

Auswirkungen der Umsetzung von Design for Circular Economy Merkmalen auf den Produktentwicklungsprozess

Impact of the implementation of Design for Circular Economy features on the product development process.

Merlin Stölzle^{1,*}, Daniel Roth¹, Matthias Kreimeyer¹

¹ Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart (Deutschland)

* Korrespondierender Autor:

Merlin Stölzle

Pfaffenwaldring 9

70569 Stuttgart

☎ 0711/68566058

✉ merlin.stoelzle@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract

The transformation from a linear to a circular economy seems to be the right way to cope with rising resource consumption by a growing economy. One fundamental aspect to achieve this transition is the development of circular products themselves. Characteristics of circular products are already discussed in academia and often condensed in certain DfX-approaches, known as Design for Circular Economy. Such guidelines often provide general advice for developers rather than contain underlying methodical support to actually implement these criteria. Therefore, this contribution investigates the impact of circular design criteria implementation on the development process, thus uncovering the potential fields of action for methodical support of circular product design development.

Keywords

circular economy, design guidelines, design for X, product development process, circular product design

1. Einleitung und Problemstellung

Nachhaltigkeitsstrategien mit Blick auf unterschiedliche Aspekte, wie CO₂-Zertifikate oder die Entkopplung des wirtschaftlichen Wachstums vom Ressourcenverbrauch sind derzeit wichtiger denn je [1]. Die Lebensdauer von Produkten, Baugruppen und Komponenten durch Kreislaufwirtschaft zu verlängern, kann dabei ein wertvoller Beitrag zur Bewältigung der Herausforderung zunehmender Nachfrage bei gleichzeitiger Ressourcenverknappung sein [2]. Ein grundsätzliches Verständnis über die Prozesse innerhalb einer Kreislaufwirtschaft und die Auswirkungen auf Produkte ist zwar durch Untersuchungen gegeben [2], allerdings fehlt bisher die Umsetzung in Form von allgemein anwendbarer methodischer Unterstützung sowie die Implementierung insbesondere während den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses (PEP) [3]. Dieser Beitrag soll mit der Betrachtung der Auswirkungen von kreislaufgerechten Merkmalen in Form von „Design for Circular Economy“-Richtlinien (DfCE) auf den PEP darlegen, ob und wie sich Produktentwicklungsprozesse durch neuartige Anforderungen einer Kreislaufgerechtigkeit von Produkten anpassen müssen.

Bisherige Untersuchungen hinsichtlich der Entwicklung von kreislaufgerechten Produkten beschäftigten sich hauptsächlich mit Produktmerkmalen in Form von „Design for“-Richtlinien [4–7]. Diese Richtlinien reichen von unspezifischen Empfehlungen, wie z. B. Produktmodularisierung im Sinne einer Kreislaufgerechtigkeit zu betreiben [5], bis hin zu spezifischen Auslegungshinweisen, wie z. B. die Vermeidung eines bestimmten Kunststoffes [4]. Sie umfassen aber keine allgemeine methodische Unterstützung für Anwendende, um die Merkmale während der Entwicklung kreislaufgerechter Produkte auch umzusetzen. Für die Erarbeitung geeigneter Methoden zur Entwicklung kreislaufgerechter Produkte scheint Wissen über Auswirkungen der kreislaufgerechten Merkmale auf den dazugehörigen PEP jedoch maßgebend. Dies führt zur Forschungsfrage: Wie wirkt sich die Umsetzung von Design for Circular Economy Merkmalen in Produkten auf die korrespondierende Produktentwicklung aus?

2. Vorgehensweise

Um möglichst viele relevante DfCE-Merkmale zu finden und auf ihren Einfluss auf den PEP auswerten zu können, wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Der Fokus lag auf der Erschließung von existierenden DfCE-Richtlinien und anderen Sammlungen von DfCE-Merkmalen, nicht aber der Ableitung von DfCE-Merkmalen selbst. Als Grundlage für die Synonyme dienen die R-Strategien nach Kirchherr [8] und einschlägige Keywords, die oft in Zusammenhang mit kreislaufgerechter Produktgestaltung genannt werden. Tabelle 1 zeigt die Suchparameter und den kumulierten Suchstring:

