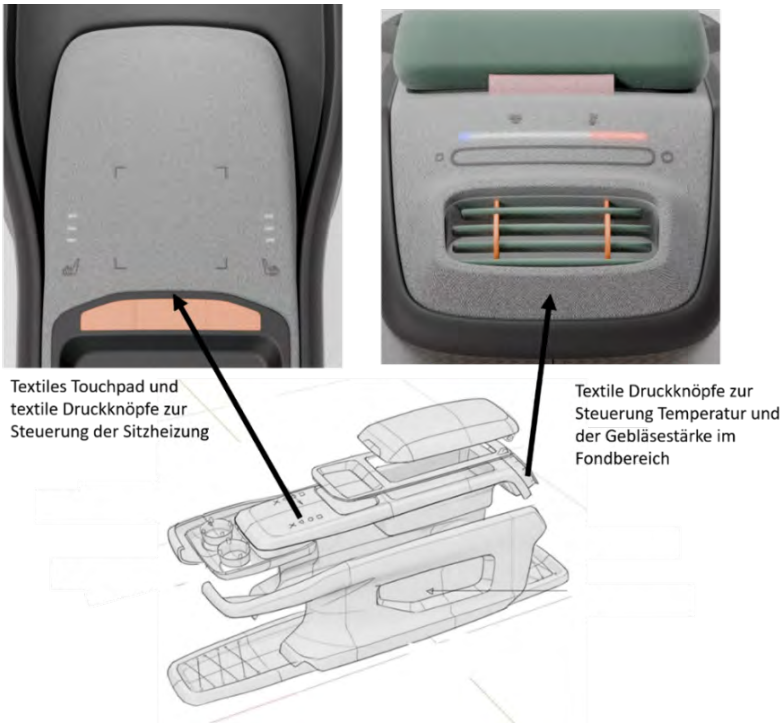


Abbildung 96: Umgesetzte textile Funktionselemente (eigene Darstellung)

Die Bedienkomponenten basieren auf leitfähigen textilen Materialien, welche eine sensorische Interaktion ermöglichen und dabei optisch wie haptisch in das textile Erscheinungsbild der Konsole integriert sind. Eine konkrete Umsetzung der smarten textilen Bedienelemente erfolgt durch zwei unterschiedliche Fertigungstechnologien, deren Auswahl sich an den jeweiligen funktionalen Anforderungen orientiert. Die textilen Druckknöpfe und Regler basieren auf piezoresistiven Drucksensoren, die mittels Sticktechnologie realisiert werden. Hierbei werden leitfähige Garne in einer gezielten Struktur auf das textile Trägermaterial gestickt (siehe Abbildung 97). Sowohl das Design als auch der strukturelle Aufbau der Stickerei bestimmen maßgeblich die sensorische Empfindlichkeit und das Verhalten der entstehenden Bedienelemente.

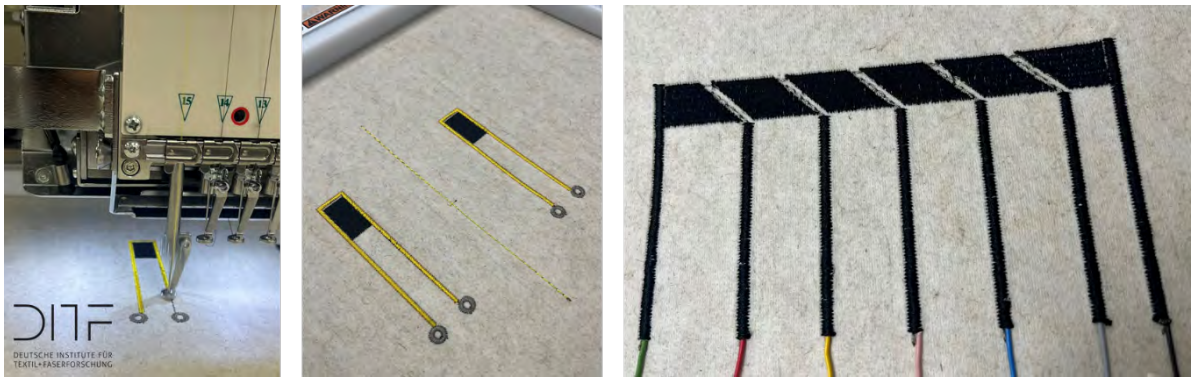


Abbildung 97: Gestickte Drucksensoren und Regler (eigene Darstellung)

Für die Realisierung des textilen Touchpads wird ein Siebdruckverfahren eingesetzt, bei dem leitfähige Pasten in definierten geometrischen Mustern auf ein textiles Trägermaterial aufgebracht werden. Durch die gezielte Schichtung leitfähiger und isolierender Bereiche entsteht so eine kapazitive Sensorstruktur, welche als Matrix ausgelegt ist. Diese ermöglicht die Detektion verschiedener Eingaben wie Tippen, Wischen oder Berühren. Die erfassten Gesten werden, wie in Abbildung 98 zu sehen, in elektrische Signale umgewandelt und an eine Steuereinheit übertragen, wodurch eine intuitive, nutzernahe Interaktion mit der Oberfläche ermöglicht wird.

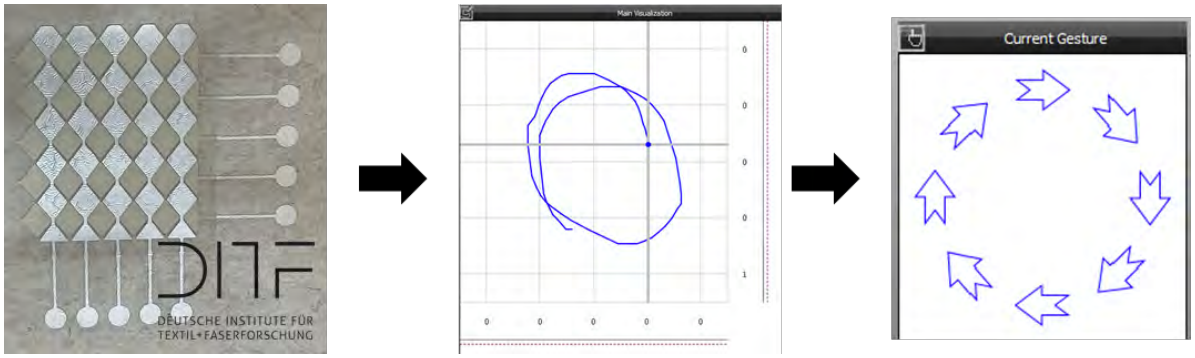


Abbildung 98: Textiles Touchpad: Aufbau und Funktionsweise (eigene Darstellung)

Da die Funktionselemente im Aufbau unter der Decklage liegen und um das Design nicht zu beeinträchtigen, ist es zudem wichtig die Funktionsfähigkeit der einzelnen Bedienelemente unter der Decklage zu prüfen.

Die Umsetzung bzw. der finale prototypische Aufbau erfolgt dann auf Basis eines eigens ausgearbeiteten nachhaltigen Lagenaufbaus (Abbildung 99), der aus drei funktional klar voneinander getrennten Schichten besteht. Diese Lagen, Polster-, Funktions- und Deckschicht sind so konzipiert, dass sie unabhängig voneinander demontiert und bei Bedarf ersetzt werden können.

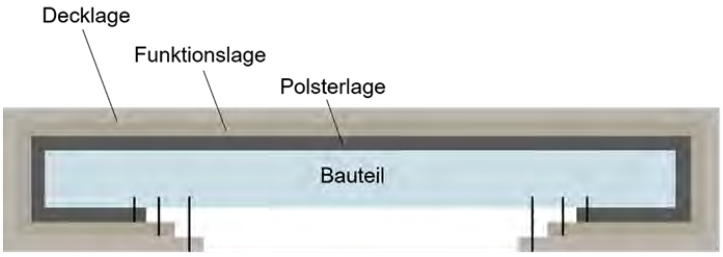


Abbildung 99: Lagenaufbau (eigene Darstellung)

Um eine Modularität zu ermöglichen, wird beim Bespannungskonzept bewusst auf klebstoffbasierte Verbindungen verzichtet. Stattdessen wird ein Befestigungskonzept gewählt, das eine zerstörungsfreie Trennung der Lagen sowie deren Wiederaufbau ermöglicht. Dies trägt nicht nur zur Wiederverwendbarkeit bei, sondern reduziert auch den Einsatz potenziell umweltschädlicher Substanzen und verhindert schädliche Ausgasungen während der Nutzung.

Die Auswahl der Materialien sowie das gestalterische Konzept, insbesondere hinsichtlich Farbgebung und Haptik der Decklage, erfolgten im Rahmen interdisziplinärer Workshops und Projekttreffen innerhalb des Arbeitspakets 4.3. Dabei arbeiteten alle beteiligten Projektpartner eng zusammen, um eine ganzheitlich nachhaltige Lösung zu entwickeln. Beso Wert wird auf den Einsatz natürlicher und umweltverträglicher Materialien gelegt. Zudem wird angestrebt, die Materialvielfalt innerhalb der Mittelkonsole möglichst gering zu halten, um spätere Recyclingprozesse zu vereinfachen. Aus diesem Grund bestehen sowohl das Bezugsmaterial als auch die Verstärkungsfasern des Faserverbunds der Mittelkonsole aus Flachs bzw. Leinen, wodurch eine homogenere Materialstruktur im Bauteil erreicht wird. Der finale Lagenaufbau (siehe Abbildung 100) und seine Materialien sind im Folgenden erläutert.

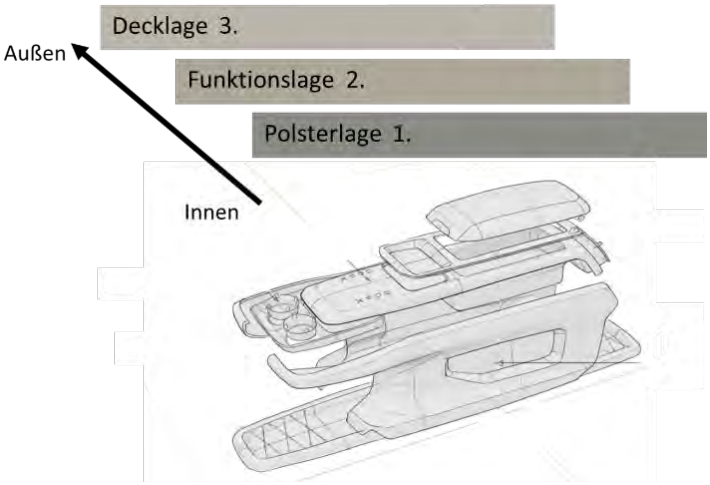


Abbildung 100: Finaler Lagenaufbau (eigene Darstellung)

Die unterste und erste Lage bildet ein Nadelvlies aus 100 % Wolle und dient lediglich der Polsterung und hat keine zusätzliche Funktion im Lagenaufbau. (Abbildung 101).

Abbildung 101: Polsterlager aus Nadelvlies 100% Wolle (eigene Darstellung)

Darauf folgt die zweite Lage, die Funktionslage aus einem Spinnvlies mit einem Faseranteil von 65 % Flachs und 35 % Viskose. Sie ist Träger der smarten textilen Komponenten wie dem Touchpad und der Druckknöpfe (Abbildung 102) und ist somit die wichtigste Lage. Im finalen Aufbau werden die smarten Funktionselemente – wie etwa textile Bedieneinheiten zur Steuerung der Sitzheizung oder das Touchpad – gezielt voneinander getrennt ausgeführt. Diese Trennung erlaubt nicht nur einen erleichterten Austausch einzelner Komponenten im Falle einer Funktionsstörung oder Beschädigung, sondern ermöglicht auch eine flexible Anpassung an unterschiedliche Designvorgaben und Nutzungsszenarien. Die Anordnung und Dimensionierung der smarten Komponenten kann somit modular auf spezifische Anforderungen abgestimmt werden, jedoch sollte deren Positionierung bereits in der übergeordneten Konzeptentwicklung berücksichtigt werden.

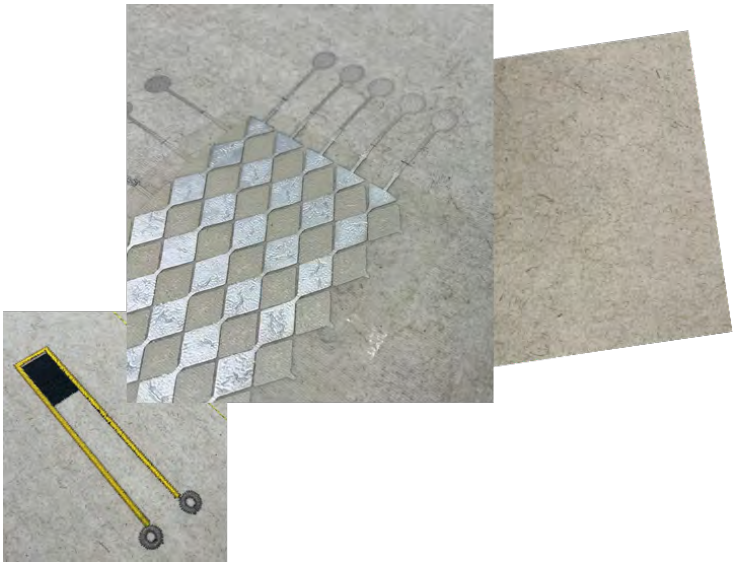


Abbildung 102: Funktionslager: Spinnvlies aus 65% Leinen und 35% Viskose (eigene Darstellung)

Als oberste Schicht des textilen Lagenaufbaus dient ein Köpergewebe aus 100 % Leinen (Abbildung 103), das gleichzeitig als Sichtfläche und als Träger grafischer Symbole fungiert. Diese Decklage übernimmt keine technische Funktion und ist daher besonders leicht austauschbar. Dadurch können sowohl das Oberflächenmaterial als auch die aufgebrachten Piktogramme, etwa für die Sitzheizung oder Lautstärkeregelung, bei Bedarf schnell und

unkompliziert ersetzt oder an veränderte gestalterische Anforderungen angepasst werden. Auch im Fall von Abnutzung oder Designaktualisierungen lassen sich diese visuellen Elemente ohne Eingriff in die darunterliegende Funktionsebene erneuern, was den modularen und nachhaltigen Charakter des Gesamtkonzepts zusätzlich stärkt.

