

Gestaltung kreislauforientierter Produktarchitekturen unter Berücksichtigung der Obsoleszenz

Kreislaufforientierte Produktarchitekturen

G. Schuh, A. Keuper, F. Hellwig, C. Ruschitzka

ZUSAMMENFASSUNG Um den Herausforderungen des Klimawandels und der Ressourcenknappheit zu begegnen, müssen Konzepte der Kreislaufwirtschaft für neue Produkte etabliert werden. Bestehende Produktarchitekturen erschweren eine zirkuläre Wertschöpfung, weshalb neue Konzepte zur Gestaltung und Modularisierung nötig sind. Dieser Beitrag bewertet Ansätze zur Schaffung zirkulärer Produkte und entwickelt darauf aufbauend eine Methodik für die Modularisierung von Produktarchitekturen, wobei Obsoleszenz und R-Strategien berücksichtigt werden.

STICHWÖRTER

Nachhaltigkeit, Produktentwicklung, Kreislaufwirtschaft

Designing cycle-orientated product architecture – Methodology for designing product architectures for the circular economy across obsolescence cycles

ABSTRACT To be able to address the challenges of climate change and resource scarcity it is necessary to establish methods for circular economy products. Existing product architectures complicate circular economy, which is why new ideas for design and modularisation are needed. This article evaluates approaches for creating circular products and it develops a methodology for modularizing product architectures, taking into account obsolescence and R-strategies.

1 Einführung

Klimawandel und globale Ressourcenknappheit fordern die Gesellschaft heraus, ihren Ressourcenverbrauch regenerativ zu gestalten [1]. Produzierende Unternehmen tragen eine besondere Verantwortung, um signifikante Reduktionen bei Treibhausgasemissionen und dem Rohstoffverbrauch zu erreichen [2]. Laut „The Circularity Gap Report“ [3], der 2023 auf dem 53. Weltwirtschaftsforum in Davos vorgestellt wurde, werden nur 7,2 % der geförderten und verbrauchten Rohstoffe in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt. Die Folgen sind unter anderem eine erhebliche Verknappung wichtiger Rohstoffe in den kommenden Jahrzehnten und massive Umweltprobleme wie Mikroplastik in den Ozeanen [4]. Außerdem ist etwa die Hälfte der weltweiten Treibhausgasemissionen auf die Gewinnung neuer Rohstoffe zurückzuführen [5].

Ein Ansatz zur Entkopplung des Wirtschaftswachstums von der Gewinnung neuer Rohstoffe ist die Kreislaufwirtschaft. Dieses Konzept ermöglicht Wachstum innerhalb der planetarischen Grenzen, indem es die Nutzung erneuerbarer Energien und Materialien sowie die Reduzierung, Verlangsamung und Schließung von Stoffkreisläufen fördert [6]. Nach *Timmermans et al.* [3] bietet die erfolgreiche Transformation der etablierten linearen Wirtschaft zu einer Kreislaufwirtschaft das Potenzial, die globalen Treibhausgasemissionen um 39 % und den globalen Rohstoffverbrauch um 28 % zu reduzieren.

Dies führte dazu, dass im Jahr 2021 das Europäische Parlament einen Aktionsplan zur Etablierung einer Kreislaufwirtschaft in der Europäischen Union bis 2050 verabschiedete. Weitere

Länder haben ähnliche Gesetze erlassen oder planen, Gesetzgebungen umzusetzen [7]. Vor diesem Hintergrund stehen Unternehmen der produzierenden Industrie vor der Herausforderung, ihre Produkte an die Kreislaufwirtschaft anpassen zu müssen, da die derzeitige Produktgestaltung nicht auf eine kreislauffähige Ressourcennutzung und entsprechend erweiterte Produktlebensdauer ausgelegt ist [8].

Hierbei ist die Produktarchitektur von großer Relevanz, da die Bündelung von Komponenten zu Modulen mit definierten Schnittstellen sowohl den Austausch defekter Komponenten als auch geplante Upgrades ermöglicht. Diese Upgrades dienen zum Beispiel der Erfüllung veränderter zukünftiger Kundenanforderungen und maximieren den ökonomischen Nutzen [9]. Zudem verfolgen bestehende Ansätze der Modularisierung die variable Konfiguration von hochgradig vernetzten Produktkomponenten zu Modulen, um eine Vielzahl an Produkten anzubieten und gleichzeitig die interne Varianz und Komplexität beherrschbar zu gestalten [10]. Es fehlt jedoch an Methoden, die sich mit der zugrunde liegenden Produktarchitektur der Produkte im Kontext der Kreislaufwirtschaft befassen [11, 12].

Daher ist das übergeordnete Ziel dieses Beitrags, eine Methodik für die Gestaltung von Produktarchitekturen im Kontext der Kreislaufwirtschaft zu entwickeln. Die Methodik berücksichtigt insbesondere die unterschiedlichen Ursachen und Zeitpunkte der Obsoleszenz von Komponenten und identifiziert komponentenspezifische R-Strategien auf der Grundlage einer ökonomischen und ökologischen Bewertung.