Tabelle 1: Aufbau des Suchstrings

Komponente des Suchstrings	Synonyme
Teil 1: DfX	Design for, design guidelines
Teil 2: Kreislaufwirtschaft und angrenzende Bereiche	Circularity, circular economy, disassembly, reassembly, remanufacture, repurpose, reuse, repair, refurbish, recycle, end-of-life
Zusammengesetzter Suchstring	("design for" OR "design guideline") AND ("circularity" OR "circular economy" OR disassembl* OR reassembl* OR remanufatur* OR repurpos* OR reus* OR repair OR refurbish* OR recycl* OR "end-of-life" OR "end of life")

Für die Recherche wurden zwei Forschungsdatenbanken herangezogen: Scopus und Web of Science. Aufgrund der Menge an Suchtreffern und Zielsetzung der Recherche wurde die Suche auf ingenieurwissenschaftliche Inhalte beschränkt und die datenbankspezifischen Filter entsprechend gesetzt. Um eine umfangreiche Sammlung an potenzieller Literatur zu sammeln, wurde der Suchstring auf Titel, Keywords sowie den Abstract angewendet. Weitere Einschränkungen bei der Suche wurden nicht vorgenommen.

Die gefundenen Beiträge wurden anhand eines dreistufigen Verfahrens geprüft und nach ihrer Relevanz aussortiert. Tabelle 2 zeigt die angewendete Vorgehensweise bei der Prüfung der Literatur.

Tabelle 2: Vorgehen zum Prüfen der Ergebnisse der Literaturrecherche

Filter 1:	Lesen des Titels und der Keywords
Filter 2:	Lesen des Abstracts
Filter 3:	Lesen des gesamten Beitrags

Die Recherche ergab insgesamt 10100 Treffer. Um eine beherrschbare Anzahl an zu filternden Beiträgen zu generieren, wurden auf beiden Datenbanken nur aktuelle Jahre von 2023 – 2017 bei der weiteren Sichtung berücksichtigt. Diese Einschränkung geschieht im Wissen, dass relevante Literatur für Kreislaufwirtschaft und die R-Strategien nach Kirchherr [8] zu finden ist und vorherige DfX-Merkmale zu hoher Wahrscheinlichkeit in den aktuellen Sammlungen mit aufgenommen sind. Das ergab eine Gesamttrefferzahl von knapp 3400 Beiträgen, beide Datenbanken zusammengenommen. Mit Hilfe einer Literaturverwaltungssoftware wurden die Ergebnisse der beiden Datenbanken zusammengeführt und Dubletten aussortiert, sodass sich ca. 3000 unabhängige Beiträge ergaben.

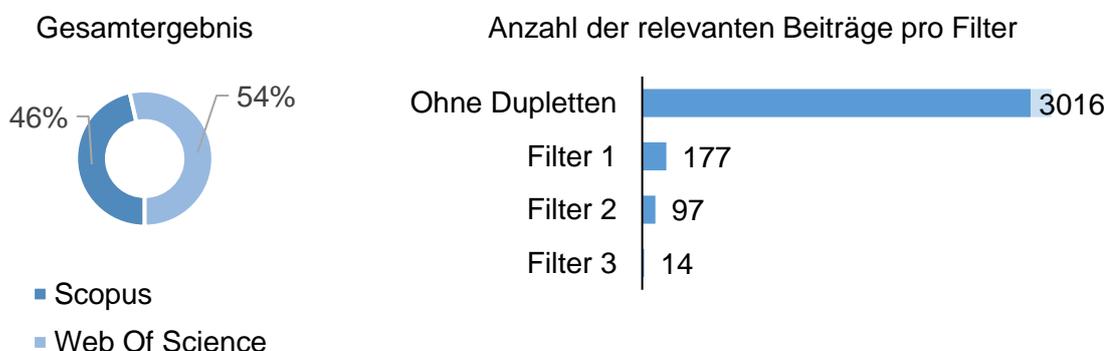


Bild 1: Statistik der Filterung der Beiträge

Bild 1 zeigt die Anzahl der relevanten Beiträge nach den festgelegten Filterstufen. Nach Lesen des kompletten Beitrags blieben 14 relevante DfCE-Guidelines und Sammlungen übrig, die im Weiteren intensiv untersucht wurden.