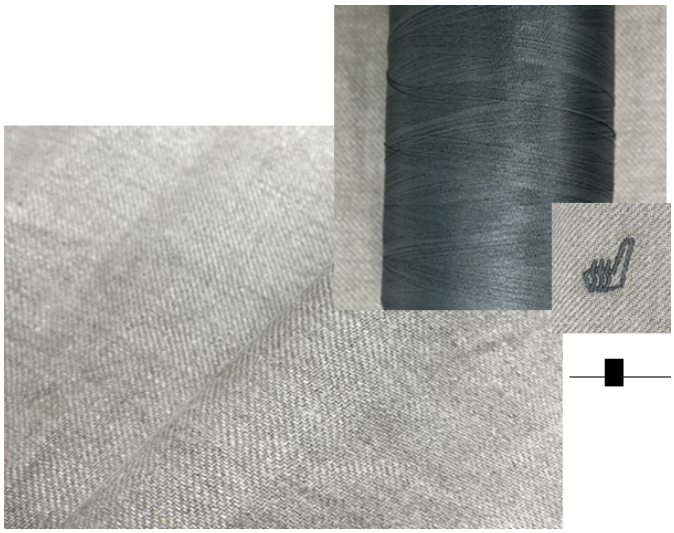


Abbildung 103: Decklage: Köpergewebe 100% Leinen (eigene Darstellung)

Durch die modulare und schichtweise Trennung der Funktionen wird eine einfache Austauschbarkeit einzelner Komponenten ermöglicht, sei es im Falle einer Beschädigung, eines Funktionsverlusts oder bei Designänderungen. Dieser Aufbau unterstützt somit eine nachhaltige Produktgestaltung, insbesondere im Hinblick auf die Umsetzung der sogenannten R-Strategien (Reuse, Repair, Recycle), und bildet die Grundlage für eine zukunftsorientierte, ressourcenschonende Fahrzeuginnenraumgestaltung

Abbildung 104: Umgesetzter Funktionalisierungskonzept an finaler Mittelkonsole (eigene Darstellung)

Die entwickelten textilen Bedienelemente können erfolgreich prototypisch umgesetzt werden (Abbildung 104). Die modulare Struktur des Lagenaufbaus erweist sich als funktional und im

Sinne der Nachhaltigkeit. Sie ermöglicht eine verlustarme Demontage und einen gezielten Austausch beschädigter oder veralteter Komponenten, ein entscheidender Vorteil für die Umsetzung von R-Strategien in der Produktentwicklung.

Zur Bewertung der Herstellbarkeit und Integration werden „Techpacks“ (technische Datenblätter) erstellt und analysiert. Diese enthalten unter anderem Materialangaben, Herstellprozesse, Einbauanleitungen und Variantenbewertungen. Die Analyse der Techpacks bestätigt die technische Umsetzbarkeit, skalierbare Fertigungsoptionen sowie ökologische Vorteile des Konzepts.

4.5.1.2 Vorausschauende Konstruktion für smarte textile Komponenten

Bereits in der frühen Phase der Gestaltung und Konstruktion der Mittelkonsole ist eine vorausschauende Planung essenziell, insbesondere im Hinblick auf die Positionierung elektronischer Komponenten. Um eine funktionale und saubere Integration elektronischer Leitungen zu gewährleisten, müssen potenzielle Kabelführungen frühzeitig mitbedacht und in das Gesamtkonzept integriert werden. Zwar bleibt die konkrete Auswahl der jeweiligen smarten Funktionselemente an den vorgesehenen Stellen flexibel, jedoch müssen konstruktive Voraussetzungen wie Kabeldurchführungen oder Anbindungspunkte bereits im Entwurfsprozess berücksichtigt werden. Dies betrifft nicht nur die elektronische Integration, sondern ebenso das spätere Bezugskonzept der Bauteile. Die Auswahl geeigneter Bezugsmaterialien ist von zentraler Bedeutung, da nicht alle textilen Werkstoffe in gleicher Weise verarbeitbar sind. Je nach gewähltem Design und Komplexität des Aufbaus können nachhaltige Bezugskonzepte an ihre Grenzen stoßen oder technisch nicht umsetzbar sein.

Insbesondere im Bereich der Faserverbundstruktur muss die finale Positionierung der Verkabelung bereits vor der Bauteilfertigung festgelegt sein, um entsprechende Durchbrüche oder Führungselemente direkt im Formwerkzeug oder Halbzeug integrieren zu können. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer engen und kontinuierlichen Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Bereichen: dem Design, der Bauteilentwicklung und -fertigung sowie der Funktionalisierung textiler Komponenten. Nur durch einen ständigen Austausch kann eine funktional und gestalterisch einheitliche Lösung entstehen.

Trotz des hohen Innovationspotenzials stellt die industrielle Umsetzung von E-Textiles derzeit eine Herausforderung dar. Es existieren bislang keine standardisierten Prozesse für die Serienfertigung, insbesondere im Bereich der elektrischen Kontaktierung. Da Investitionen in entsprechende Serienlösungen bislang ausgeblieben sind, erfolgt die Kontaktierung der textilen Sensorik und Aktorik überwiegend in Handarbeit. Dies führt zu erhöhtem Zeit- und Kostenaufwand und stellt derzeit ein wesentliches Hindernis für die breite Markteinführung dar. Das Potenzial textiler Elektronik bleibt jedoch hoch, da textile Funktionselemente eine hohe gestalterische Flexibilität ermöglichen, mit geringem Materialeinsatz auskommen und sich, insbesondere bei Druck- oder Stickverfahren, in großem Maßstab ressourcenschonend und wirtschaftlich herstellen lassen. Die größte Herausforderung besteht gegenwärtig in der Entwicklung robuster, automatisierbarer Kontaktierungslösungen, die eine serielle Produktion von E-Textile-Systemen ermöglichen würden.

Der finale Funktions-Prototyp wurde auf der Hannover Messe 2025 ausgestellt und war vom 31. März bis zum 04. April 2025 für Besucher erlebbar (Abbildung 105).

Abbildung 105: Mittelkonsolen Prototyp auf der Hannover Messe 2025 (© Markus Jürgens)

Abbildung 106: Ausstellung der Mittelkonsole in der ARENA 2036 in Stuttgart Vaihingen (Parsyak © Fraunhofer IAO)

4.6 Ökobilanzielle Bewertung der smarten Mittelkonsole

Autorinnen: Ann-Kathrin Briem, Sun-Hea Hong und Marie Schwahn

Die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit von Produkten und Prozessen erfordert eine umfassende Analyse ihrer Umweltwirkungen. Um zirkuläre Lösungen zu bewerten, können Kreislaufindikatoren verwendet werden (siehe Kapitel 3.3). Diese Indikatoren sind in der Regel eher qualitativ, einige sind quantitativer Natur, jedoch liefern sie nur begrenzte Einblicke in die tatsächliche Zirkularität. Um die gesamten Umweltwirkungen – einschließlich der zirkulären Strategien und Lösungen – zu bewerten, ist jedoch ein umfassenderer Ansatz erforderlich. Hierbei spielt die Ökobilanzierung (LCA) eine entscheidende Rolle. LCA ist ein Werkzeug, das die potenziellen Umweltwirkungen eines Produkts und/oder Prozesses quantifizieren kann und somit eine fundierte Bewertung der Nachhaltigkeit ermöglicht.

In diesem Kapitel wird die gezielte Anwendung der LCA durch das in Kapitel 3.3 beschriebene LCA-Modul auf die smarte Mittelkonsole (beschrieben in Kapitel 4.3) vorgestellt. Angesichts der steigenden Anforderungen an ökologische Nachhaltigkeit in der Automobilindustrie und der Notwendigkeit, zirkuläre Ansätze frühzeitig in den Produktentwicklungsprozess zu integrieren, ist die LCA von zentraler Bedeutung.

Das LCA-Modul, das über eine Schnittstelle mit dem Tool *CycloP* verbunden ist, ermöglicht die iterative Bewertung repräsentativer deterministischer Lebenszykluspfade, in denen konkrete Produktinstanzen einen deterministischen Lebenszyklus inkl. möglicher Kreislaufmaßnahmen durchlaufen. Durch die Verarbeitung von Lebenszyklusinventarlisten für diese spezifischen deterministischen Lebenszykluspfade, die durch *CycloP* strukturiert und automatisiert für die LCA aufbereitet werden, liefert das LCA-Modul wichtige Daten zur ökologischen Nachhaltigkeit. Diese Informationen sind entscheidend, um die Umweltauswirkungen der Mittelkonsole zu quantifizieren und die Effizienz von eingeplanten R-Strategien im Lebenszyklus zu bewerten.

Die Ergebnisse der LCA für die Mittelkonsole werden im Folgenden detailliert präsentiert und folgen den typischen Schritten der LCA, wie in den Normen ISO 14040 und 14044 [1, 2] definiert. Die gewonnenen Erkenntnisse tragen zur Unterstützung der Entscheidungsfindung im Entwicklungsprozess bei und bieten wertvolle Informationen für die Automobilbranche, um die Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft erfolgreich zu meistern.

4.6.1 Ziel- und Untersuchungsrahmen (Goal and Scope)

Im Rahmen der Ökobilanz wird zunächst der Ziel- und Untersuchungsrahmen (engl. Goal and Scope) gemäß den Normen ISO 14040 und 14044 [1, 2] festgelegt. Diese Festlegung umfasst

den Zweck der Studie, die vorgesehene Zielgruppe sowie die potenzielle Verwendung der Ergebnisse. Der Untersuchungsrahmen definiert die Systemgrenzen, die funktionelle Einheit, die betrachteten Wirkungskategorien (z. B. Auswirkungen auf den Klimawandel, Wasserknappheit, Versauerung) und das erforderliche Detaillierungsniveau.

Die hier durchzuführende ökobilanzielle Betrachtung fokussiert sich auf die Analyse des Lebenszyklus der smarten Mittelkonsole. Das Ziel dieser Studie besteht in der Demonstration des in Kapitel 3.3 beschriebenen Konzepts sowie des Prototyps des *CycloP* Softwaretools. Darüber hinaus wird die Bewertung des finalen Konzepts der Mittelkonsole (siehe Kapitel 4.3) als Beispielprodukt angestrebt. Diese Demonstration soll es ermöglichen, die Designer:innen über ökologische Auswirkungen oder Verbesserungsmöglichkeiten ihrer gewählten Materialien und zirkulär orientierten Designstrategien (z. B. Fokus auf Reparatur oder Recycling) zu informieren. Zusätzlich wird eine konventionelle Mittelkonsole als Referenzprodukt betrachtet und für einen Vergleich herangezogen.

Der definierte Untersuchungsrahmen umfasst den gesamten Lebenszyklus eines Produkts unter Berücksichtigung verschiedener Lebenszykluspfade und möglicher unerwünschter Zustände (vgl. Kapitel 3.4), die dann Kreislaufmaßnahmen auslösen. Die funktionelle Einheit wird deshalb als „Nutzung der Mittelkonsole für ein Servicejahr“ festgelegt und umfasst die entsprechenden Anteile der Produktion sowie Maßnahmen am Lebensende. Die LCA-Informationen und das zugrunde liegende Modell sollten dabei Unsicherheiten, Transparenz und die Qualität der verwendeten Daten adressieren, um eine fundierte Entscheidungsbasis zu schaffen.

4.6.2 Datensammlung und -aufbereitung (LCI)

In der zweiten Phase der Ökobilanz, der Sachbilanz (engl. „Life Cycle Inventory“, LCI) spielt die Datensammlung und -aufbereitung eine zentrale Rolle. Diese Phase umfasst die Erhebung relevanter ökologischer Inputs und Outputs im Hinblick auf das untersuchte System und beinhaltet die Zusammenstellung der Daten, die zur Erreichung der definierten Studienziele erforderlich sind.

4.6.2.1 Zusammenstellung von Materialdaten der smarten Mittelkonsole

Für die Analyse des finalen Konzepts der smarten Mittelkonsole wird eine umfassende Datenbasis erstellt, die zunächst die Zusammenstellung von Materialdaten der Mittelkonsole umfasst. Hierfür wird im Rahmen der Demonstration zunächst gemeinsam mit Designer:innen, Material- und LCA-Expert:innen eine Inventarliste (siehe Kapitel 4.2 und 4.3) in mehreren Iterationsschleifen entwickelt und verfeinert, die eine angenommene Serienproduktion der Mittelkonsole abbildet sowie für einzelne Komponenten mögliche R-Strategien und Kreislaufmaßnahmen definiert. Die Datenbasis der Mittelkonsole in Form des Strukturbaums und des Lebenszyklus wird außerdem im *CycloP* Softwaretool modelliert, sodass Lebenszyklusinventarlisten zu verschiedenen Pfaden für die Mittelkonsole generiert und vom LCA-Modul (teil-)automatisiert verwertet werden können.

4.6.2.2 Datenbasis der Referenzkonsole und zirkuläre Strategien

Als Datenbasis für ein Referenzprodukt steht eine Stückliste eines Serienbauteils zur Verfügung. Um die Funktionalitäten des *CycloP* Softwaretools zu demonstrieren und iterativ weiterzuentwickeln, wird zunächst die Produktarchitektur der Referenzkonsole ins Tool eingepflegt. Hierfür wird nun der erwartete Lebenszyklus inklusive aller für die LCA relevanter Daten modelliert. Auf dieser Basis werden unterschiedliche Strategien entwickelt, wie Kreislaufmaßnahmen (z. B. Remanufacture, Reuse, Recycling) zur Auflösung unerwünschter Zustände eingesetzt werden können oder potenziell nachhaltigere Materialien verwendet werden, um die ökologische Nachhaltigkeit des Produktes zu optimieren. Diese Strategien können dann analysiert und verglichen werden. Die vier exemplarischen Strategien sind:

- „Linear“ – Status Quo der Referenz in einem linearen System ohne zirkuläre Maßnahmen als Vergleichsbasis,
- „Linear-sustainable“ – analog „Linear“ mit der Ergänzung von nachhaltigeren Materialoptionen bei der Produktion,
- „Circular“ – eine Strategie, die verschiedene beispielhafte Kreislaufmaßnahmen beinhaltet, die in den analysierten Lebenspfaden durchlaufen werden können,
- und „Circular-sustainable“ – analog „Circular“ mit der Ergänzung von nachhaltigeren Materialoptionen bei der Produktion.