Der Beitrag ist wie folgt strukturiert: Nach der Einführung gibt das zweite Kapitel einen Überblick über die für diese Arbeit

relevante Terminologie. Das dritte Kapitel beschreibt bestehende wissenschaftliche Ansätze und identifiziert die Forschungslücke. In Kapitel vier wird die entwickelte Methodik vorgestellt. Das letzte Kapitel enthält die Schlussfolgerung und den Bedarf an weiterer Forschung.

2 Relevante Terminologie

Dieses Kapitel beschreibt die wesentlichen theoretischen Grundlagen für die zu entwickelnde Methodik. Dazu gehört das Konzept der Kreislaufwirtschaft und die Definition der Produktarchitektur und der Modularisierung von Produkten.

Die Kreislaufwirtschaft als theoretisches Konzept zielt darauf ab, das Wirtschaftswachstum von dem Ressourcenverbrauch zu entkoppeln [13]. Das Konzept entspricht in erster Linie einer interdisziplinären Neuausrichtung bekannter Strategien des Ressourcen- und Abfallmanagements [14]. Durch Verlangsamung, Schließung und Reduzierung von Stoffkreisläufen soll die Ressourcenproduktivität erhöht werden [6]. Im Gegensatz zu einer linearen Wirtschaft ist eine Kreislaufwirtschaft somit restaurativ und regenerativ [15]. Folglich sollte ein zirkuläres Produktdesign darauf abzielen, die Grenzen der Obsoleszenz eines Produkts zu verschieben und die Verluste von Produkten und Materialien an die Biosphäre zu minimieren. Ein entscheidender Hebel für die Kreislaufwirtschaft ist die aktive Verlängerung von Lebenszyklen und die Wertsteigerung durch Upgrades von Produkten während ihrer Nutzungsphase. Dies ermöglicht die kontinuierliche Monetarisierung des Upgrade-Potenzials, während gleichzeitig eine ressourcenschonende Wertsteigerung über die Lebenszyklen hinweg eine umfassende ökologische Nachhaltigkeit fördert [16].

Ansätze zur Integration von Aspekten der Kreislaufwirtschaft in Produkte werden in der Literatur unter dem Begriff „R-Strategien“ diskutiert. Hauptsächlich diskutierte Strategien in Bezug auf die Produktgestaltung sind Reuse, Refurbishment, Remanufacturing und Recycling [17]. Des Weiteren führen *Schuh et al.* [18] die R-Strategie Re-Assembly ein, welche als industrieller Prozess die Standardisierung und (Teil-)automatisierung von Arbeitsschritten fokussiert und ein Enabler für Upgrades ist. Da R-Strategien nicht allgemeingültig sind, liegt es an den Unternehmen, unter Berücksichtigung der produktspezifischen Eigenschaften die für die Erreichung der Unternehmensziele geeigneten R-Strategien auszuwählen [19]. Hinsichtlich der komplexen Anforderungen an Lebensdauerverlängerung und Fähigkeit der Produkte für verschiedene R-Strategien bedarf es einer detaillierten Betrachtung der Produktarchitektur.

Eine transparente und vollständige Beschreibung der funktionalen und physischen Sichtweise auf das Produkt kann durch die Ableitung der Produktarchitektur geschaffen werden. Eine Produktarchitektur besteht sowohl aus einer Funktionsstruktur als auch aus einer Produktstruktur und veranschaulicht die Beziehung zwischen beiden. Eine Funktionsstruktur visualisiert die Zerlegung der geforderten Gesamtfunktion in Teilfunktionen, während die Produktstruktur den physischen Zusammenhang zwischen einzelnen Komponenten und deren Zusammensetzung zu Modulen abbildet. Durch die Transformationsbeziehungen wird der Zusammenhang zwischen Funktions- und Produktstruktur hergestellt [20].

Produktmodularisierung ist ein Ansatz, der vor allem im Rahmen des Variantenmanagements Anwendung findet. Es befähigt Unternehmen, die zunehmende, aus individualisierten Kundenanforderungen resultierende Produktkomplexität zu beherrschen, indem Produkte nach bestimmten Kriterien in Module gegliedert werden. Durch eine gezielte Kombination der Module kann die vom Markt geforderte Produktvielfalt bei geringer interner Komplexität kostengünstig angeboten werden [8]. Ziel der Modularisierung ist nicht, ein möglichst modulares Produkt zu entwickeln, sondern einen angemessenen Grad an Modularität umzusetzen, um die beschriebenen Ziele zu erreichen. Mögliche Modularisierungsgrade unterscheiden sich im Grad der Standardisierung und Individualisierung sowie in der produktportfolioübergreifenden Anwendung [21]. Im Kontext einer Kreislaufwirtschaft ermöglicht die Modularisierung eine effiziente Durchführung von zum Beispiel marktseitig gewünschten oder technologischen Upgrades. Somit ist die Modularisierung ein wichtiger Hebel für die zirkuläre Produktgestaltung. Sie ermöglicht es, die Obsoleszenz eines Produkts zu verzögern [22].