3. Abstraktion des PEP zur Ermittlung von Auswirkungen von DfCE-Merkmalen

Für die Ermittlung der Auswirkungen von DfCE-Merkmalen auf das Produkt und dessen Entwicklung wird der PEP auf verschiedenen Ebenen abstrahiert, um einzelene Aspekte der Auswirkungen spezifischer erfassen zu können. Die Abstraktionsebenen für den PEP sind bezogen auf den kreislaufwirtschaftlichen Kontext, die prozessuale Einordnung in den PEP sowie den Konkretisierungsgrad der Merkmale. Die Auswirkung auf das Produkt erfolgt über

die Einordnung nach der Produktarchitektur. Die Einordnung in die Kategorien innerhalb der Abstraktionsebenen fand durch einen Workshop mit einem Team aus Produktentwicklungsexperten statt.

Die erste Einordnung erfolgt nach den Kreislauf-Strategien nach Kirchherr [8] und bildet die Grundlage für die späteren Auswertungen als Repräsentation der Kreislaufwirtschaft. Bild 2 zeigt die verschiedenen Strategien. Die Einordnung der jeweiligen Merkmale in die verschiedenen Kategorien erfolgte über die Angabe des korrespondierenden Autors oder einer Einordnung durch die Workshopteilnehmer. Dabei wurde sich an der Frage: „Welches Merkmal wirkt sich positiv auf die jeweilige Kreislaufstrategie aus?“ orientiert.

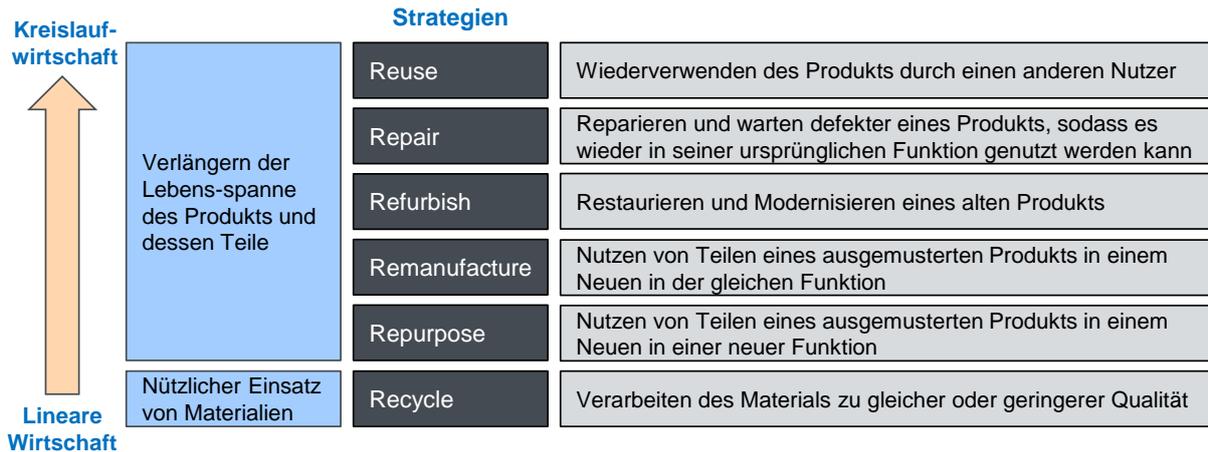


Bild 2: Kreislaufstrategien nach Kirchherr [8]

Um die Merkmale entlang des Produktentwicklungsprozesses einordnen und somit auf eine zeitliche Abfolge im Entwicklungsprozess schließen zu können, werden sie entlang der Phasen des PEP nach VDI 2221 [9] kategorisiert (siehe Bild 3). Hierbei wird ermittelt, in welcher Phase die entsprechenden Merkmale während einer Entwicklung umgesetzt werden. Aufgrund der geringen Relevanz bei der Festlegung von Produktmerkmalen wird die Phase „Ausarbeiten“ nicht betrachtet.