4.6.2.3 Aufbau einer beispielhaften LCA-Datenbasis zur Bewertung der Mittelkonsole

Für die Demonstration im Projekt wird eine beispielhafte Datenbasis im Rahmen des LCA-Moduls aufgebaut. Hierfür erfolgt eine sorgfältige Auswahl an verfügbaren LCA-Datensätzen für die benötigten Materialien und Prozesse der smarten Mittelkonsole und der Referenzkonsole. Diese Zusammenstellung dient nicht nur der ökobilanziellen Bewertung der Mittelkonsole, sondern ermöglicht auch eine eingehende Diskussion der Themen LCA-Datenqualität und LCA-Zuordnungsqualität („Mapping Quality“).

Im Verlauf der Demonstration werden iterativ insgesamt 74 verschiedene Materialien und Prozesse identifiziert, die für die Bewertung sowohl der smarten Mittelkonsole als auch einer konventionellen Mittelkonsole erforderlich sind. Für die Produktion dieser Materialien (einschließlich Energie- und Hilfsstoffe) sowie für die Prozesse am Lebensende (Recycling, Verbrennung oder Deponierung) werden anschließend passende LCA-Datensätze in verfügbaren LCA-Datenbanken identifiziert, ausgewählt und zusätzlich ggf. selbst modelliert. Abbildung 107 zeigt die Anteile der ausgewählten Materialien in verschiedene Materialklassen. Kunststoffe und Textilien machen über die Hälfte der Materialien aus, gefolgt von Metallen, Verbundwerkstoffen und Elektronik. Die Auswertung zeigt, dass in automobilen Bauteilen wie Mittelkonsolen sehr unterschiedliche Materialklassen verbaut sind, deren ökobilanzielle Betrachtung unterschiedlicher Expertise und Datengrundlage bedarf.

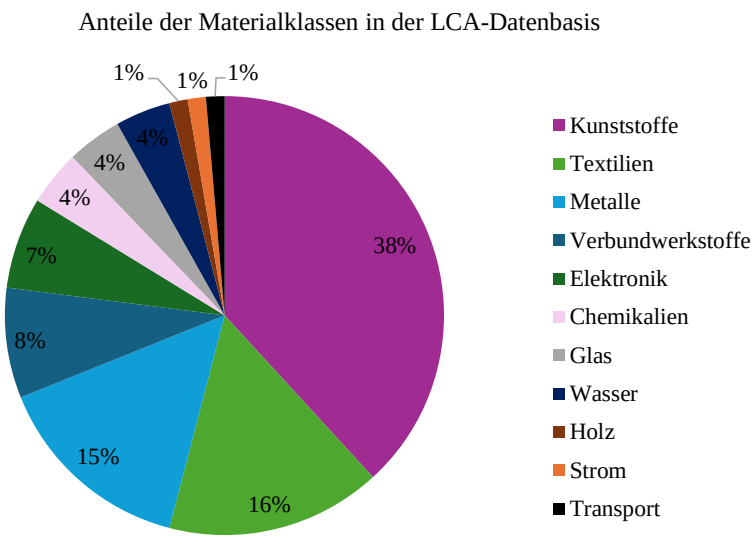


Abbildung 107: Anteile der Materialklassen der exemplarisch zusammengestellten LCA-Datengrundlage basierend auf der Stückliste der smarten Mittelkonsole und einer Referenzkonsole (eigene Darstellung)

4.6.2.4 Bewertung der Datenqualität und Mapping-Qualität

Die Qualität der Daten spielt eine entscheidende Rolle in der LCA. Die Methodik des Product Environmental Footprint (PEF) der Europäischen Kommission [3, 4] betont die Bedeutung der Datenqualität und bewertet diese anhand mehrerer Kriterien:

- Vollständigkeit: Der Umfang, in dem alle notwendigen Daten verfügbar sind.
- Konsistenz: Der Grad, in dem die Daten stabil und reproduzierbar sind.
- Relevanz: Wie gut die Daten dem Zweck der Bewertung dienen.
- Genauigkeit: Die Präzision der Datenwerte im Vergleich zu wahren Werten.
- Technologische, zeitliche und geografische Repräsentativität: Die Angemessenheit der Daten für die Technologie, den Zeitpunkt und den Standort der Studie.

Die Analyse der Datenqualität ist unabdingbar, um sicherzustellen, dass die LCA-Ergebnisse sowohl präzise als auch aussagekräftig sind. Die Qualität hängt sowohl von den verwendeten Datensätzen als auch von dem gewählten Modell ab, wobei die Informationen zur Datenqualität den entsprechenden Hintergrunddatensätzen beigefügt sind. Jedes Datenbanksystem hat seine eigenen Validierungsschemata.

Zusätzlich zur Qualität der LCA-Datensätze ist auch die Passgenauigkeit der Zuordnung zum betrachteten System ein wichtiger Aspekt. Im Rahmen der Demonstration erfolgt daher eine weitere Qualitätsbewertung, die als „Mapping Quality“ bezeichnet wird. Diese bewertet qualitativ, wie gut die ausgewählten LCA-Datensätze zum vorliegenden System und dessen spezifischen Charakteristika passen. Als Kriterien werden hierfür der Materialtyp, der Prozesstyp und der Standort der Herstellung definiert, angelehnt an die technologische und geographische Repräsentativität. Tabelle 10 bietet einen Überblick über die Bewertungskriterien, die exemplarisch für eine erste Bewertung im Rahmen dieser Demonstration dienen. Beispielweise wird ein LCA-Datensatz für ein Polypropylen-Spritzgussbauteil in Deutschland

als „sehr gut“ bewertet, wenn er für ein ebensolches zugeordnet wird. Andererseits wird die Zuordnung eines ähnlichen LCA-Datensatzes, aber mit EU-Bezug, nur als „gut“ eingestuft, da hier das Kriterium des Standorts nicht übereinstimmt. Dieser Ansatz wurde hier projektspezifisch entwickelt und angewendet; weitere Forschung und Standardisierung sind in diesem Bereich notwendig.

Zuordnungsqualität („Mapping Quality“)	**Definitionen**
Sehr gut („very good“)	Alle drei Kriterien (spezifisches Material, Prozess und Standort) stimmen überein.
Gut („good“)	Zwei von drei Kriterien stimmen überein.
Schätzung („estimate“)	Ein Kriterium stimmt überein.
Proxy („proxy“)	Keines der Kriterien stimmt genau überein, aber ein angenäherter Datensatz ist als Platzhalter („proxy“) verfügbar.
Kein Datensatz („no match found“)	Es kann kein passender Datensatz gefunden werden.

Tabelle 10: Überblick über die Bewertungskriterien der selbst durchgeführten Bewertung der Zuordnungsqualität („Mapping Quality“)

4.6.2.5 Ergebnisse der Qualitätsbewertungen als Diskussionsgrundlage

Ausgehend von den 74 exemplarisch ausgewählten Materialien, kombiniert mit jeweils vier verschiedenen LCA-Datensatzarten (Produktion, Recycling, Verbrennung und Entsorgung), ergeben sich für die Demonstration an dieser Stelle 296 theoretisch mögliche Zuordnungen von Datensätzen. In 231 Fällen konnten Datensätze erfolgreich zugeordnet werden. Die Qualitätsbewertung des LCA-Datensatzes aus der verwendeten LCA-Datenbank weist dabei – mit wenigen Ausnahmen – eine Einstufung von „gut“ (214) oder „sehr gut“ (6) auf. In 65 Fällen war eine Zuordnung nicht möglich. Dies lag häufig daran, dass die gewählte Allokationsmethode die Auswahl anderer verfügbarer Datensätze nicht ermöglichte oder dass die Kombination aus Material und Datensatzart keine realitätsnahe Situation darstellt. Beispiele hierfür sind die Verbrennung von Metallen oder die Deponierung von Stoffen, die in Deutschland und der EU streng limitiert ist und somit in der Praxis kaum vorkommt.

Die selbst durchgeführte Zuordnungsbewertung („Mapping Quality“) verteilt sich relativ gleichmäßig über alle Kategorien, wobei eine Tendenz zu den besser bewerteten Kategorien zu beobachten ist (vgl. Abbildung 108).

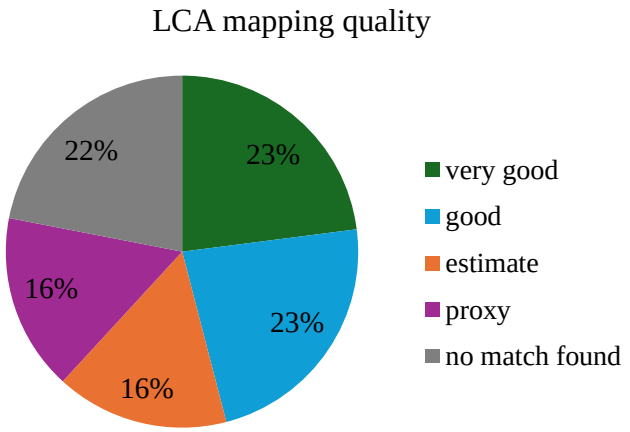


Abbildung 108: Verteilung der Zuordnungsqualität („Mapping Quality“) der exemplarischen Datenmenge (eigene Darstellung)

4.6.3 Wirkungsabschätzung (LCIA)

Die dritte Phase einer Ökobilanz umfasst die Wirkungsabschätzung (engl. „Life Cycle Impact Assessment“, LCIA) auf Basis der Sachbilanz und im Hinblick auf Ziel und Untersuchungsrahmen. Kurz gesagt: in dieser Phase werden die Ergebnisse berechnet. Das in der Sachbilanz aufgestellte Inventar enthält Emissionsflüsse, die nun zu Wirkungskategorien zugeordnet (Klassifizierung) und charakterisiert werden (Charakterisierung). Die Ergebnisse liegen als LCA-Indikatoren vor und stellen potenzielle Umweltwirkungen dar. Optionale Schritte wie Normierung und Gewichtung sind in der LCIA ebenfalls möglich, werden in der vorliegenden Studie jedoch nicht durchgeführt.

Die LCA-Ergebnisse, für die im Projekt CYCLOMETRIC entwickelte Mittelkonsole basieren auf der in Abschnitt 4.6.2 beschriebenen Datenbasis, die aus der Zusammenstellung von Materialdaten sowie der Erstellung einer Inventarliste in Zusammenarbeit mit Designer:innen, Material- und LCA-Expert:innen und Implementierung im *CycloP* Tool hervorgeht. Im LCA-Modul werden nun die standardisierten Schritte der Wirkungsabschätzung gemäß der ISO-Normen 14040 und 14044 durchgeführt (für eine weitere Beschreibung der Berechnungsschritte und der Toolfunktionalitäten siehe Kapitel 3.4). Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse in der Wirkungskategorie Klimawandel für den Indikator „EF3.1 Climate Change, total“ beispielhaft diskutiert. Weitere Indikatoren sind im Algorithmus implementiert und können berechnet und ausgewertet werden, werden jedoch aus Platzgründen in diesem Kapitel nicht weiter behandelt.

4.6.4 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

4.6.4.1 Ergebnisse für die smarte Mittelkonsole

Die Ergebnisse der Analyse für eine angenommene Serienproduktion der smarten Mittelkonsole sind in Abbildung 109 dargestellt. Diese zeigt die Umweltauswirkungen im

Hinblick auf den Indikator „EF 3.1 Climate Change, total“ in kg CO_2-Äquivalenten pro funktionelle Einheit, aufgeschlüsselt nach dem Einfluss der verschiedenen Materialklassen und für verschiedene Lebensdauern. Für die Produktion einer Mittelkonsole ergibt sich ein sogenannter CO_2-Fußabdruck von insgesamt ca. 56 kg CO_2-Äquivalente. In den verschiedenen analysierten Lebenszykluspfaden ergeben sich für den Demonstrator insgesamt drei verschiedene Lebensdauern: 4.000 Tage (ca. 11 Jahre), 6.000 Tage (ca. 16,5 Jahre) und 10.000 Tage (ca. 27 Jahre). Pro funktionelle Einheit ergibt sich demnach für die Produktion ein Ergebnis zwischen 2,1 und 5,1 kg CO_2-Äquivalenten für eine Mittelkonsole pro Servicejahr (vgl. Abbildung 109). Aus den Ergebnissen für die Materialklassen geht hervor, dass Kunststoffe den höchsten Anteil an den Umweltauswirkungen in dieser Kategorie aufweisen, gefolgt von Textilien, Elektronik und Verbundwerkstoffen. Der Einfluss von Metallkomponenten ist vernachlässigbar klein; es handelt sich um wenige Schrauben und Klammern.