3 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird eine Auswahl relevanter Ansätze aus der Literatur vorgestellt. Ziel der Analyse ist es, die Forschungslücke im definierten Forschungsumfeld zu identifizieren. Beispielform werden fünf für die Problemstellung repräsentative Ansätze im Detail diskutiert, die sich insbesondere mit der Gestaltung von Produktarchitekturen oder mit der Gestaltung von zirkulären Produkten beschäftigen. Eine umfangreiche Analyse wird in **Bild 1** zusammengefasst.

Blees [23] stellt einen Ansatz zur Modularisierung vor, der technisch-funktionale Abhängigkeiten zwischen Produktkomponenten und den verschiedenen Lebenszyklusphasen eines Produkts berücksichtigt. Zunächst werden für jede Lebenszyklusphase eigenständig Module definiert. Diese Module werden dann kombiniert und angepasst, um eine modulare Produktarchitektur zu bilden. Obwohl *Blees* einen Ansatz beschreibt, der lebenszyklusspezifische Anforderungen wie das Recycling beachtet, fehlt eine systematische Berücksichtigung unterschiedlicher Obsoleszenzzeiten und die Identifizierung von R-Strategien für Komponenten.

Einen weiteren Ansatz zur Modularisierung stellen *Tchertchian et al.* [24] vor. Produktkomponenten werden zunächst anhand ökologischer und ökonomischer Kriterien verschiedenen R-Strategien zugeordnet. Die Produktarchitektur wird so umstrukturiert, dass die für eine bestimmte R-Strategie geeigneten Komponenten in Modulen gebündelt werden. Einschränkungen existieren bei diesem Ansatz allerdings, da die Methode auf nur drei R-Strategien begrenzt ist. Zudem werden unterschiedliche Lebensdauern von Produktkomponenten nur bedingt berücksichtigt.

Aleksic [25] beschreibt eine Methode zur Gestaltung modularer Produktarchitekturen, die technische Upgrades erlaubt. Das Ergebnis der Methode sind unabhängige Module mit definierten Release-Zyklen. Die Release-Zyklen werden auf Basis einer Flexibilitätsanalyse von Komponenten definiert. Diese Methode berücksichtigt kontinuierliche Produkt-Upgrades bei der Modularisierung, jedoch keine R-Strategien.

<div><div><div>○ nicht erfüllt</div><div>◐ kaum erfüllt</div><div>◑ teilweise erfüllt</div><div>◒ fast erfüllt</div><div>● komplett erfüllt</div></div></div>	Vorgehensweise	AGRAWAL ET AL. (2021) [29]	MACHADO ET AL. (2021) [10]	SINHA ET AL. (2020) [30]	MESA ET AL. (2019) [11]	MESTRE ET AL. (2017) [12]	DEN HOLLANDER ET AL. (2017) [16]	FAVI ET AL. (2017) [31]	BOCKEN ET AL. (2017) [6]	ALEKSIC (2016) [23]	TCHERTCHIAN ET AL. (2012) [22]	BLEES (2011) [21]	TAN ET AL. (2024) [24]
	Berücksichtigung der Produktarchitekturgestaltung	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
Berücksichtigung des zirkulären Produktdesigns	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
Berücksichtigung der Komponentenobsoleszenz	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
Identifizierung von ReX-Strategien für Komponenten	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>
Definition von zirkulären Modulen	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>

Bild 1. Überblick über bestehende Ansätze. Grafik: Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Tan et al. [26] betonen die Bedeutung des Designs bei der Ermöglichung von Zirkularität und schlagen ein Framework vor, das vier R-Strategien integriert. Dieses Framework wird auf die allgemeine Neugestaltung von Produkten angewendet, um deren Zirkularität zu verbessern. Das Framework zeigt auf, wie Designentscheidungen die Produktarchitektur beeinflussen können, berücksichtigt allerdings nicht deren Modularisierung.

Nach Den Hollander et al. [22] verfolgen Strategien für das Design zirkulärer Produkte zwei Hauptziele: Design für Produktintegrität und Design für Recycling. Zu diesem Zweck setzen die Autoren Prioritäten für Designansätze zur Erhaltung der Produktintegrität. Die höchste Priorität wird dem Widerstand gegen die Obsoleszenz des Produkts eingeräumt, gefolgt vom Aufschieben und Umkehren der Obsoleszenz. Dieser Ansatz geht jedoch nicht auf die Modularisierung von Produkten für eine Kreislaufwirtschaft ein.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Ansätze zur Modularisierung im Wesentlichen auf die Steuerung der Produktvielfalt unter Kostengesichtspunkten abzielen. Eine Integration von R-Strategien in die Gestaltung von Produktarchitekturen findet nur unzureichend statt. Darüber hinaus zeichnen sich Ansätze zur zirkulären Produktgestaltung meist durch eine Klassifizierung bestehender Design-for-X-Ansätze (DfX) aus, welche auch für eine zirkuläre Gestaltung genutzt werden können. Obwohl in diesen Ansätzen die Modularisierung als wesentlicher Aspekt genannt wird, fehlt es an einer konkreten Methodik zur Modularisierung. Daher besteht die Notwendigkeit eine Methodik zu entwickeln, welche Unternehmen bei der Gestaltung und Modularisierung von Produktarchitekturen im Kontext der Kreislaufwirtschaft unterstützt.