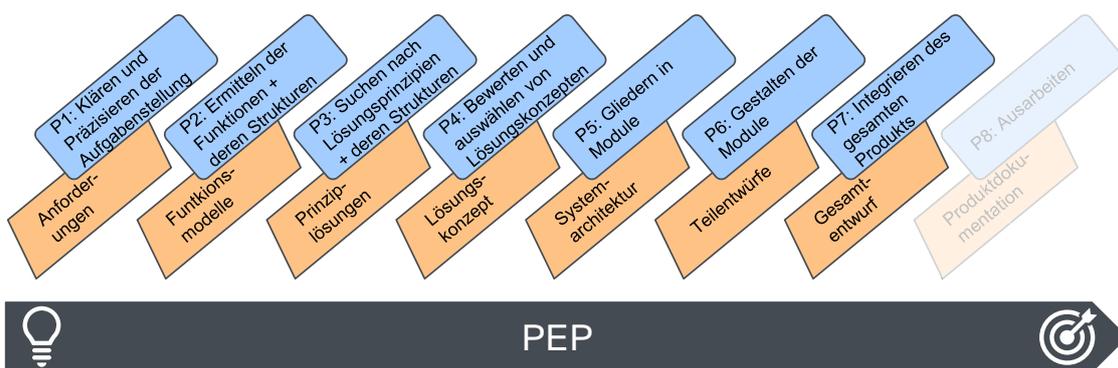


Bild 3: Phasen des Produktentwicklungszyklus angelehnt an VDI 2221 [9]

Die dritte Einordnung erfolgt nach dem Konkretisierungsgrad des DfCE-Merkmals. Hierbei werden die Merkmale nach vier Kategorien unterschieden wobei der Konkretisierungsgrad abnimmt: Ausführungshinweise, Entwicklungshinweise, Hinweise bzgl. des Prozesses und Hinweise bzgl. der Entwicklungsorganisation. *Ausführungshinweise* geben dem Entwickler konkrete Konstruktionsempfehlungen, wie Bauteile kreislaufgerecht umzusetzen sind.

Beispiele hierfür sind die Vermeidung eines bestimmten Materials oder die konstruktive Abtrennung von Bauteilabschnitten, welche Verschleiß unterliegen, für eine spätere Wiederverwendbarkeit. *Entwicklungshinweise* sind weniger konkret als Ausführungshinweise. Sie sind produktübergreifend und können nicht bestimmten Bauteilen zugeordnet werden. *Prozesshinweise* betreffen über das Produkt hinaus Prozesse, die das Produkt während der Lebenszeit durchläuft und können nicht dem Produkt in der physischen Ausprägung zugeordnet werden. *Organisationshinweise* betreffen nur die Organisation der Produktentwicklung und nicht das Produkt selbst.

Die vierte und letzte Einordnung stellt die Verbindung zum Produkt her. Hier findet die Kategorisierung der Merkmale aufgrund ihrer Auswirkungen auf die Produktarchitektur statt. Dabei wird die Produktarchitektur nach Funktionsstruktur, Bauteilstruktur und deren Verbindung durch die Wirkstruktur definiert (Definition nach Krause [10]).

4. Ergebnisse

Aus den, im vorherigen Abschnitt vorgestellten, Sammlungen von DfCE-Merkmalen konnten 471 Merkmale extrahiert und zur weiteren Untersuchung aufgenommen werden. Im Hinblick auf den Anwendungsfall der jeweiligen Sammlungen ist festzustellen, dass die meisten von den Autoren als Richtlinien für Circular Economy klassifiziert wurden und sich somit als umfassende Sammlung an Merkmalen zur Entwicklung kreislaufgerechter Produkte präsentieren. Im spezifischeren Kontext wurden auch Sammlungen für „Remanufacturing“, „Disassembly“, „Recycling“ und „Reuse“ als Untermengen gefunden. Nach der Überprüfung der Merkmale auf Dubletten, blieben 206 unabhängige DfCE-Merkmale übrig, die im weiteren Verlauf in die vorgestellten Kategorien eingeordnet werden konnten.

Bild 4 zeigt die Verteilung der Beiträge über die unterschiedlichen, von den Autoren gesetzten, Fokuse:

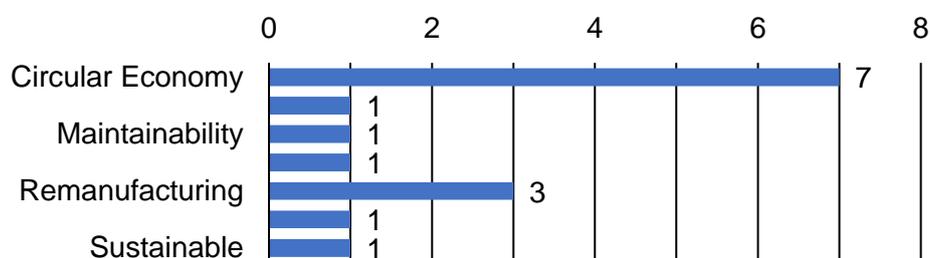


Bild 4: Verteilung der relevanten DfCE-Guidelines über die eingesetzten Suchbegriffe