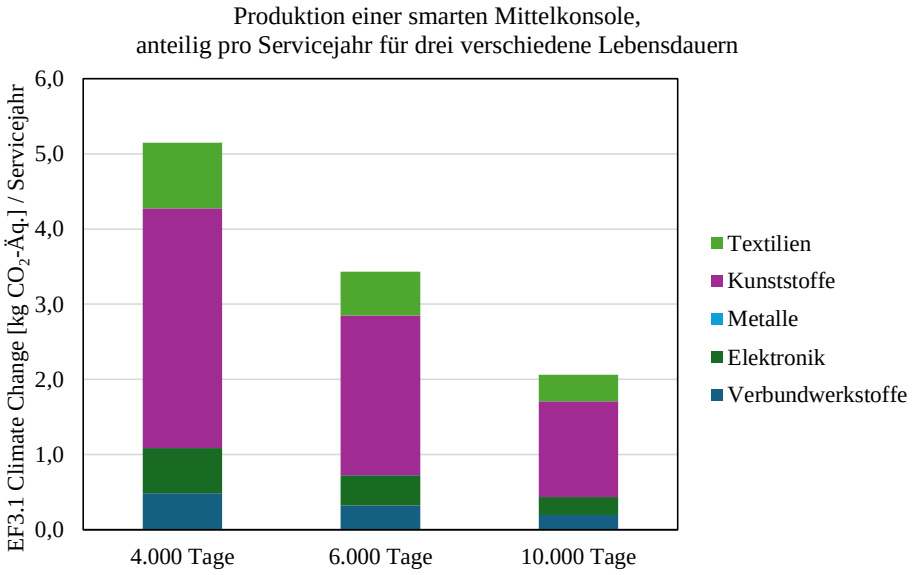


Abbildung 109: LCA-Ergebnisse für „EF 3.1 Climate Change“ in kg CO_2-Äquivalenten für eine Mittelkonsole pro Servicejahr für eine angenommene Serienproduktion der smarten Mittelkonsole für drei verschiedene Lebensdauern aufgeschlüsselt nach Materialklassen (eigene Darstellung)

Die Analyse aller Lebenszyklusphasen und verschiedener Lebenszykluspfade (inkl. der entsprechenden Kreislaufmaßnahmen) mithilfe des Algorithmus im *CycloP* Tool ergibt das in Abbildung 110 dargestellte Ergebnis für neun mögliche Pfade. Eine Betrachtung der Anteile jeder Lebenszyklusphase am Gesamtergebnis in Abbildung 111 zeigt, welchen Anteil potenzielle Kreislaufmaßnahmen am Ergebnis haben können.

Während Produktion und Nutzung der Mittelkonsole für alle Pfade ungefähr denselben Einfluss haben, zeigen sich die Unterschiede in den Einsparpotenzialen durch unterschiedliche Repair, Remanufacturing und Recyclingmaßnahmen. In Summe kann der CO_2-Fußabdruck durch Maßnahmen während und am Ende des Produktlebenszyklus in diesem Beispiel auf bis zu 1,8 kg CO_2-Äquivalente für eine Mittelkonsole pro Servicejahr gesenkt werden (z. B. in den Pfaden 7, 8 und 9).

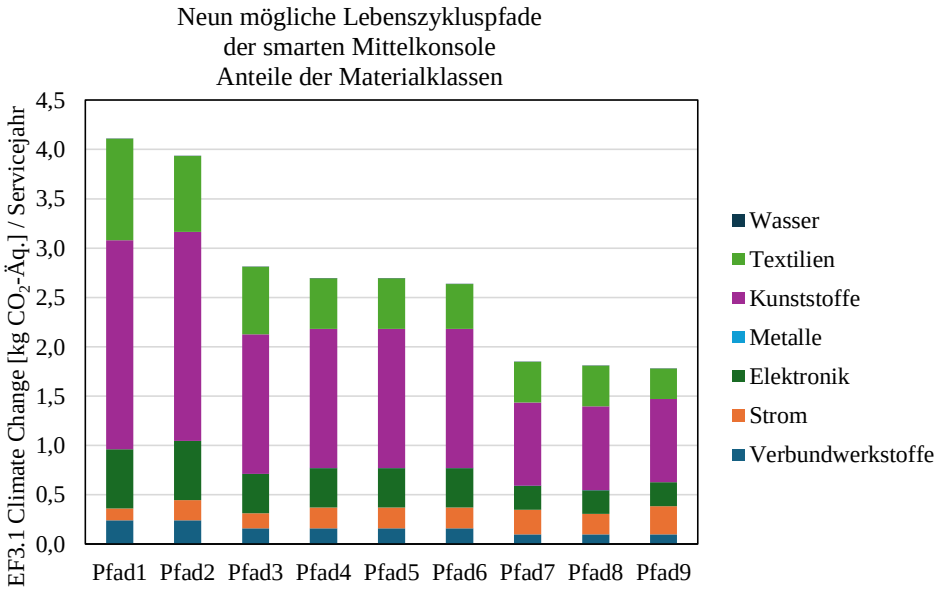


Abbildung 110: LCA-Ergebnisse für „EF 3.1 Climate Change“ in kg CO_2-Äquivalenten für eine Mittelkonsole pro Servicejahr für neun mögliche Lebenszykluspfade der smarten Mittelkonsole aufgeschlüsselt nach Materialklassen (eigene Darstellung)

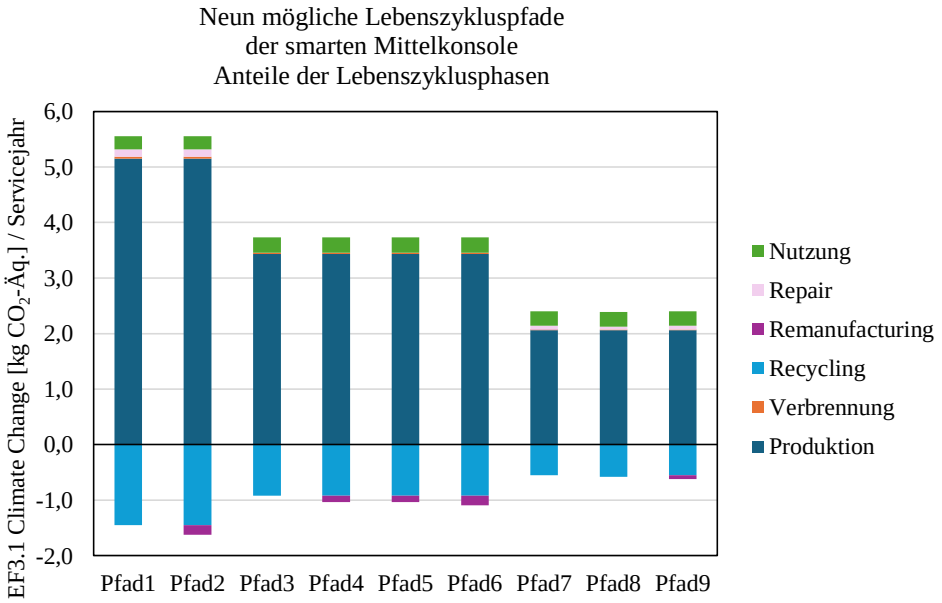


Abbildung 111: LCA-Ergebnisse für „EF 3.1 Climate Change“ in kg CO_2-Äquivalenten für eine Mittelkonsole pro Servicejahr für neun mögliche Lebenszykluspfade der smarten Mittelkonsole aufgeschlüsselt nach Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung)

Bei den Pfaden 1, 3, 7 und 8 werden keine Remanufacturing Maßnahmen im Lebenszyklus durchlaufen. Bei den Pfaden 2, 4, 5, 6 und 9 werden jeweils Remanufacturing Maßnahmen berücksichtigt. Das Remanufacturing führt in Summe zu Materialeinsparungen für unser betrachtetes Produktsystem, die hier als Gutschriften berücksichtigt werden und im vorliegenden Beispiel den Aufwand der Maßnahmen überwiegen, sodass der Einfluss von Remanufacturing hier insgesamt reduzierend auf den CO_2-Fußabdruck wirkt. Ebenfalls werden beim Recycling von Bauteilen am Lebensende Gutschriften gegeben, die den Aufwand in

Summe überwiegen, sodass sich hier für alle Pfade ein deutliches Einsparpotenzial verzeichnen lässt. Da aufgrund fehlender Hintergrunddaten auf Seite der LCA allerdings nicht für alle Recyclingmaßnahmen der Aufwand mitberücksichtigt werden konnte, sollte die Höhe der Einsparpotenziale vorsichtig interpretiert werden. Am Lebensende werden für alle Pfade auch Bauteile der thermischen Verwertung (= Verbrennung) zugeführt, sodass hier sowohl Emissionen entstehen („Impacts“) die den CO_2-Fußabdruck erhöhen, jedoch auch Gutschriften für zurückgewonnenen Energie in Form von Strom und Dampf gegeben werden können. In Summe ergibt sich in diesem Beispiel ein nahezu ausgleichender Effekt, weshalb der Einfluss der Verbrennung in Abbildung 111 nur schwer erkennen lässt (dünne orange Linie).

Für die smarte Mittelkonsole kann so in der Demonstration ein erstes Ergebnis gezeigt und analysiert werden. Es wurde gezeigt, dass Auswirkungen der Anwendung von Kreislaufmaßnahmen wie Repair, Recycling und Remanufacture auf die ökologische Nachhaltigkeit konkret identifiziert und quantifiziert werden können, um fundierte Entscheidungen zu treffen. In der Zukunft können hier weitergehende Analysen mehr Richtungssicherheit für den Designprozess im Hinblick auf zirkuläre Strategien liefern.

4.6.4.2 Ergebnisse für die Referenzmittelkonsole und zirkuläre Strategien

Die Modellierung der vier verschiedenen Strategien für die Referenzmittelkonsole erlauben eine Auswertung von unterschiedlichen deterministischen Pfaden. Je nachdem wie viele Optionen eine Strategie für mögliche Lebenszykluspfade konkreter Produktinstanzen definiert und wie viele unterschiedliche Pfade mit einer relevanten Wahrscheinlichkeit daraus beim Sampling resultieren (auf Basis der angelegten Lebenszyklusphasen und Kreislaufmaßnahmen), ist die Auswertung von mehr oder weniger deterministischen Pfaden möglich und sinnvoll (vgl Kapitel 3.4). Für die detailliert modellierte „Circular“ Strategie werden z. B. 26 deterministische Lebenszykluspfade ausgewertet, für „Circular Sustainable“ 6 Pfade sowie für „Linear“ und „Linear Sustainable“ jeweils drei Pfade. Die Pfade enthalten unterschiedliche Lebenszyklusphasen und Maßnahmen, z. B. Reparatur von Teilkomponenten inkl. Aufwand und dadurch längerer Lebensdauer. Diese dienen als plakative Beispiele für die Demonstration der Toolentwicklung und als Referenz für einen Vergleich mit der smarten Mittelkonsole.

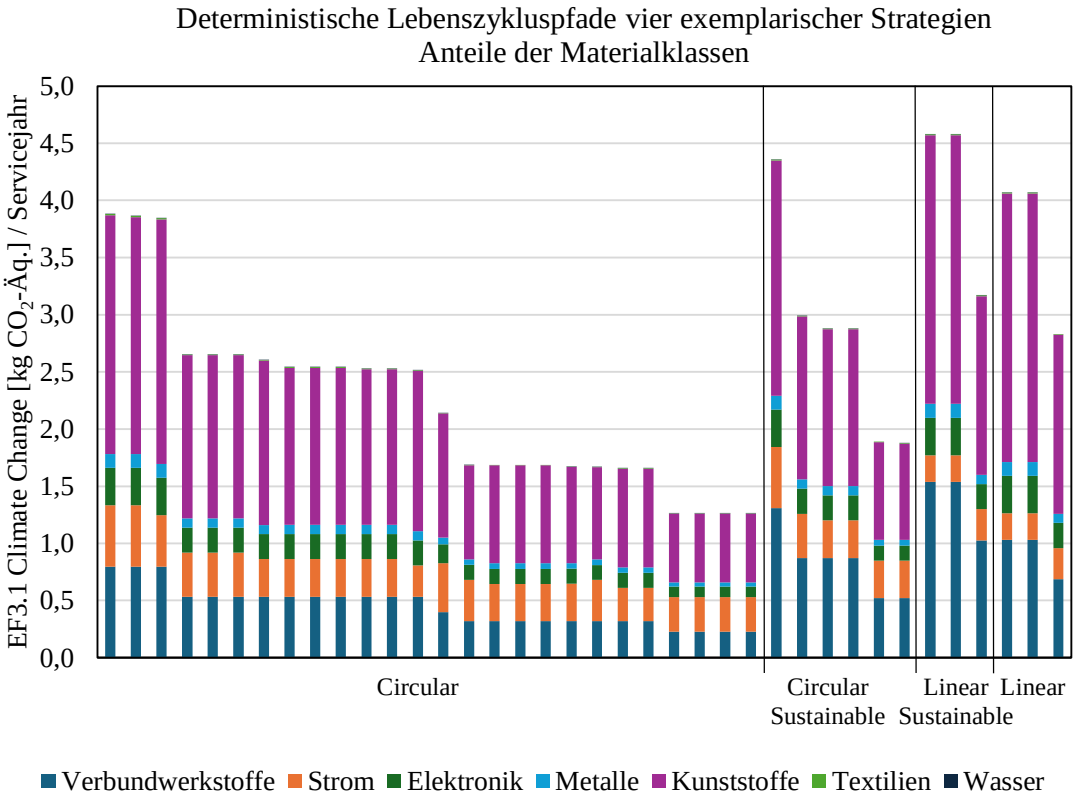


Abbildung 112: LCA-Ergebnisse für „EF 3.1 Climate Change“ in kg CO_2-Äquivalenten für eine smarte Mittelkonsole pro Servicejahr für mögliche Lebenszykluspfade vier exemplarischer zirkulärer Strategien der Referenzkonsole aufgeschlüsselt nach Materialklassen (eigene Darstellung)

Die Ergebnisse dieser exemplarischen Auswertung sind in Abbildung 112 für den Indikator EF 3.1 Climate Change pro funktionelle Einheit für alle vier Strategien und die ausgewerteten deterministischen Pfade dargestellt mit ihren Anteilen in den jeweiligen Materialklassen über alle Lebenszyklusphasen. Abbildung 113 stellt diese Ergebnisse aufgeteilt in den Einfluss der jeweiligen Lebenszyklusphasen dar. Es ist erkennbar, dass hier deutliche Unterschiede in den verschiedenen Pfaden sichtbar werden. Die Ergebnisse liegen in einer Bandbreite von 1,3 bis 4,6 kg CO_2-Äquivalente pro Servicejahr. Die Unterschiede liegen in der detaillierteren Modellierung begründet, die zu variantenreicheren Pfaden führt. Zusätzlich ergeben sich hier im Gegensatz zur smarten Mittelkonsole andere Lebensdauern für die einzelnen Produktinstanzen und deren deterministische Lebenszykluspfade, sodass das Ergebnis pro Servicejahr mehr Varianz aufweist. Diese Lebensdauern variieren zwischen 4.000 und 14.000 Tagen. Bei der Ableitung von Maßnahmen auf Basis der Ergebnisse im Kontext von *CycloP* ist immer zu beachten, dass die unterschiedlichen Pfade unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten aufweisen, die bei der Interpretation berücksichtigt werden müssen. Die Wahrscheinlichkeiten sind an dieser Stelle nicht mit dargestellt, da sie aktuell keine belastbaren Werte darstellen. Dies begründet sich darin, dass die modellierten Lebenszyklen fiktiv sind und somit auch die resultierenden Wahrscheinlichkeiten einzelner Pfade nicht aussagekräftig sind.