4 Methodik zur Gestaltung kreislauforientierter Produktarchitekturen

Auf der Grundlage der im vorherigen Kapitel identifizierten Forschungslücke wird in diesem Kapitel eine Methodik für die Gestaltung von Produktarchitekturen für eine Kreislaufwirtschaft entwickelt. Die Hauptforschungsfrage dieser Arbeit wird wie folgt formuliert:

„Wie können Produktarchitekturen von technischen Produkten für eine Kreislaufwirtschaft unter Berücksichtigung von Obsoleszenz und R-Strategien von Komponenten gestaltet werden?“

Die Methodik zur Beantwortung dieser Forschungsfrage gliedert sich in drei Schritte: die Strukturierung eines Produktes auf der Basis von Obsoleszenz (Kapitel 4.1), die Identifikation von R-Strategien für die Komponenten eines Produktes (Kapitel 4.2) und die Ableitung einer zirkulären Produktarchitektur (Kapitel 4.3). Nachfolgend werden die Ansätze und das Vorgehen der Methodik im Detail erläutert.

4.1 Strukturierung von Produkten in Obsoleszenz-Einheiten

Einer langen Nutzungsphase eines Produkts stehen vor allem wechselnde Kundenanforderungen, technologische Weiterentwicklung und unterschiedliche Lebensdauern der Komponenten entgegen. Folglich ist eine flexible Gestaltung der Produktarchitektur erforderlich, welche den Austausch von Funktions- oder Anforderungsträgern im Sinne einzelner Komponenten ermöglicht, um die vorzeitige Obsoleszenz des gesamten Produkts zu vermeiden.

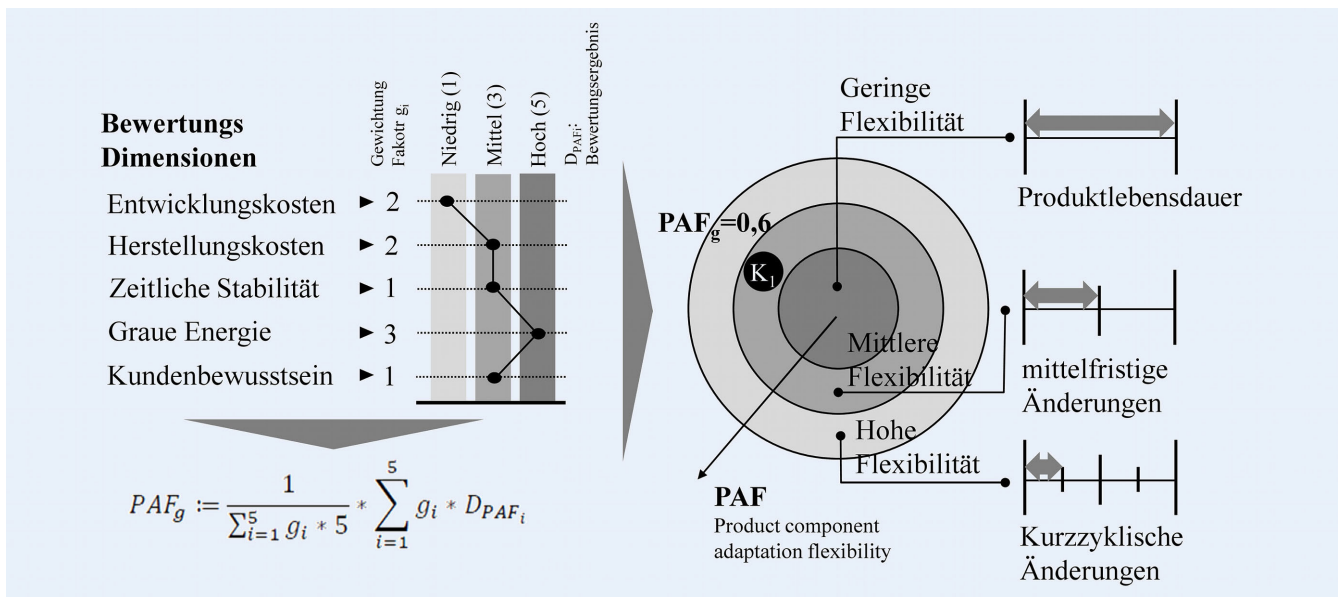


Bild 2. Zuweisung von Produktkomponenten zu Modernisierungszyklen. Grafik: Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Daher werden im ersten Schritt der Methodik Produkte in Obsoleszenz-Einheiten homogener Obsoleszenz strukturiert, in Anlehnung an bekannte Konzepte aus dem Release-Engineering. Als Ursachen für Obsoleszenz werden veränderte Kundenbedürfnisse oder technologische Weiterentwicklung, die Lebensdauer von Produktkomponenten sowie das Ende der Lebensdauer des gesamten Produkts betrachtet. Dabei ist es für die vorliegende Methodik sinnvoll, dass die möglichen Obsoleszenzzyklen einem Vielfachen des häufigsten Änderungszyklus von Produktkomponenten entsprechen, um Upgrades (etwa Re-assembly) und Wartungsaktivitäten gleichzeitig durchführen zu können und somit Kosten zu reduzieren. In Anlehnung an Aleksic [25] erfolgt die Zuordnung zu den Änderungszyklen in Abhängigkeit von der Product Component Adaptation Flexibility (PAF_g) der Komponenten. Dabei wird die PAF_g durch eine normierte Summierung von gewichteten und vordefinierten qualitativen Bewertungsdimensionen berechnet (Bild 2). Die Bewertungsdimensionen können unternehmensspezifisch angepasst werden. Im vorliegenden Beispiel wurden Entwicklungskosten, Herstellkosten, zeitliche Stabilität, graue Energie und Kundenbewusstsein als Bewertungsdimensionen gewählt.