4.1. Kontext der DfCE-Sammlungen

Albæk et al. [11] entwickeln eine Möglichkeit konkurrierende Konzepte hinsichtlich kreislaufwirtschaftlicher Merkmale zu bewerten. Dabei stehen die frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses im Vordergrund. Angefangen mit einem Fragebogen werden kreislaufwirtschaftliche strategische Ziele hergeleitet und später die Erfüllung bewertet. Grundlage bilden allgemeine kreiswirtschaftliche Parameter die von einer Sammlung an DfCE-Merkmale abgeleitet werden. Eine Kategorisierung zu unterschiedlichen Kreislaufstrategien wurde eingepflegt. Belli et al. [12] konzentrieren sich hingegen auf die Strategie „Reuse“. Sie setzen den Fokus auf Demontierbarkeit, Modularität, Verbindungstechnik, Materialauswahl aber auch auf eine vorrausschauende Entwicklung. Berwald et al. [4] untersuchen speziell DfCE-Merkmale für Elektro und Elektronik-Produkte und schlagen einen für diese Produkte passenden DfCE-Katalog vor. Bovea et al. [5] recherchieren Konstruktionsrichtlinien im kreislaufwirtschaftlichen Kontext. Hierbei wurden Richtlinien von 34 Autoren konsolidiert und eine Sammlung über die Merkmale erstellt, welche durch eine Fallstudie validiert werden.

Ähnlich stellen Lascurain et al. [13] sowie Shahbazi et al. [14] eine Sammlung an DfX-Merkmale für die kreislaufgerechte Produktentwicklung basierend auf einer Literaturrecherche vor. Favi et al. [15] präsentieren ein Tool für die Bewertung der Demontierbarkeit mechatronischer Produkte. Der Untersuchungsfokus liegt nicht auf „Design for Disassembly“-Merkmalen. Allerdings werden Richtlinien für die Verbesserung der Demontierbarkeit der Produkte vorgestellt auf deren Basis die Bewertung stattfindet. Gullo und Dixon [16] widmen sich dem Themenkomplex „Design for Maintainability“ in einem umfangreichen Buch. Entsprechend stellen sie unter anderen Methoden eine „Design for Maintainability“-Richtlinie vor. Hilton et al. [17] präsentieren eine Sammlung von „Design for Remanufacturing“-Merkmalen (DfRema). Kang et al. [18] konsolidieren existierende DfRema-Merkmale und validieren sie mit Hilfe einer Fallstudie. Leal et al. [19] erarbeiten die Sammlung von „Design for Recycling“-Merkmalen, in dem sie nicht ausschließlich den Blickwinkel der Produktentwicklung einnehmen, sondern auch Stakeholder der Recyclingbranche in ihre Untersuchung miteinbeziehen. Ortner et al. [20] entwickeln eine computergestützte Optimierungsmethode für eine kreislaufgerechte Produktgestaltung. Als Basis dienen Gestaltungsstrategien für kreislaufgerechte Produkte, die anhand einer Fallstudie erhoben werden. Tischner et al. [21] präsentieren eine umfangreiche Abhandlung mit dem Fokus auf die Gestaltung nachhaltiger Elektronikprodukte und leiten mitunter Kriterien für diesen Anwendungsfall ab. Zhang et al. [22] entwickeln eine Methode, die mit Hilfe der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse sowie dem Quality Function Deployment Richtungen möglicher Verbesserungen der Remanufacturing-gerechten Gestaltung von Produkten bieten soll. Teil der Untersuchung ist ein „Design for Remanufacturing“-Katalog.

4.2. Einordnung der DfCE-Merkmale

Bild 5 zeigt den Zusammenhang zwischen den Merkmalen innerhalb der R-Strategien und den Phasen des PEP, in denen sie Anwendung finden. Es ist zu erkennen, dass die Merkmale zum Großteil in den späteren Phasen des PEP relevant sind und die Anzahl in Phase 6 ihren Höhepunkt findet. Die Anzahl der relevanten Merkmale fällt zu den früheren Phasen hin stetig ab. Die zweithöchste Anzahl ist in Phase 7 zu erkennen. Merkmale in Verbindung mit Recycle folgen dem Abwärtstrend der vorherigen R-Strategien nicht und sind vor allem in den späteren Phasen zu finden. In Phase 4 finden vernachlässigbar wenig Merkmale Anwendung. Da dies keine produktgestaltende Phase ist, ist diese Anomalie jedoch nicht verwunderlich.