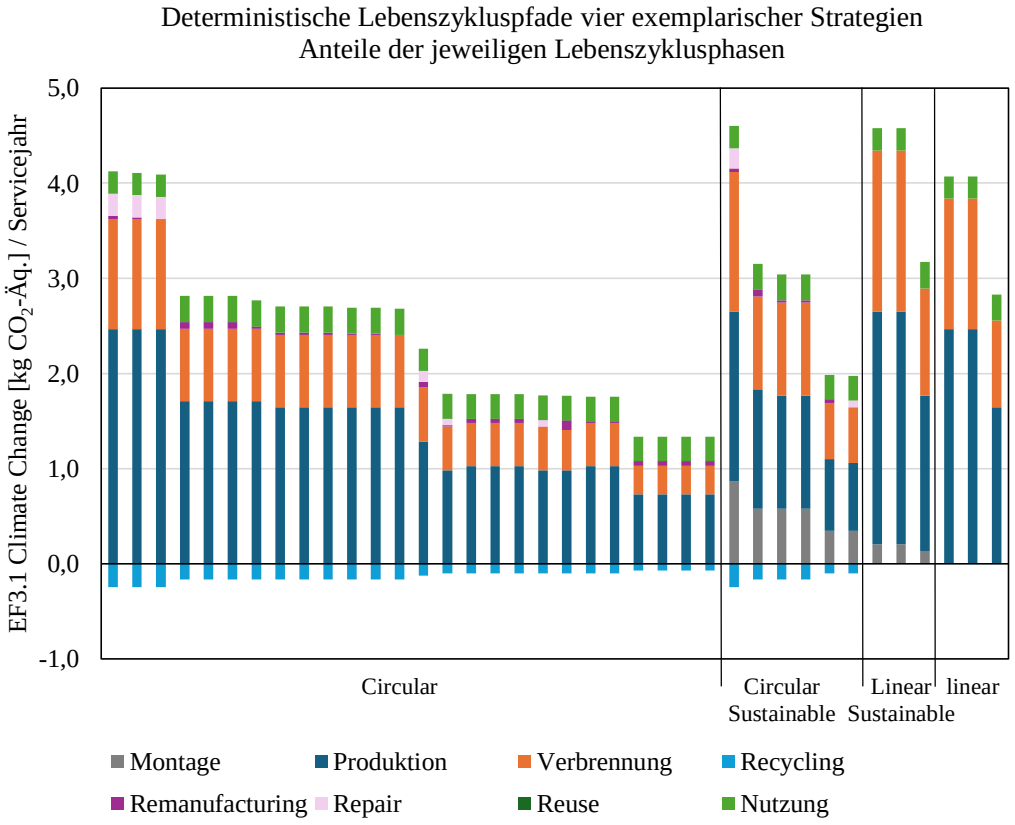


Abbildung 113: LCA-Ergebnisse für „EF 3.1 Climate Change“ in kg CO_2-Äquivalenten für eine Mittelkonsole pro Servicejahr für mögliche Lebenszykluspfade vier exemplarischer zirkulärer Strategien der Referenzkonsole aufgeschlüsselt nach Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung)

4.6.4.3 Vergleich der smarten Mittelkonsole mit der Referenzkonsole

Die ökobilanzielle Bewertung offenbart einige Vergleichspunkte der smarten Mittelkonsole mit der konventionellen Referenzkonsole, wobei jedoch die verschiedenen Unsicherheiten die Aussagekraft der Ergebnisse einschränken. Diese müssen bei einer Interpretation und der Ableitung von Handlungsempfehlungen berücksichtigt werden.

Über den modellierten Lebenszyklus der smarten Mittelkonsole ergibt sich eine Bandbreite von 1,8 bis 4,1 kg CO_2-Äquivalente für eine Mittelkonsole pro Servicejahr. Im Vergleich dazu fällt die Bandbreite der Lebenszykluspfade der Referenzkonsole ähnlich aus. Sie variiert je nach Lebenszykluspfad zwischen 1,5 und 4,5 kg CO_2-Äquivalenten für eine Mittelkonsole pro Servicejahr. Das Potenzial zirkulärer Ansätze, die für die Referenz etwas detaillierter modelliert werden konnten als für den Demonstrator, wird in beiden Analysen deutlich sichtbar. Durch gezielte Kreislaufmaßnahmen, insbesondere innerhalb der „Circular“-Strategie kann eine deutliche Reduktion der Umweltauswirkungen erzielt werden. Die Erkenntnisse aus der Modellierung der Referenzkonsole können in Zukunft weiter auf die smarte Mittelkonsole und andere Produkte übertragen werden. Zudem weist die im Projekt entwickelte smarte Mittelkonsole eine vergleichsweise vorteilhafte Bilanz in der Materialauswahl auf, sodass hier bereits erste Potenziale erschlossen werden konnten. Auch hier können die mit dem LCA-Modul im Kontext von *CycloP* gewonnenen Erkenntnisse zu weiteren Designverbesserungen und vorteilhafter Gestaltung des Lebenszyklus beitragen.

Es ist notwendig, Hotspots und Verbesserungspotenziale systematisch und möglichst früh zu identifizieren, insbesondere im Hinblick auf Materialauswahl und zirkuläre Strategien. Die hier durchgeführte Bewertung zeigt, dass bereits in frühen Entwicklungsphasen quantifiziert werden kann, welche Materialauswahl und welche Kreislaufstrategien statistisch einen Mehrwert bieten können. Mittels dieser Quantifizierung von Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit des Produktes können gezielt Gestaltungsanforderungen abgeleitet werden und der Entwicklungsprozess wird fundiert und transparent unterstützt. Darüber hinaus erfordert die Diskussion von Unsicherheiten in der Datenqualität und den zugrunde liegenden Annahmen eine sorgfältige Betrachtung, um die Ergebnisse adäquat zu interpretieren.

4.6.5 Fazit der ökobilanziellen Bewertung der Mittelkonsole

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die ökobilanzielle Bewertung der Mittelkonsole durch das LCA-Modul im Kontext der *CycloP* Softwarearchitektur erfolgreich demonstriert wurde. Der Berechnungsalgorithmus funktioniert in der aktuellen Version zuverlässig, was bereits eine fundierte Bewertung der Umweltauswirkungen ermöglicht. Die Ergebnisse belegen, dass konkrete Maßnahmen zur Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit ableitbar sind, insbesondere durch die Implementierung zirkulärer Strategien.

Die durchgeführte Analyse der LCA-Datenqualität zeigt auf, dass diese für die Validität der Ergebnisse von zentraler Bedeutung ist. Gleichzeitig muss auch die Inventarliste des zu entwickelnden Produkts realistische und belastbare Einträge beinhalten, um relevante Hinweise für die frühe Produktentwicklung geben zu können (vgl. Kapitel 3.4.4). Für die Zukunft ist demnach eine verlässliche Datengrundlage auf beiden Seiten (Lebenszyklusinventar und LCA-Datenbasis) entscheidend, um die Ergebnisse weiter zu verfeinern und zu validieren. Zudem können durch eine detailliertere Modellierung der zirkulären Strategien, basierend auf realen Beispielen, zusätzlich relevante Aussagen getroffen werden. Diese Entwicklungen unterstützen die Integration ökologischer Aspekte in den (sehr frühen) Produktentwicklungsprozess und bieten eine robuste Basis für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in der Automobilindustrie.

Literatur

1. DIN EN ISO 14040 (2021) Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-iso-14040/325953744
2. DIN EN ISO 14044 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen. https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-iso-14044/325953813
3. (2021) COMMISSION RECOMMENDATION (EU) 2021/2279 of 15 December 2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations
4. European Commission (2021) Recommendation on the use of Environmental Footprint methods. https://environment.ec.europa.eu/publications/recommendation-use-environmental-footprint-methods_en. Accessed 25 Apr 2024

4.7 Industrieller Transfer

Autor:in: Fabian Edel; Franziska Braun

Der industrielle Transfer ist nicht nur wichtig für die wirtschaftliche Verwertung von Forschungsergebnissen, sondern auch für die nachhaltige Entwicklung von Technologien und Prozessen. Durch die enge Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie kann die Wissenschaft sicherstellen, dass die Arbeiten den tatsächlichen Bedürfnissen des Marktes entsprechen. Insbesondere durch die hohe Komplexität innerhalb dieses Vorhabens ist der industrielle Transfer extrem wichtig, da dadurch eine direkte Rückmeldung von der Industrie in das Projekt erfolgen kann. Damit wird die Praxisnähe und Umsetzbarkeit auf einem hohen Level gehalten, das vor allem im Bereich der Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft von Bedeutung ist, da derzeit die Diskrepanz zwischen wissenschaftlichen Ansätzen und industriellen Umsetzungen hoch ist.

Der industrielle Transfer folgt in der Regel mehreren Schritten:

(1) **Forschung und Entwicklung (FuE)**: Wissenschaftler entwickeln neue Technologien, Produkte oder Prozesse im Rahmen von Forschungsprojekten.
(2) **Prototypenbau**: Erstellung von Prototypen oder Modellen, um die Konzepte zu testen und zu verfeinern.
(3) **Kooperation mit der Industrie**: Aufbau von Partnerschaften mit Unternehmen, um die Forschungsergebnisse zu validieren und zur Marktreife zu bringen.
(4) **Technologieübertragung**: Übertragung des Wissens und der Technologien an die Industrie, oft durch Lizenzen oder Joint Ventures
(5) **Schulungen und Workshops**: Durchführung von Schulungen für das industrielle Personal, um die Implementierung der neuen Technologien zu unterstützen.
(6) **Pilotprojekte**: Implementierung von Pilotprojekten in der Industrie, um die Anwendung in der Praxis zu testen.
(7) **Evaluation und Anpassung**: Bewertung der Ergebnisse und Anpassung der Technologien oder Prozesse basierend auf dem Feedback der Industrie

In Fall CYCLOMETRIC wurde vom Standard-Vorgehen abgewichen, da bereits im Forschungsprojekt (Regel 1) die Kooperation mit der Industrie (Regel 3) erfolgte. Dies wurde gemacht, um von Beginn an praxisnah zu entwickeln und die Kürzung erfolgt, da eine finale Integration in der Industrie nicht im Fokus stand. Für den industriellen Transfer wurden daher folgende Schritte unternommen:

(1) **Forschung und Entwicklung (FuE) in Kooperation mit der Industrie**: Entwicklung neuer Prozesse, Technologien und Designs auf Grundlage des Status Quos und in Kooperation industrieller Anwender

(2) **Prototypenbau in Kooperation mit der Industrie**: Erstellung von digitalen und physischen Prototypen oder Modellen, um die entwickelten Prozesse, Technologien und Designs zu testen und zu verfeinern. (siehe Kapitel 4.7.2)
(3) **Überprüfung der Technologieakzeptanz in der Industrie**: Übertragung des gewonnenen Wissens und der Prozesse, Technologien bzw. Designs an die Industrie, um die potenzielle Akzeptanz abzuschätzen.

4.7.1 Forschung und Entwicklung (FuE) in Kooperation mit der Industrie

Die Entwicklung der neuen Prozesse, Technologien und Designs von *CycloP* basiert im Grund auf dem Status Quo der Branche bezüglich Circular Economy Assesments. Dafür wird zwischen den Bereichen des Status Quo in der Kreislaufwirtschaft und in der Automobilentwicklung unterschieden.

Bei der Analyse des Status Quo der Kreislaufwirtschaft sind zwei Bereiche von besonderer Bedeutung. Der erste Bereich ist sind die **frühen Phasen bzw. das Fuzzy Front End** des Entwicklungs- bzw. Innovationsprozesses. Dieser hat insbesondere große Bedeutung, da hier erste wichtige Entscheidungen über das zukünftige Produkt getroffen werden. Insbesondere bei einer ganzheitlichen Berücksichtigung von Kreislaufstrategien ist es enorm, wichtig diese bereits in der frühen Phase zu berücksichtigen. Das zeigen die Standardwerke aus dem Ingenieurswesen wie Pahl/Beitz [1], Gassmann [2, 3], Lindemann [4], Muschnik [5], sowie Literatur über Business Model Innovation von Pieroni [6], Aagaard [7] und Gassmann [8].

Die Haupterkenntnis der Ermittlung des Status Quos zu den frühen Phasen liegt darin, dass das CYCLOMETRIC Tool bis in die frühe Phase reichen muss, da hier bereits Entscheidungen getroffen werden, die die Produktentwicklung beeinflussen und letztlich auch kreislaufwirtschaftliche Auswirkungen mit sich tragen.

Der zweite wesentliche Bereich ist der Status Quo der **Kreislaufwirtschaft** und der **Kreislaufstrategien.** Kapitel 2 zeigt hier bereits einige Darstellungen zu den Grundlagen der Kreislaufwirtschaft. Beim Ermitteln des Status Quos in Bezug auf Kreislaufwirtschaft ist unweigerlich das Circular-Economy-Modell der Ellen MacArthur Foundation [9] eine beliebte Grundlage. Dies zeigt das Kreislaufprinzip, unterteilt in den biologischen und den technischen Kreislauf.