Außerdem wird die erwartete Lebensdauer der Produktkomponenten ermittelt. Gängige Methoden sind die Schadensakkumulationshypothese [27] und die Mean-time-to-failure-Methode [28]. Es können aber auch unternehmensspezifische Methoden angewendet werden.

Auf Basis der zugewiesenen Änderungszyklen und der ermittelten Lebensdauer werden die Komponenten zu Obsoleszenz-Einheiten gebündelt. Ausgangspunkt ist eine tabellarische Auflistung aller möglichen Obsoleszenzzyklen, denen eine Komponente zugeordnet werden kann. Mögliche Obsoleszenzzyklen sind Vielfache des häufigsten nötigen Änderungszyklus. Die Zuordnung der Komponenten zu den verschiedenen Obsoleszenzzyklen erfolgt auf Basis des ersten Auftretens der Obsoleszenz.

Für eine transparente Darstellung der Ergebnisse wird die Strukturierung der Produkte in Obsoleszenz-Einheiten visuell in ein Schalenmodell integriert (Bild 3, linke Seite).

Jede Schale entspricht einer Obsoleszenz-Einheit. Im Zentrum der Kreise liegt die Obsoleszenz-Einheit, deren Produktkomponenten die geringste PAF_g aufweisen und erst zum Produktlebensende obsolet werden, während die äußerste Schale die Produktkomponenten mit den kürzesten Obsoleszenzzyklen umfasst. Der vom Zentrum ausgehende Radius des Schalenmodells repräsentiert somit einen „inversen“ Zeitstrahl. Die Anzahl der Schalen entspricht der produktspezifischen Anzahl an Obsoleszenz-Einheiten und kann unternehmensspezifisch festgelegt werden. Im vorliegenden Beispiel wurden in Bild 3 die vier Schalen „kurzfristige Änderungen“, „mittelfristige Änderungen“, „Reparaturzyklus“ und „Lebensdauerstabil“ gewählt.

4.2 Identifizierung von R-Strategien für Komponenten

Im zweiten Schritt wird für jede Komponente eines Produkts eine geeignete R-Strategie ermittelt. Je nach Ursache und Zeitpunkt der Obsoleszenz werden den Komponenten die verschiedenen R-Strategien zugewiesen.

Für Produktkomponenten, deren Obsoleszenz durch veränderte Kundenbedürfnisse oder technologische Weiterentwicklung bedingt ist, kann entweder ein Re-Assembly, als Update definiert, oder ein Recycling erfolgen. Ob eine Produktkomponente etwa an sich ändernde Kundenanforderungen durch ein Upgrade angepasst werden kann oder dafür die Einführung einer neuen Komponente erforderlich ist, bedarf einer Einschätzung seitens der Entwicklungsingenieure und -ingenieurinnen. Kann ein Upgrade innerhalb der bestehenden Komponente durchgeführt werden, wird diese Komponente dem Re-Assembly zugeordnet, andernfalls dem Recycling.

Bauteilen, die aufgrund ihrer Lebensdauer obsolet werden, können die folgenden R-Strategien zugeordnet werden: Remanufacturing, Refurbishment und Recycling. Um eine fundierte Entscheidung bezüglich dieser R-Strategien zu gewährleisten, wurde eine ökonomisch-ökologische Bewertungsmethode für R-Strategien entwickelt (Bild 4).

Diese Methode gliedert sich in zwei Schritte: Im ersten Schritt werden die Kosten, die für die Anwendung und Umsetzung der