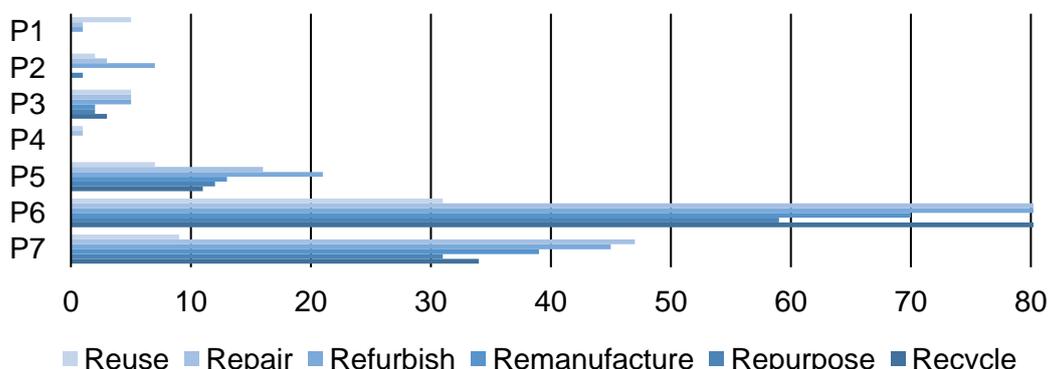


Bild 5: Kategorisierung der DfCE-Merkmale der verschiedenen R-Strategien nach Phasen des PEP

Die Kategorisierung nach Konkretisierung, dargestellt in Bild 6, zeigt eine Ansammlung von Merkmalen bei höherem Konkretisierungsgrad. Hier ist die Gesamtmenge bei den Kategorien „Ausführungshinweis“ und „Entwicklungshinweis“ ähnlich hoch. DfCE Leitlinien, die den Prozess betreffen sind weniger häufig. Organisatorische Merkmale sind in vernachlässigbarer

Anzahl existent. In der Kategorie „Ausführungshinweis“ stechen Merkmale in Zusammenhang mit der Kreislaufstrategie „Recycling“ besonders hervor. Im Hinblick auf die DfCE-Merkmale im Einzelnen ist zu bemerken, dass diese häufig konkrete Hinweise zur Wahl bestimmter Werkstoffe und somit einen unmittelbaren Hinweis zur Ausführung eines Bauteils geben.

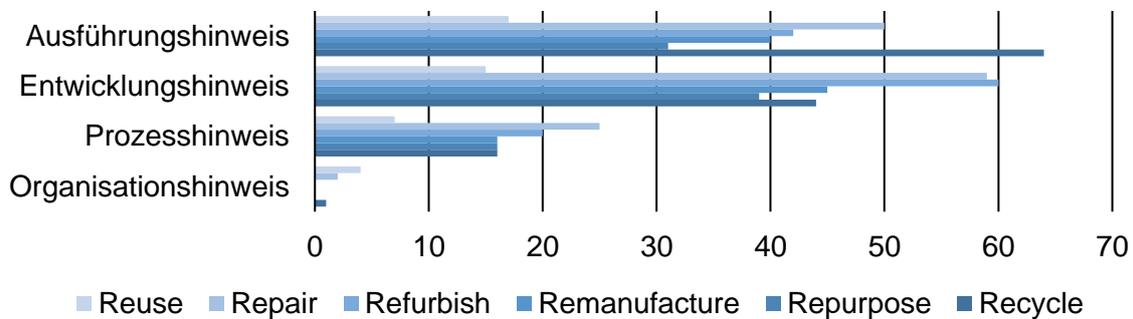


Bild 6: Kategorisierung der DfCE-Merkmale der verschiedenen R-Strategien nach Konkretisierungsgrad

Die Auswertung der Kategorisierung der Merkmale nach der Auswirkung auf die Produktarchitektur (siehe Bild 7) zeigt, dass sich die meisten DfCE-Merkmale auf die Bauteilstruktur auswirken. Zu bemerken ist, dass das Verhältnis von Merkmalen für „Reuse“ zu den restlichen Kreislaufstrategien bei Auswirkung auf die Funktionsstruktur und die Wirkprinzipien größer ist, als bei den Merkmalen in Verbindung mit der Bauteilstruktur.