Insbesondere der technische Kreislauf zeigt diverse Kreislaufstrategien, wie Produkte innerhalb des Lebenszyklus im Kreislauf gehalten werden können. Dazu gehören vor allem Recycling, Refurbishment, Remanufacture, Reuse, Redistribute, Sharing und Maintainance. Das Hauptziel des Modells nach Ellen MacArthur ist die Minimierung des Schwundes an Rohstoffen durch Müll bzw. Energierückgewinnung durch Verbrennung.

Potting et al. [10] zeigt einerseits durch die sogenannten R-Strategien unterschiedliche Kreislaufstrategien, die Ansteigend von der linearen Wirtschaft hin zur Kreislaufwirtshaft eingestuft werden. Zudem nehmen Potting et al. [10] die Einstufung der R-Strategien zu den „Innovationen in der Kerntechnologie“, die „Innovationen im Produktdesign“, die

„Innovationen im Ertragsmodell“ und den „sozio-institutioneller Wandel“ auf. Dabei lassen sich drei wesentliche Arten des Übergangs zur Kreislaufwirtschaft zusammenfassen:

(1) Der Übergang zur Kreislaufwirtschaft, bei dem die spezifische, radikal neue Technologie im Mittelpunkt steht und diesen Übergang prägt.
(2) Der Übergang zur Kreislaufwirtschaft, bei dem der sozio-institutionelle Wandel im Mittelpunkt steht und die technologische Innovation eine untergeordnete Rolle spielt (inkrementelle Innovation in der Kerntechnologie)
(3) Der Übergang zur Kreislaufwirtschaft, bei dem der sozio-institutionelle Wandel im Mittelpunkt steht, dieser jedoch durch die technologischen Möglichkeiten erleichtert wird.

Die R-Strategien bilden eine Basis für viele Weiterentwicklungen von Kreislaufstrategien. Im Rahmen von CYCLOMETRIC sind die R-Strategien nach Potting et al. ebenfalls verwendet worden, um diese anzupassen bzw. zu erweitern und um im Projektkontext eine Grundlage für die Überlegungen sowie die Entwicklung des Tools zu schaffen. Die R-Strategien werden in diesem Zuge in C-Strategien umgewandelt/umbenannt, da einerseits die R-Strategien erweitert wurden und andererseits eine Verwechslung der Darstellungen vermieden. Zudem zeigen die C-Strategien eine veränderte Zählrichtung. Zu den Ausführungen nach Potting et al [10] sind die C-Strategien „C_{10} Entmaterialisierung“ und „C_{11} Digitalisierung“ ergänzt [11, 12]. Somit besteht eine finale Übersicht aller C-Strategien (siehe Abbildung 114) [13].

Entmaterialisierung und digitale Produktnutzung	C_{11}	Digitalize	De-Zirkulation desselben und gleicher Produkte	Übertragung der Funktionalität physischer Produkte in eine gleichwertige, digitale Dienstleistung
	C_{10}	Dematerialize	De-Zirkulation desselben Produkts	Substitution von Produkten durch ein bestehendes, anderes Produkt mit gleichwertiger Funktionalität
Nachhaltigere Nutzung oder Herstellung des Produkts	C_9	Refuse	De-Zirkulation von Teilen desselben Produkts	Umgestaltung des Produkts durch Aufgabe seiner Funktion oder durch Angebot der gleichen Funktion mit einem radikal anderen Produkt
	C_8	Rethink	De-Zirkulation von gleichen oder andersartigen Produkten	Intensivierung der Produktnutzung (z. B. durch gemeinsame Nutzung von Produkten oder durch die Vermarktung von Multifunktionsprodukten)
	C_7	Reduce	De-Zirkulation von Rohstoffen	Steigerung der Effizienz in allen Lebenszyklusphasen durch geringeren Verbrauch von natürlichen Ressourcen und Materialien
Verlängerte Lebensdauer des ursprünglichen Produkts und seiner Teile	C_6	Re-use	Zirkulation als selbes, unverändertes Produkt	Wiederverwendung eines ausrangierten Produkts, das noch in gutem Zustand ist und seine ursprüngliche Funktion erfüllt, durch einen anderen Verbraucher
	C_5	Repair	Zirkulation als selbes, verändertes Produkt	Reparatur und Wartung defekter Produkte, so dass sie wieder mit ihrer ursprünglichen Funktion verwendet werden können
	C_4	Refurbish	Zirkulation als gleiches, verbessertes Produkt	Ein altes Produkt wiederherstellen und es auf den neuesten Stand bringen
Verlängerte Lebensdauer von Produktkompo-nenten oder anderen Produkten	C_3	Remanufacture	Re-Zirkulation mit gleicher Funktion in andersartigem Produkt	Verwendung von Teilen eines ausrangierten Produkts in einem neuen Produkt mit der gleichen Funktion
	C_2	Repurpose	Re-Zirkulation mit neuer Funktion in andersartigem Produkt	Verwendung ausrangierter Produkte oder ihrer Teile in einem neuen Produkt mit anderer Funktion
Rückgewinnung von Material und/oder Energie	C_1	Recycle	Re-Zirkulation als Rohmaterial	Verarbeitung von Materialien, um die gleiche (hochwertige) oder eine niedrigere (minderwertige) Qualität zu erhalten
	C_0	Recover	Re-Zirkulation als Energie	Verbrennung von Materialien mit Energierückgewinnung

Abbildung 114: C-Strategien aus dem Projekt CYCLOMETRIC (in Anlehnung an [14, 15])

Abhängig von den entwickelten C- bzw. Kreislaufstrategien kann ein dreidimensionaler Betrachtungsraum entwickelt werden, der die kreislaufstrategische Ausrichtung der Wertschöpfungskette und die gesamtheitliche Entwicklung in Abstufungen beinhaltet (Abbildung 115). Die erste Dimension stellt die C-Strategien dar. Die zweite Dimension stellt die Konfiguration der kreislaufstrategischen Wertschöpfungskette dar. Diese ist unterteilt in „nicht vorhanden, gestaltet, gesteuert und kontrolliert“. Hier sind vor allem Beziehungen zu Zulieferer etc. berücksichtigt. Die dritte Dimension stellt die gesamtheitliche Entwicklung dar. Diese ist aufsteigend unterteilt in „Komponente, Baugruppe/Module, Produkt, Produkt/Service-

System, Geschäftsmodell, Unternehmensstrategie“. Dabei wird dargestellt, in welcher Ebene der gesamtheitlichen Entwicklung die Kreislaufziele angewendet werden.

Ziel der Aufstellung dieser Betrachtungsdimensionen ist es, die Übersicht bei der Anwendung von Kreislaufstrategien zu vereinfachen, indem ein Kreislaufziel in Kombination mit der Höhe der gesamtheitlichen Entwicklung und den dazu abhängigen Angaben über kreislaufstrategische Wertschöpfung gemacht wird. Dies soll dabei helfen, einen geordneten Überblick über gegenseitige Abhängigkeiten zu erlangen.

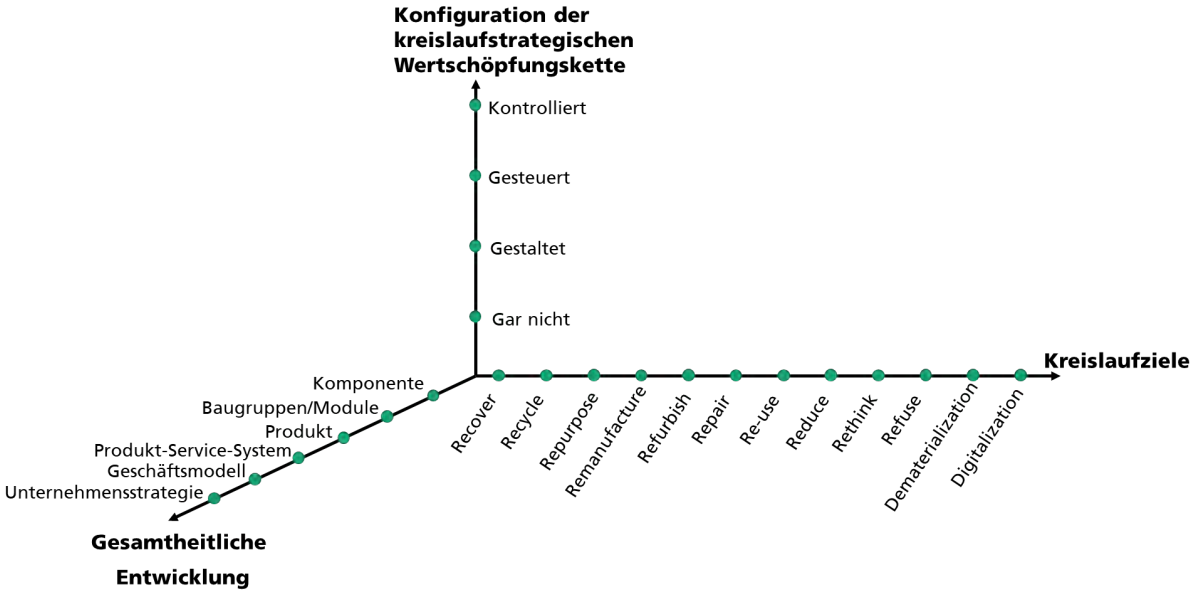


Abbildung 115: Darstellung der Betrachtungsdimensionen

Status Quo in der Automobilentwicklung

Die im Status Quo betrachtete Automobilindustrie (Automobilhersteller und namhafte Zulieferer) hat sich mit dem Thema der Kreislaufwirtschaft auseinandergesetzt und integriert diese zunehmend in ihre bestehenden Prozesse und Organisationen. Die Aktivitäten erfolgen vorwiegend durch spezifische Projekte, die verschiedene Kreislaufstrategien verfolgen, um Ressourcen effizient zu nutzen, Abfall zu minimieren und die Umwelt zu schonen.

Ein zentraler Ansatz ist das **Remanufacturing**, bei dem die verschlissenen oder defekte Teile nach OEM-Spezifikationen wiederhergestellt werden. Diese Strategie gewährleistet, dass die Teile die gleiche Leistung und Garantie wie Neuteile bieten und trägt zur Reduzierung von Abfällen bei. Eng damit verbunden ist die **Repair-Strategie**, die es ermöglicht, beschädigte Teile zu reparieren und in das Fahrzeug zurückzuführen. Dies verlängert die Lebensdauer der Komponenten und reduziert den Bedarf an neuen Materialien.

Die **Reuse-Strategie** fördert die Wiederverwendung von Originalteilen, die aus Altfahrzeugen zurückgewonnen werden. Diese Teile können unverändert für andere Fahrzeuge verwendet werden, wodurch der Ressourcenverbrauch weiter gesenkt wird. Wenn Teile nicht mehr für eine Wiederverwendung geeignet sind, kommen sie in den **Recycle-Prozess**, bei dem Materialien aus Produktionsabfällen und nicht mehr verwendbaren Teilen zurückgewonnen werden, um sie in den Produktionskreislauf zurückzuführen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die **kontrollierte Rücknahme** von Fahrzeugen, die sicherstellt, dass diese an anerkannten Rücknahmestellen abgegeben werden. Diese Stellen garantieren eine ordnungsgemäße Verwertung und die Rückführung wertvoller Rohstoffe in die Produktion. Darüber hinaus wird zunehmend auf den Einsatz von **nachhaltigen Rohstoffen** geachtet, insbesondere bei der Verwendung von Rezyklaten und nachwachsenden Materialien in der Fahrzeugproduktion.

Die Automobilhersteller setzen auch auf innovative Konzepte wie das **Batterierecycling**, um wertvolle Materialien aus Altbatterien zurückzugewinnen. Hierbei werden Partnerschaften mit Recyclingunternehmen eingegangen, um die Rückgewinnung von Rohstoffen wie Lithium, Nickel und Kobalt zu optimieren.

Ein weiterer zentraler Aspekt der Kreislaufwirtschaft ist das Prinzip **Reduce, Reuse, Recycle (3R-Prinzip)**, das darauf abzielt, den Einsatz von Primärmaterialien zu minimieren. Durch effiziente Nutzung von Ressourcen, die industrielle Aufbereitung gebrauchter Teile und die Vermeidung von Downcycling wird angestrebt, Materialien ohne Qualitätsverlust in den Produktionsprozess zurückzuführen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Automobilindustrie in Deutschland einen systematischen Ansatz zur Implementierung von Kreislaufstrategien verfolgt. Diese Strategien zielen darauf ab, den Ressourcenverbrauch zu minimieren, Abfälle zu reduzieren und die Umweltbelastung zu verringern, während gleichzeitig die wirtschaftliche Effizienz gesteigert wird. Die Integration dieser Ansätze in die Produktentwicklung, Produktion und den gesamten Lebenszyklus von Fahrzeugen stellt einen wichtigen Schritt in Richtung einer nachhaltigen Zukunft dar. Allerdings werden die Kreislaufstrategien bei den Automobilherstellern oft sehr separiert, vereinzelt oder nicht ganzheitlich angewendet. [16–26].

4.7.2 Prototypenbau in Kooperation mit der Industrie

Der Prototypenbau ist ein entscheidender Schritt im Entwicklungsprozess, insbesondere beim industriellen Transfer von Technologien. Die Hauptziele des Prototypenbaus sind die Validierung der Konzepte, die Fehleridentifikation und das Sammeln von Feedback. Es gibt verschiedene Arten von Prototypen: Low-Fidelity-Prototypen, die einfache Modelle aus kostengünstigen Materialien wie Papier oder Karton darstellen, und High-Fidelity-Prototypen, die detaillierte und funktionsfähige Modelle sind und dem endgültigen Produkt sehr nahekommen. Zudem gibt es virtuelle Prototypen, die in Software erstellt werden, um Design und Funktionalität zu testen.