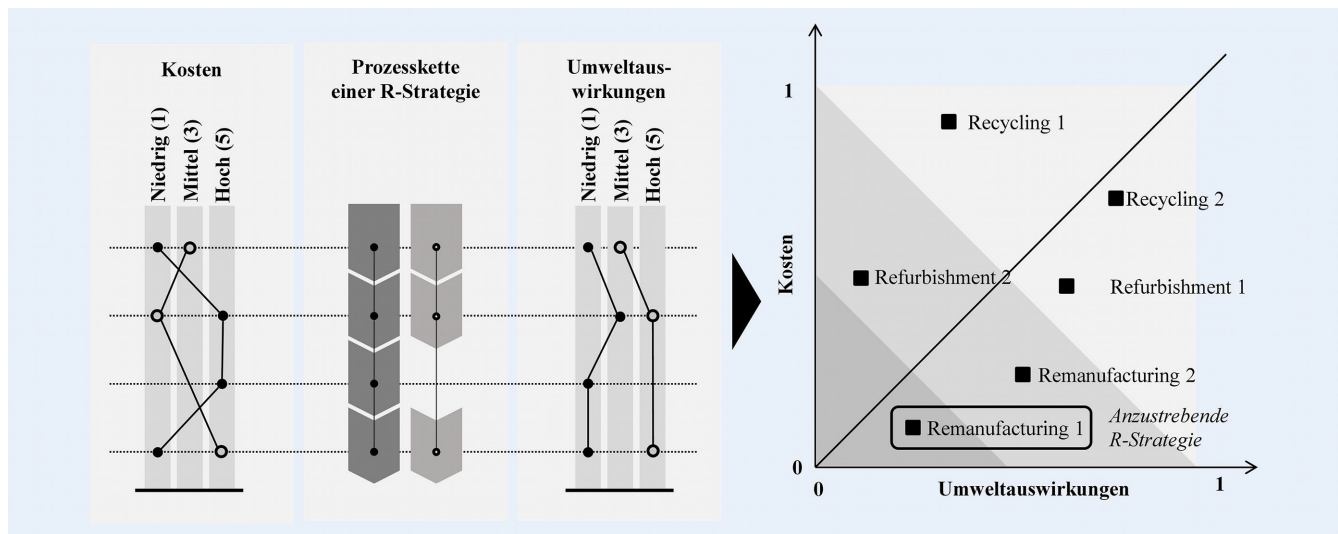


Bild 3. Beispiel für Schalenmodelle mit zugewiesenen Komponenten. Grafik: Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

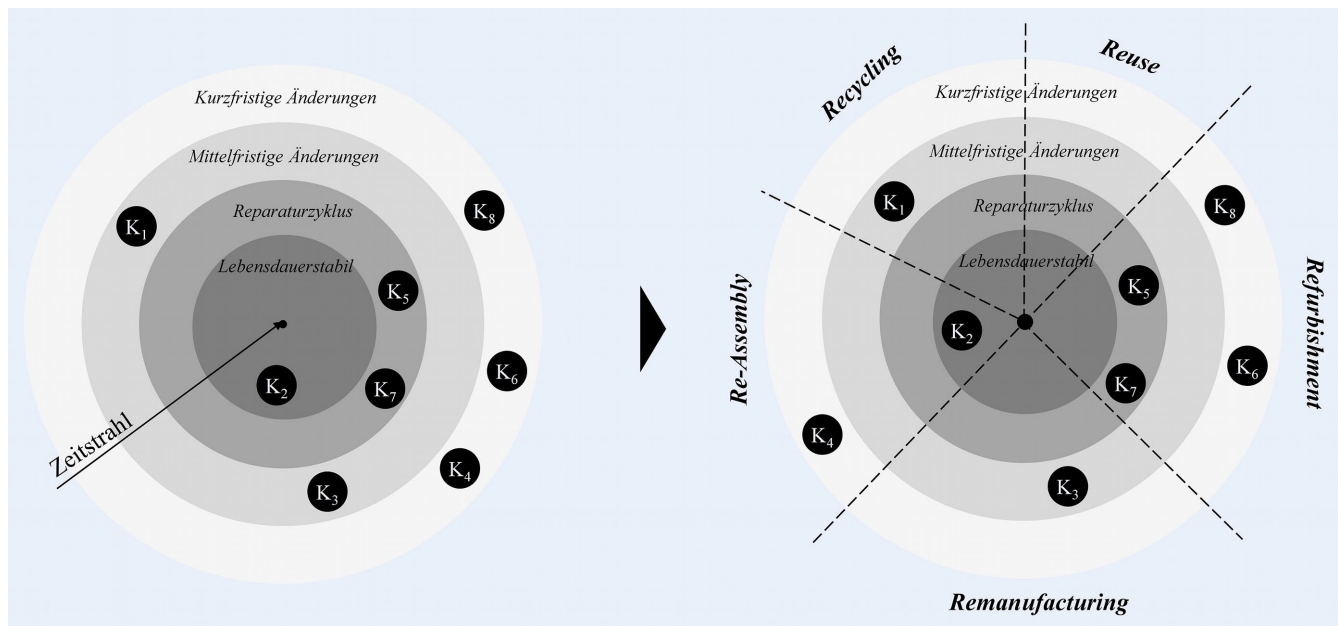


Bild 4. Ökonomisch-ökologische Bewertung von R-Strategien. Grafik: Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

R-Strategie anfallen und die Umweltauswirkungen der einzelnen R-Strategien anhand der Prozessketten der jeweiligen R-Strategien quantitativ bewertet. Die Kosten sind zum Beispiel die Herstellungs- und Prozesskosten, während die Umweltauswirkungen zum Beispiel die CO₂e-Emissionen darstellen, die beim Austausch von Komponenten anfallen. Im zweiten Schritt werden die Kosten und Umweltauswirkungen jeder möglichen Prozesskette einer R-Strategie in einem modifizierten Diagramm gegeneinander aufgetragen. Dabei soll jene R-Strategie bevorzugt werden, die sich im unteren linken Diagrammbereich befindet, da hier der Bereich der geringsten Prozesskosten und Umweltauswirkungen vorliegt.