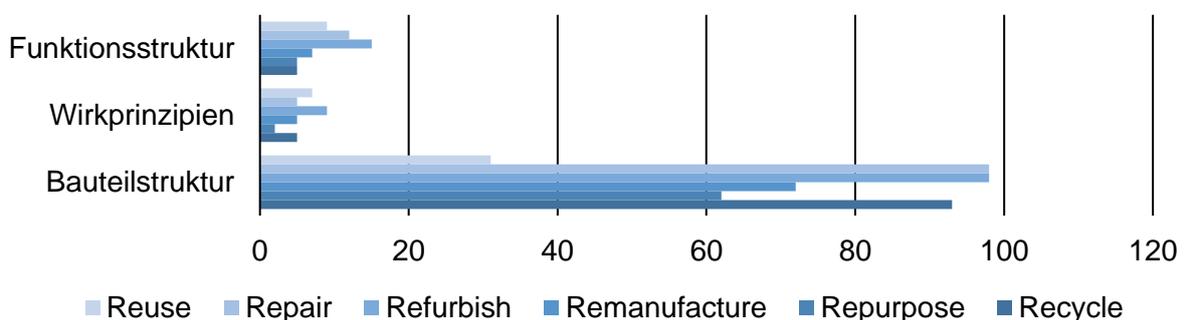


Bild 7: Kategorisierung der DfCE-Merkmale der verschiedenen R-Strategien nach Produktarchitektur

5. Zusammenfassung und Ausblick

Allgemein zeigen die Darstellungen der verschiedenen Kategorisierungen, dass kreislaufgerechte Produktmerkmale sich vor allem auf die späten Phasen des PEP auswirken. Das bestätigt zusätzlich die Kategorisierung nach Produktarchitektur, bei der die Merkmale vorrangig die Bauteilstruktur, die in den späten Phasen etabliert wird, betreffen. Eine Kreislaufgerechtheit wird also spät im Produkt umgesetzt. Eine solche Anpassung in den späten Phasen der Produktentwicklung ist mit höheren Kosten, im Vergleich zu früheren Phasen, verbunden [10]. Über alle Kategorisierungen ist zu erkennen, dass die Anzahl der Merkmale in Verbindung mit der Strategie „Repair“ mit wenigen Ausnahmen am höchsten ist und bis zur Strategie „Repurpose“ abnimmt. „Reuse“ wird durch DfCE-Merkmale noch am wenigsten unterstützt. Demgegenüber ist die Anzahl der Merkmale in Verbindung mit „Recycling“ im Vergleich zu den anderen Strategien hoch und reiht sich nicht in den Abwärtstrend der angrenzenden Strategien ein.

Dieser Beitrag stellt einen Zusammenhang zwischen DfCE-Merkmalen und dem Produktentwicklungszyklus her und leitet Auswirkungen von Kreislaufgerechtheit auf die

Entwicklung ab. Um eine breite Sammlung von DfCE-Merkmalen zu generieren wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Die Recherche ergab nach Filterung 14 relevante Treffer mit insgesamt 206 unabhängigen DfCE-Merkmalen. Eine Einordnung der Merkmale nach den R-Strategien und in Bezug auf die Phasen des PEP, der Produktarchitektur sowie dem Konkretisierungsgrad lässt die Ableitung von Auswirkungen auf den PEP zu. Aus den zuvor festgestellten Auswirkungen von Kreislaufgerechtigkeit auf den PEP geht hervor, dass die frühen Phasen der Produktentwicklung hier unzureichend berücksichtigt sind. Das Schließen dieser Lücke stellt einen Schwerpunkt für zukünftige Arbeiten dar, um bereits frühzeitig im PEP Kreislaufgerechtigkeit in Produkte zu integrieren und damit Entwicklungskosten zu senken.