Der Prozess des Prototypenbaus umfasst mehrere Schritte: Zunächst erfolgt die Konzeption, bei der Ideen und Skizzen entwickelt werden. Anschließend wird die Materialauswahl getroffen, gefolgt vom eigentlichen Bau des Prototyps, der oft in mehreren Iterationen durchgeführt wird. Nach dem Bau werden Tests durchgeführt, um die Leistung und Funktionalität zu bewerten, gefolgt von Anpassungen basierend auf den Testergebnissen und dem Feedback.

Für den Prototypenbau kommen verschiedene Werkzeuge und Technologien zum Einsatz, wie CAD-Software zur Erstellung digitaler Entwürfe, 3D-Drucker für den schnellen und kostengünstigen Bau von Prototypen sowie CNC-Maschinen für die präzise Bearbeitung von Materialien. Allerdings gibt es auch Herausforderungen, wie die hohen Kosten, insbesondere bei High-Fidelity-Prototypen, der zeitaufwendige Prozess, der mehrere Iterationen erfordern kann, und der Zugang zu spezialisierten Materialien und Technologien.

4.7.3 Überprüfung der Technologieakzeptanz in der Industrie

Um die Akzeptanz von *CycloP* zu ermitteln, werden Expertenmeinungen aufgenommen, um Vor- bzw. Nachteile sowie Einsatzpotenziale des Tools bei automobilen Entscheidungsträgern und Fachabteilungen zu analysieren. Die Experten geben gegenüber dem *CycloP*-Tool folgende Meinung:

Potenzial: In der Automobilindustrie gibt es großes Potenzial zur Verbesserung der Nachhaltigkeit durch die Unterstützung der Entwickler:innen in ihrem täglichen Arbeitsumfeld mittels des entwickelten Tools, vor allem bei (wichtigen) Entscheidungen. Theoretische Konzepte zur Kreislauffähigkeit können in der Praxis durch das Tool überprüft werden, was besonders in den Bereichen Gestaltung und Design, Bauteilentwicklung sowie Nachhaltigkeitsbewertung von Bedeutung ist. Zudem kann die *CycloP* dazu beitragen, Prozesse nachhaltiger und ressourcenschonender zu gestalten. Das Tool bietet eine effiziente und kostenoptimierte Entwicklung kreislauffähiger Produkte durch qualifizierte Mitarbeiter:innen, die in der Lage sind, die komplexen Herausforderungen der Nachhaltigkeit zu bewältigen. Ein weiterer Aspekt ist die Notwendigkeit, bestehende Prozesse in der Produktentstehung zu überarbeiten, um ein umfassendes Verständnis und eine erfolgreiche Integration der Kreislaufwirtschaft zu gewährleisten.

Vorteile: Die Einführung von Kreislaufwirtschaftsprinzipien durch das Tool ermöglicht eine vergleichbare und messbare Bewertung von Nachhaltigkeit und Kreislauffähigkeit. Dies schafft eine solide Entscheidungsgrundlage, die unabhängig von den Fähigkeiten und dem Kenntnisstand der Mitarbeiter:innen ist. Die Nutzung quantifizierbarer Daten verbessert die Entscheidungsfindung, während die Simulation der Auswirkungen von Designentscheidungen in der Entwicklung zu einer Effizienzsteigerung führt. Auch die Qualifizierung der Mitarbeiter:innen im Bereich Nachhaltigkeit spielt eine wichtige Rolle, da sie das Bewusstsein und die Fähigkeiten zur Umsetzung von Kreislaufstrategien stärkt.

Nachteile: Dennoch gibt es Herausforderungen, insbesondere die wahrgenommene Komplexität der eingesetzten Tools und Methoden, die zu einer Scheu oder Ablehnung führen können. Diese Komplexität könnte die tatsächliche Nutzung und damit die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft behindern. Zudem gibt es einen hohen Bedarf an qualitativ hochwertigen Daten, was die Implementierung in der täglichen Praxis erschwert. Auch die Mitarbeitendenmotivation kann ein kritischer Punkt sein, da ohne ausreichendes Engagement der Mitarbeiter:innen die Initiativen zur Kreislaufwirtschaft nicht erfolgreich sein können.

Kernaussage: Insgesamt zeigt sich, dass *CycloP* in der Automobilindustrie ein großes Potenzial bietet, insbesondere als Entscheidungsunterstützung für Entwickler:innen und als wertvolles Hilfsmittel für das Management. Gleichzeitig müssen jedoch die Herausforderungen, insbesondere die Komplexität der Tools und die Notwendigkeit einer hohen Datenqualität, adressiert werden, um eine effektive Implementierung und Akzeptanz der Kreislaufstrategien und somit des Tools zu gewährleisten. Die erfolgreiche Gestaltung von Produkten, die einfach demontierbar, reparierbar, wiederverwendbar und recyclebar sind, ist entscheidend für die Zukunft der Branche. In dem *CycloP* wird zusätzlich ein hohes Potenzial gesehen, da es einen wichtigen Baustein für eine effektive Kreislaufwirtschaft darstellt, wobei die größte Herausforderung die Demontage von Produkten ist, die künftig einfacher gestaltet werden muss. Insbesondere bei Lithium-Ionen-Batterien ist es entscheidend, dass diese leicht entfernt werden können, um die Reparatur, Wiederverwendung und das Recycling zu erleichtern.

Literatur

1. Bender B, Gericke K (2021) Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, 9. Aufl. 2021. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
2. Schweitzer F, Gassmann O (eds) (2014) Management of the Fuzzy Front End of Innovation. SpringerLink Bücher. Springer International Publishing, Cham
3. Gassmann O, Kobe C (eds) (2006) Management von Innovation und Risiko: Quantensprünge in der Entwicklung erfolgreich managen, Zweite, überarbeitete Auflage. SpringerLink Bücher. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
4. Lindemann U (ed) (2016) Handbuch Produktentwicklung. Hanser, München
5. Muschik S (2011) Development of Systems of Objectives in Early Product Engineering. Entwicklung von Zielsystemen in der frühen Produktentstehung
6. Padua Pieroni M de, McAloone T, Pigosso D (2019) Business Model Innovation for Circular Economy: Integrating Literature and Practice into a Conceptual Process Model. Proc Int Conf Eng Des 1:2517–2526. https://doi.org/10.1017/dsi.2019.258
7. Aagaard A (ed) (2024) Business Model Innovation: Game Changers and Contemporary Issues. Springer Nature, Cham
8. Gassmann O, Frankenberger K, Choudury M (2021) Geschäftsmodelle entwickeln: 55+ innovative Konzepte mit dem St. Galler Business Model Navigator, 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Hanser, München
9. Ellen Macarthur Foundation (2025) What is a circular economy? https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAu8W6BhC-ARIsACEQoD-Dix2SQhPnENwAHKvxbcAoYDT1g8ZiCw3RNNvHlegpLiqSxggV3eD0aAs6FEALw_wcB. Accessed 13 May 2025
10. Potting J, Hekkert M, Worrell E et al. (2025) Circular Economy: Measuring innovation in product chains
11. Kadner S, Kobus J, Hansen E et al. (2024) Circular Economy Roadmap für Deutschland

12. Watson R (2014) Entmaterialisierung. In: Watson R, Schneider R (eds) 50 Schlüsselideen der Zukunft. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, pp 108–111
13. Fesidis B, Röß SA, Rummel S (2023) Mit Digitalisierung und Nachhaltigkeit zum klimaneutralen Unternehmen: Strategische Frameworks und Best-Practice-Beispiele. FOM-Edition. Springer, Wiesbaden, Heidelberg
14. Kadner S, Kobus J, Hansen E et al. (2021) Circular Economy Roadmap für Deutschland, München, London
15. Potting J, Hekkert M, Worrell E et al. (2017) Circular Economy: Measuring innovation in the product chain, The Hague
16. STELLANTIS (2024) Circular Economy Hub Mirafiori. https://www.sustainera-mirafiori-hub.com/. Accessed 12 May 2025
17. Mercedes-Benz Group (2025) Auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft. | Mercedes-Benz Group. https://group.mercedes-benz.com/nachhaltigkeit/ressourcen-kreislaufwirtschaft/recycling/kreislaufwirtschaft.html. Accessed 13 May 2025
18. BMW (2025) BMW Recycling. https://www.bmw.de/content/dam/bmw/marketDE/bmw_de/BMW_Recycling_und_Ruecknahmestellen_Uebersicht_250804.pdf.asset.1754387649708.pdf. Accessed 13 May 2025
19. BMW (2025) Die internationale BMW Website. https://www.bmw.com/de/circular-world/das-neue-leben-eines-bmw.html. Accessed 13 May 2025
20. Volkswagen Group (2023) Kreislaufwirtschaft. https://www.volkswagen-group.com/de/publikationen/weitere/kreislaufwirtschaft-2351. Accessed 13 May 2025
21. Porsche Newsroom (2025) Kreislaufwirtschaft
22. Audi (2025) Circular Economy – Kreislaufwirtschaft bei Audi. https://www.audi.com/de/sustainability/environment-resources/circular-economy/. Accessed 13 May 2025
23. Bosch Global (2025) Forschung zu Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft. https://www.bosch.com/de/forschung/forschungsschwerpunkte/klimaschutz-und-nachhaltigkeit/forschung-zu-ressourceneffizienz-und-kreislaufwirtschaft/. Accessed 13 May 2025
24. Continental AG (2025) Nachhaltigkeit | Zirkuläres Wirtschaften. https://www.continental.com/de/presse/studien-publikationen/technologie-dossiers/nachhaltigkeit/nachhaltigkeit-zirkulaeres-wirtschaften/. Accessed 13 May 2025
25. Continental AG (2025) Reifenkonzept Conti GreenConcept. https://www.continental.com/de/presse/studien-publikationen/technologie-dossiers/nachhaltigkeit/reifenkonzept-conti-greenconcept/. Accessed 13 May 2025
26. ZF (2025) Nachhaltigkeit: Klima und Natur. https://www.zf.com/mobile/de/sustainability/climate_and_nature/climate_and_nature.html. Accessed 13 May 2025

5 Projektpartner

Fraunhofer IAO	Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

Das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO beschäftigt sich mit Fragestellungen rund um den arbeitenden Menschen. Insbesondere unterstützt das Institut Unternehmen dabei, die Potenziale innovativer Organisationsformen sowie zukunftsweisender Technologien zu erkennen. Die Bündelung von Management- und Technologiekompetenz gewährleistet, dass wirtschaftlicher Erfolg, Mitarbeiterinteressen und gesellschaftliche Auswirkungen gleichwertig berücksichtigt werden. Seit Beginn der 90er Jahre bildet die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit Dienstleistungen einen wesentlichen Arbeitsschwerpunkt des Instituts. Hervorzuheben sind in diesem Kontext grundlegende Arbeiten zur Entwicklung und zum Management von Dienstleistungen.

Fraunhofer IBP	Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP beschäftigt sich mit der Erforschung und Entwicklung von Lösungen in den Bereichen Bauphysik, Energieeffizienz, Raumklima, Akustik, Schallschutz und nachhaltiges Bauen. Ziel ist es, innovative Technologien und Konzepte für Gebäude und Infrastrukturen zu entwickeln, die sowohl ökologisch als auch ökonomisch optimiert sind. Das IBP ist ein weltweit renommierter Forschungs- und Entwicklungspartner für Nachhaltigkeitsbewertungen und deren Anwendung in Unternehmen verschiedenster Wirtschaftszweige.

Universität Stuttgart Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT	Universität Stuttgart Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT Allmandring 35 70569 Stuttgart

Das Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT der Universität Stuttgart beschäftigt sich mit der integrierten Planung, Gestaltung und Optimierung innovativer Produkte, Prozesse und Strukturen. Unter Berücksichtigung von Mensch, Organisation, Technik und Umwelt erforscht und erprobt das Institut neue Konzepte des Technologiemanagements, der Arbeitsorganisation und -gestaltung. Arbeitsgebiete wie Prozess-, Arbeitssystem- und Produktgestaltung sowie Mitarbeiterführung werden am IAT im Rahmen des Technologiemanagements durch interdisziplinäre Forschungsteams ganzheitlich bearbeitet.

Universität Stuttgart Institut für Akustik und Bauphysik	Universität Stuttgart Institut für Akustik und Bauphysik IABP Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung GaBi Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

Das Institut für Akustik und Bauphysik (IABP) der Universität Stuttgart widmet sich der Forschung und Lehre in den Bereichen Akustik, Bauphysik, nachhaltiges Bauen und Energieeffizienz. Das IABP untersucht unter anderem Schall- und Wärmeschutz, Raumakustik, Lichttechnik sowie die Wechselwirkungen zwischen Gebäuden und ihrer Umwelt. Ziel ist es, innovative und nachhaltige Lösungen für die Bau- und Umwelttechnik zu entwickeln. Die Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung des IABP hat über 35 Jahre Erfahrung in der Nachhaltigkeitsforschung und Methodenentwicklung im Kontext der Ökobilanz.

IFB Institut für Flugzeugbau	Universität Stuttgart Institut für Flugzeugbau Pfaffenwaldring 31 70569 Stuttgart

Das Institut für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart entwickelt strukturelle Leichtbaukomponenten für die Luft- und Raumfahrt. Schwerpunkte der Forschungsaktivitäten liegen im Bereich der Composite-Fertigungstechnologie, der Simulation und der Prüftechnik. Das IFB kann dabei auf eine umfangreiche Ausstattung unterschiedlichster Fertigungstechnologien wie z. B. Näh- und TFP-Anlagen, Automatisierte Faserlegeprozesse (AFP, APP), Wickelmaschinen oder verschiedene Flechtmaschinen zurückgreifen. Der Einsatz Nachhaltiger FVK-Strukturen mittels Naturfasern und biobasierten Harzen wird aktuell in Preform Sandwich- und gewickelten Strukturen untersucht.

DITF DEUTSCHE INSTITUTE FÜR TEXTIL+FASERFORSCHUNG	Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung (DITF) Denkendorf Körschtalstraße 26 73770 Denkendorf

Die Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF) sind Europas größte Forschungsinstitute im Bereich Textil- und Fasertechnologie. Sie beschäftigen sich mit der Entwicklung innovativer Materialien, Technologien und Prozesse entlang der gesamten textilen Wertschöpfungskette. Die DITF forschen unter anderem in den Bereichen technische Textilien, Faserverbundwerkstoffe, smarte Textilien, Nachhaltigkeit und Recycling. Sie arbeiten eng mit Industriepartnern zusammen, um Forschungsergebnisse in die Praxis umzusetzen.