Produktkomponenten, die bis zum Produktlebensende im Produkt verbaut bleiben, da sie etwa mit hohen Produktions- oder Entwicklungsaufwänden verbunden sind oder architekturrelevante Strukturen darstellen, können entweder einem Reuse oder einem Recycling zugeordnet werden. Entsprechend des höheren Materialwerterhalts ist ein Reuse über ein Recycling zu präferieren.

Jedoch ist zu prüfen, ob eine Produktkomponente beispielsweise aufgrund möglicher Materialermüdungen, technologisch kritischem Rückstand oder anderer sicherheitskritischer Risiken weiterhin genutzt werden kann. Übersteigt also die Restlebensdauer eines Bauteils den ihm zugeordneten zweiten Nutzungszyklus, erfolgt ein Reuse, ansonsten das Recycling.

Zur transparenten Darstellung der Ergebnisse wird das Schalenmodell aus Schritt 1 in die betrachteten R-Strategien unterteilt, siehe Bild 3 rechte Seite.

4.3 Ableitung einer zirkulären Produktarchitektur

Um die Obsoleszenz des gesamten Produkts hinauszuzögern, wird angestrebt, möglichst unabhängige Obsoleszenz-Einheiten zu generieren. Daher wird in der Methode angestrebt, die Interdependenzen zwischen Produktkomponenten, die verschiedenen Obsoleszenzzyklen zugeordnet sind, zu minimieren. Diese Mini-

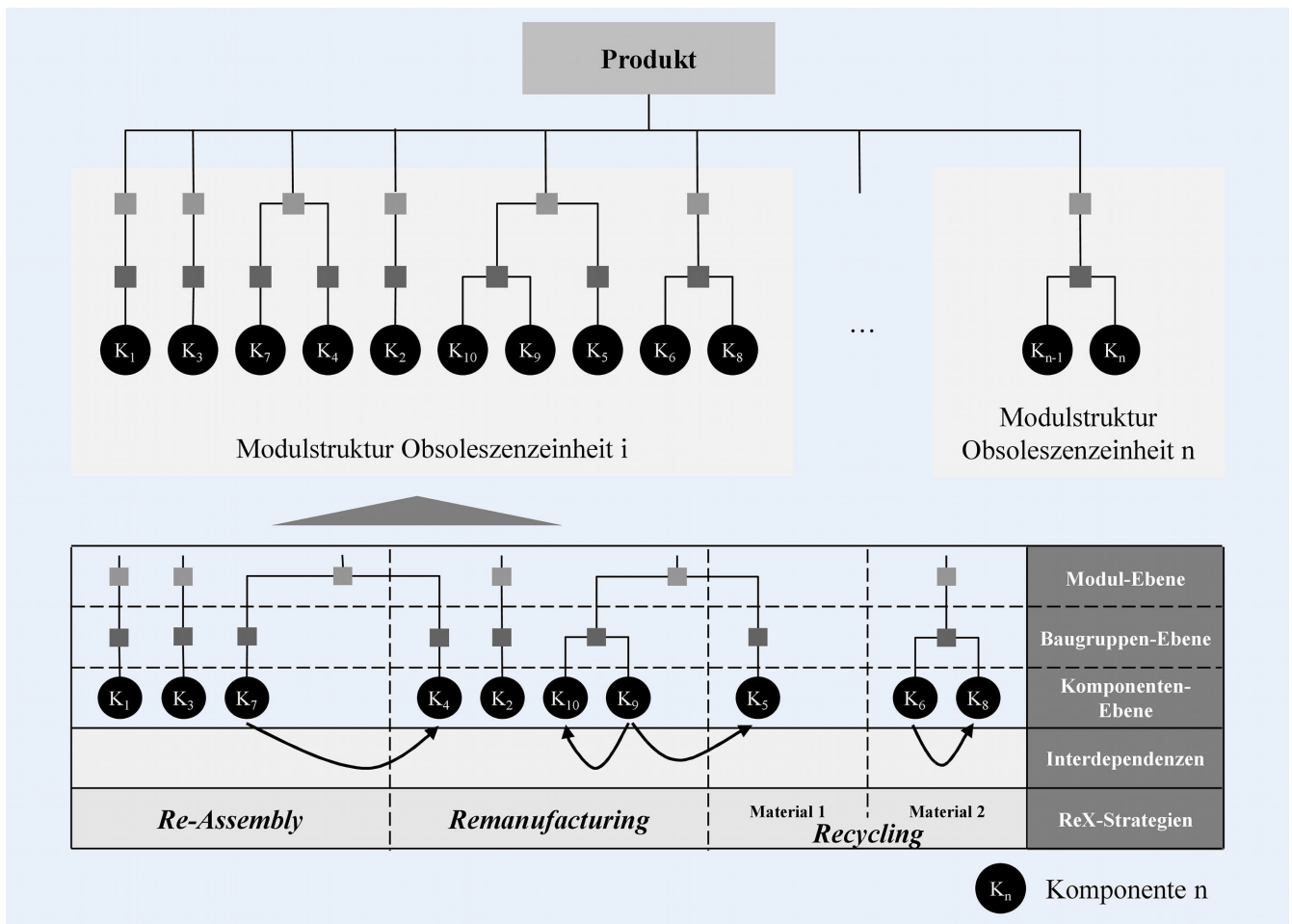


Bild 5. Ableitung der zirkulären Produktarchitektur durch Kombination der Module der verschiedenen Obsoleszenz-Einheiten. Grafik: Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