Literaturverzeichnis

- [1] SKÄRIN, Filip ; RÖSIÖ, Carin ; ANDERSEN, Ann-Louise: Circularity Practices in Manufacturing—A Study of the 20 Largest Manufacturing Companies in Sweden. In: IFIP Advances in Information and Communication Technology (2022), Nr. 663, S. 399–407
- [2] BOCKEN, N.M.P. ; PAUW, I. de ; BAKKER, C. ; VAN DER GRINTEN, B.: Product design and business model strategies for a circular economy. In: Journal of Industrial and Production Engineering 33 (2016), Nr. 5, S. 308–320
- [3] STÖLZLE, M. ; ROTH, D. ; KREIMEYER, M.: Classification of Methodologies for Design for Circular Economy. In: ICED 23 (2023)
- [4] BERWALD, A. ; DIMITROVA, G. ; FEENSTRA, T. ; ONNEKINK, J. ; PETERS, H. ; VYNCKE, G. ; RAGAERT, K.: Design for Circularity Guidelines for the EEE Sector. In: Sustainability 13 (2021), Nr. 7
- [5] BOVEA, M. D. ; PEREZ-BELLS, V.: Identifying design guidelines to meet the circular economy principles: A case study on electric and electronic equipment. In: Environmental Management 228 (2018), S. 483–494
- [6] POZO ARCOS, B. ; BALKENENDE, A. R. ; BAKKER, C. A. ; SUNDIN, E.: Product design for a circular economy: Functional recovery on focus. In: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference (2018), S. 2727–2738
- [7] SASSANELLI, C. ; ROSA, P. ; TERZI, S.: Exploring How Design Can Contribute to Circular Economy Through Design for X Approaches. In: Product Lifecycle Management Enabling Smart X 594 (2020), pp. 439 - 447
- [8] KIRCHHERR, Julian ; REIKE, Denise ; HEKKERT, Marko: Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In: Resources, Conservation and Recycling (2017), Nr. 127, S. 221–232
- [9] Richtlinie 2221. 2019. Entwicklung technischer Produkte und Systeme Modell der Produktentwicklung
- [10] BENDER, Beate ; GERICKE, Kilian: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2021
- [11] ALBAEK, J. K. ; SHAHBAZI, S. ; McALOONE, T. C. ; PIGOSSO, D. C.A.: Circularity Evaluation of Alternative Concepts During Early Product Design and Development. In: Sustainability 12 (2020), Nr. 22
- [12] BELLI, F. ; QUELLA, F.: Ecodesign, Design for Reuse. In: Studies in Systems, Decision and Control 315, Nr. 2021, S. 215–235
- [13] EZPELETA LASCURAIN, I. ; JUSTEL LOZANO, D. ; ZUBELZU LACUNZA, J. ; BEREAU MUTUBERRIA, U. ; ELIZBURU OREGI, A.: Identification of key aspects of circular economy for inclusion in life cycle design. In: Proceedings from the International Congress on Project Management and Engineering (2019), S. 783–796
- [14] SHAHBAZI, S. ; JONBRINK, A. K.: Design Guidelines to Develop Circular Products: Action Research on Nordic Industry. In: 20711050 12 (2020), Nr. 9
- [15] FAVI, C. ; MARCONI, M. ; GERMANI, M. ; MANDOLINI, M.: A design for disassembly tool oriented to mechatronic product de-manufacturing and recycling. In: Advanced Engineering Informatics 39 (2019), S. 62–79
- [16] GULLO, L. J. ; DIXON, J.: Design for Maintainability : John Wiley & Sons Ltd, 2021
- [17] HILTON, B. ; THURSTON, M.: Design for remanufacturing. In: Remanufacturing in the Circular Economy 2020, S. 137–168
- [18] KANG, H.-Y. ; JUN, Y.-S. ; PARK, J.-H. ; YANG, E.-H.: Design of household appliances considering remanufacturing: a case study. In: EcoDesign and Sustainability I, S. 33–43
- [19] LEAL, J. M. ; POMPIDOU, S. ; CHARBUILLET, C. ; PERRY, N.: Design for and from Recycling: A Circular Ecodesign Approach to Improve the Circular Economy. In: 20711050 12 (2020), Nr. 23
- [20] ORTNER, P. ; TAY, J. Z. ; WORTMANN, T.: Computational optimization for circular economy product design. In: 09596526 362 (2022)
- [21] TISCHNER, U. ; HORA, M.: Sustainable electronic product design. In: , 2019, S. 443–482
- [22] ZHANG, X. ; ZHANG, S. ; ZHANG, L. ; XUE, J. ; SA, R. ; LIU, H.: Identification of product's design characteristics for remanufacturing using failure modes feedback and quality function deployment. In: 09596526 239 (2019)