Hochschule Reutlingen Reutlingen University	Hochschule Reutlingen Alteburgstr. 150 72762 Reutlingen

Die Hochschule Reutlingen zählt zu den führenden Hochschulen für praxisnahe, internationale akademische Ausbildung. Die Forschung erfolgt seitens der Hochschule Reutlingen in der Lern-, Forschungs- und Entwicklungsumgebung Werk150 mit starkem Anwendungsbezug. Das Werk150 wurde 2013 gegründet und bietet auf 800 m² Shopfloor eine realitätsnahe Abbildung industrieller Wertschöpfungsketten – inklusive Engineering, Lagerung, Produktion, Montage und Distribution. Im Fokus stehen Anwendungen von Industrie 4.0/5.0, unterstützt durch einen digitalen Zwilling, der Planung, Steuerung und Überwachung in Echtzeit ermöglicht. Aktuell wird das Werk150 zur zirkulären Fabrik ausgebaut, um kreislauffähige Wertschöpfungssysteme systemisch und interdisziplinär zu erforschen. Ziel ist die Entwicklung nachhaltiger, ressourceneffizienter Produktionsprozesse unter Berücksichtigung ökologischer, sozialer und wirtschaftlicher Aspekte.

Schweizer Design Consulting	Schweizer Design Consulting GmbH Alexanderstrasse 8A 70184 Stuttgart

Schweizer Design Consulting ist eine inhabergeführte, multidisziplinäre Designagentur, die seit mehr als 25 Jahren nutzerzentriertes Produkt- und Automobildesign mit den Schwerpunkten Ideation, ästhetische Gestaltung, CAD-Surfacing und -Konstruktion anbietet. Die anspruchsvollen Kunden kommen aus verschiedenen Branchen wie Luftfahrt, Automobil, Sanitär, Haushaltsgeräte, Lifestyle, Gesundheit, Sport und Freizeit. Darunter sind viele international etablierte Unternehmen und Konzerne, aber auch inhabergeführte Start-ups, deren Produkte und Marken von Anfang an mitentwickelt wurden. Schweizer Design Consulting hat eine hohe Expertise in Bezug auf Werkstoffe und materialgerechte Gestaltung.

FORWARD ENGINEERING	Forward Engineering GmbH Frei-Otto-Str. 22 80797 München

Forward Engineering ist ein Engineeringunternehmen für ganzheitliche und nachhaltige Produktentwicklung unter Berücksichtigung neuer Materialien und Herstellverfahren. Forward Engineering besitzt umfassendes Konstruktions-, Material- und Technologie-Know-how im Bereich der technischen und faserverstärkten Kunststoffe, des funktionalen Leichtbaus sowie der CAE-gestützten Multimaterialoptimierung. Integraler Bestandteil der Produktentwicklung sind Kosten- und Ökobilanzierungen. Als führender Entwicklungs- und Beratungspartner unterstützt Forward Engineering namhafte Kunden aus der weltweiten Mobilitäts- und Zulieferindustrie mit hoher Innovationskraft, von der ersten Konzeptidee bis zur optimierten Serienlösung.

IILS	IILS mbH Businesspark Echterdingen Leinfelderstraße 60 70771 Leinfelden-Echterdingen

Die IILS ist ein kleines mittelständisches Unternehmen (KMU), das als Softwarehersteller und Anbieter von Engineering-Lösungen für moderne wissensbasierte Entwurfsautomatisierung tätig ist. Die IILS verwendet die Methodik graphenbasierter Entwurfssprachen zur Unterstützung der multidisziplinären Entwurfsautomatisierung, und hat für deren maschinelle Übersetzung (Kompilation) die Software-Tool-Suite mit dem Markennamen Design Compiler 43® (für Europa) und Design Cockpit 43® (in den USA), kurz: DC43® entwickelt.

DXC TECHNOLOGY	DXC Technology EntServ Deutschland GmbH Schickardstraße 32 71034 Böblingen

DXC Technology ist ein weltweit agierendes IT-Service Unternehmen, das die kritischen Systeme seiner Kunden betreibt und weiterentwickelt. Dazu gehört die Modernisierung der IT durch Optimierung der Daten-Architekturen als auch die Sicherstellung der Security und Skalierbarkeit über alle Cloud-Typen hinweg. DXC bringt eine umfassende Expertise mit ein, u.a. Agile Softwareentwicklung/-betrieb, Infrastrukturmanagement und Plattform Support, Daten Management, Analytics und Künstliche Intelligenz

LOTUS	Lotus Tech Innovation Centre GmbH Magellan-Allee 4 65479 Raunheim

Die Lotus Tech Innovation Centre GmbH mit Sitz in Raunheim (Hessen), in der Nähe des Frankfurter Flughafens, ist ein Forschungs- und Entwicklungszentrum von Lotus und ist in erfahrene und interdisziplinäre Entwickler- und Expertenteams aus internationalen Ingenieuren und Designern strukturiert. Gegründet im Jahr 2018 als Geely Auto Technical Deutschland GmbH wurde die Gesellschaft von Anfang an ausschließlich auf die Entwicklung von Innovationen und High-Performance-Technologien ausgerichtet. Im Oktober 2021 wurde das F&E-Zentrum in Lotus Tech Innovation Centre umfirmiert und trägt mit einem Fokus auf die Durchsetzung auf Nachhaltigkeitsstrategien wesentlich dazu bei, Lotus zu einem globalen, zukunftsversierten Automobilhersteller entwickeln.

6 Autoren:innen und Projektbeteiligte

Im Folgenden sind Personen aufgeführt, die zu diesem Bericht beigetragen haben oder am Projekt beteiligt waren.

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

- Dipl.-Wi.-Ing. Sebastian Stegmüller
- Dr.-Ing. Lukas Block https://orcid.org/0000-0001-8899-6866
- Dr.-Ing. Thomas Potinecke https://orcid.org/0009-0006-3933-3904
- Dr.-Ing. Fabian Edel https://orcid.org/0009-0005-8646-8767
- Franziska Braun M. A. https://orcid.org/0009-0006-6579-8449
- Dr.-Ing. Antonino Ardillio https://orcid.org/0009-0007-7053-1666
- Dipl.-Ing. Helge Spindler https://orcid.org/0009-0008-5410-8961
- Benjamin Schneider M. Sc. https://orcid.org/0000-0001-5489-7464
- Josip Zilic M. Sc. https://orcid.org/0009-0007-9007-4458
- Dr.-Ing. Maximilan Werner (ehemals) https://orcid.org/0000-0003-3476-7114

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

- Ann-Kathrin Briem M. Sc. https://orcid.org/0000-0002-5097-1898
- Dr.-Ing. Daniel Wehner https://orcid.org/0000-0003-0030-3362
- Dr.-Ing. Michael Held https://orcid.org/0000-0003-3280-6909

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT)

- Marie Schwahn M. Sc. https://orcid.org/0009-0002-8956-8868
- Nika Perevalova MBA & Eng. https://orcid.org/0009-0005-7430-6920
- Sabina Bähr M. Sc. https://orcid.org/0000-0002-4033-5185

Institut für Akustik und Bauphysik (IABP)

- Sun Hea Hong M. Sc. https://orcid.org/0000-0003-3220-3139

Institut für Flugzeugbau (IFB)

- Dr.-Ing. Stefan Carosella https://orcid.org/0000-0002-2677-9206
- Dr.-Ing. Stephan Rudolph https://orcid.org/0009-0006-0773-1713
- Jakob Gugliuzza M. Sc. https://orcid.org/0000-0003-1567-4422
- Johannes Baur M. Sc. https://orcid.org/0009-0000-5475-5300
- Jonas Braiger M. Sc. https://orcid.org/0009-0002-6783-9604

Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung (DITF)

- Sarah Kim M.Sc. https://orcid.org/0009-0005-7141-8257

- Lena Pfeiffer M.Sc. https://orcid.org/0009-0001-0320-9040
- Sven Kuijpens

Hochschule Reutlingen (NXT)

- Nada Ruzicic M. Sc. https://orcid.org/0009-0001-0777-0783
- Nils Künster M. Sc. https://orcid.org/0009-0007-9793-5599
- Prof. Dr.-Ing. Anja Braun https://orcid.org/0009-0006-2538-0363

Schweizer Design Consulting GmbH

- Oliver Schweizer https://orcid.org/0009-0003-5724-8613
- Félix Lespagnol https://orcid.org/0009-0008-7938-5009
- Robin Ritter https://orcid.org/0009-0008-1167-6870
- Tomas Grupp
- David Ceder
- Steffen Stumpf

Forward Engineering GmbH

- Georg Käsmeier
- Markus Freiberger
- Philipp Koch
- Tomke Leinemann

Ingenieurgesellschaft für Intelligente Lösungen und Systeme mbH

- Hannes Wellmann M. Sc. https://orcid.org/0009-0005-6024-0860
- Felix Löser M. Sc. https://orcid.org/0009-0005-4969-4570
- Dipl.-Ing. Marc Eheim

DXC Technology Deutschland GmbH

- Martin Musser MBA https://orcid.org/0009-0003-8799-6719
- Roland Puder https://orcid.org/0009-0000-5523-4638
- José Luis Preza Díaz https://orcid.org/0000-0002-8913-5264
- Willy Cedric Motio M. Sc. (ehemals) https://orcid.org/0009-0007-6218-6444
- Tanawadee Pongboonchai-Empl DBA (ehemals) https://orcid.org/0000-0002-4516-7432
- Johannes Deufel M. Sc. (ehemals)
- Robert Marx M. Sc. (ehemals)

Lotus Tech Innovation Centre GmbH

- Jan Parakenings (ehemals)
- Konstantin Wolf (ehemals)
- Lars Wilke (ehemals)
- Dr. Jens Matz (ehemals)

Impressum

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
www.iao.fraunhofer.de

Danksagung
Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Verbundprojekts »Modellbasierte Entscheidungsunterstützung zur proaktiven sowie Lebenszyklus gerichteten Entwicklung von Fahrzeug-Komponenten – Cyclometric« in der Fördermaßnahme Transformation zur nachhaltigen Wertschöpfung – Unternehmen auf dem Weg zur kreislaufähigen Mobilität (TransMobil) im Programm »Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit«.

Kontakt
Sebastian Stegmüller
Tel. +49 711 970-2320
sebastian.stegmueller@iao.fraunhofer.de

Dr. Lukas Block
Tel. +49 711 970-2173
lukas.block@iao.fraunhofer.de

www.iao.fraunhofer.de
www.cyclometric.de

Fraunhofer-Publica
http://dx.doi.org/10.24406/publica-5589

Fraunhofer IAO, November 2025

Bei der Entwicklung nachhaltiger und vor allem kreislaufgerechter Technologien und Produkte sind zahlreiche Abhängigkeiten über alle Entwicklungsphasen und den gesamten Lebenszyklus hinweg zu berücksichtigen. Für Designer, Ingenieure aber auch andere Stakeholder der Produktentwicklung entsteht dadurch eine hohe Komplexität, die es nahezu unmöglich macht, Architektur-, Material- und Gestaltungsentscheidungen zu beurteilen, zu analysieren und optimal zu treffen

Im Projekt CYCLOMETRIC wurde eine Lösung entwickelt, mit der dieser Personenkreis aber auch Unternehmen Nachhaltigkeitsbewertungen und Konzepte der Kreiswirtschaft bereits in den frühen Phasen eines Produktentwicklungsprozesses analysieren und optimal treffen können – also genau dort, wo sie den größten Einfluss auf eine umweltfreundliche Gestaltung haben. Ein wesentliches Element der Lösung ist eine Software, die sich nahtlos in bestehende Entwicklungsumgebungen einfügt. Bereits bei der ersten Produktidee liefert sie Schätzungen zum ökologischen Fußabdruck, erwarteten Lebenszyklen und anderen Umweltaspekten. Mit zunehmender Konkretisierung des Produkts werden die Prognosen detaillierter und ermöglichen gezielte Anpassungen.

In dieser Veröffentlichung werden die zugehörigen, fundamentalen Konzepte, Methoden und technischen Lösungen erläutert, die dieser Software und der kreislaufgerechten Produktentwicklung allgemein zugrunde liegen. So wurde zum Beispiel mit einem Automobilhersteller, einer Designagentur und einem Ingenieurdienstleister eine Mittelkonsole für ein Auto entworfen, um in der Praxis aufzuzeigen, wie sich Design, Werkstoffe und Lebenszyklus-Anforderungen gegenseitig beeinflussen. Die entworfene Mittelkonsole kombiniert innovative Werkstoffe wie nachhaltige Faserverbundwerkstoffe und Apfelleder mit modularen Konstruktionen, die Reparaturen und die Wiederverwendung vereinfachen. Gleichzeitig ist aus diesem Prozess eine Methode für kreislaufgerechtes Design entstanden, das hier weiter erläutert und ausführt wird. Die enge Verbindung zwischen Methode, Entwicklungspraxis und Software gewährleistet, dass die Ergebnisse dieser Veröffentlichung sowohl theoretisch fundiert als auch in die industrielle Praxis übertragen werden können – auch weit über die Automobilindustrie hinaus. Da die Methoden, die Software und das Bewertungssystem kompatibel aufgebaut sind, lassen sich die Ergebnisse des Projekts auch hervorragend auf andere Branchen übertragen und eröffnen neue Wege zur Förderung einer nachhaltigen und kreislauforientierten Wertschöpfung in verschiedenen Industriezweigen.

Kontakt

Sebastian Stegmüller
Tel. +49 711 970-2320
sebastian.stegmueller@iao.fraunhofer.de

Dr. Lukas Block
Tel. +49 711 970-2173
lukas.block@iao.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

www.iao.fraunhofer.de
www.cyclometric.de