mierung erfolgt mit einer kreislauforientierten Interdependenzmatrix, die auf den Arbeiten von Aleksic basiert [25]. In dieser Matrix werden die Komponenten anhand ihrer Obsoleszenz-Einheiten gruppiert und die gegenseitigen Abhängigkeiten der Komponenten identifiziert. Kritische signifikante Abhängigkeiten zwischen Komponenten aus verschiedenen Obsoleszenz-Einheiten werden mittels konkreter durch Martin et al. hergeleiteter Maßnahmen reduziert, etwa durch Verlangsamung der Innovationsfrequenz einer Produktkomponente oder durch Reduzierung der Sensitivität der Abhängigkeiten innerhalb der Produktstruktur [29].

Anschließend werden zirkuläre Module in den Grenzen der unabhängigen Obsoleszenz-Einheiten und den nicht auflösbaren Interdependenzen zwischen den Produktkomponenten definiert. Im ersten Schritt werden Produktkomponenten in eine Matrix überführt, wobei die Spalten den R-Strategien und die Zeilen der Modul-, Baugruppen- oder Komponentenebene entsprechen. Im Beispiel sind drei R-Strategien berücksichtigt. (Bild 5)

Im zweiten Schritt werden die zuvor erarbeiteten Interdependenzen zwischen den Produktkomponenten in diese Matrix integriert, wobei technisch-funktionale Beziehungen durch eindimensionale Pfeile visualisiert werden. Anschließend erfolgt im dritten Schritt ein Abgleich der räumlich-geometrischen Anordnung von Produktkomponenten, um festzustellen, ob diese für eine Modulbildung geeignet sind. Der vierte Schritt umfasst die eigentliche

Bildung von Modulstrukturen, wobei eine technisch-funktionale Modulbildung angestrebt wird und zusätzlich Baugruppen aus Produktkomponenten derselben R-Strategie gebildet werden, um Aufwände in Verwertungsprozessen zu reduzieren. Die zuvor in den Grenzen der Obsoleszenz-Einheiten definierten Module werden zur zirkulären Produktarchitektur des Gesamtprodukts zusammengefasst.

5 Zusammenfassung und weitere Forschung

In diesem Beitrag wurde eine Methodik für die Gestaltung von Produktarchitekturen für die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft vorgestellt.

Zu diesem Zweck wurde ein dreistufiger Entwurfsprozess beschrieben, der ein besonderes Augenmerk auf die Berücksichtigung verschiedener Ursachen und Zeitpunkte der Obsoleszenz von Komponenten und R-Strategien legt. Darin erfolgt zunächst die Identifikation und Gruppierung der Produktkomponenten in Obsoleszenz-Einheiten, basierend auf den Ursachen der Obsoleszenz und der Product Component Adaptation Flexibility (PAF). Im zweiten Schritt wird für jede Komponente eine geeignete R-Strategie ermittelt, wobei eine ökonomisch-ökologische Bewertung der Strategien durchgeführt wird. Im dritten Schritt werden anhand der vorangegangenen Ergebnisse Module definiert, die

auf unabhängigen Obsoleszenz-Einheiten basieren und gleichzeitig mögliche Interdependenzen zwischen den Komponenten minimieren, um eine technisch-funktionale Modularisierung zu erreichen. Diese strukturierte Vorgehensweise soll Entwicklungsingenieure und -ingenieurinnen unterstützen, Produktarchitekturen für die Kreislaufwirtschaft zu entwickeln.

Für den Nachweis der effektiven und effizienten praktischen Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Methodik ist eine umfassende Validierung erforderlich. Aufgrund der teilweise qualitativen Methodenschritte können sich aus der Methodik anwenderabhängige Produktarchitekturen ergeben. Daher könnte die Methodik um einen Bewertungsschritt im Sinne einer Sensitivitätsanalyse erweitert werden, der die Signifikanz dieser unterschiedlichen anwenderfokussierten Produktarchitekturansätze ermöglicht. Des Weiteren sollte der Einfluss externer Faktoren, das heißt, wie sich ändernde Marktbedingungen und Technologiesprünge auf die Produktarchitektur auswirken, genauer untersucht werden, um die strukturierte Informationsverarbeitung zu optimieren.

FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC-2023 Internet of Production – 390621612.

Literatur

- [1] Institute for European Environmental Policy: European Green Deal Barometer 2024. Internet: eu.boell.org/en/green-deal-barometer-2024. Zugriff am 12.12.2024
- [2] United Nations Environment Programme and International Resource Panel: Global Resources Outlook 2024 – Bend the trend: Pathways to a liveable planet as resource use spikes. Internet: wedocs.unep.org/20.500.11822/44901. Zugriff am 12.12.2024
- [3] Timmermans, F.; Heinrich, C.; Sicars, S.: The Circularity Gap Report. Internet: www.circularity-gap.world/2023#download. Zugriff am 12.12.2024
- [4] Lutter, S.; Kreimel, J.; Giljum, S.: Ressourcennutzung in Deutschland – Weiterentwicklung des deutschen Ressourcenberichts 2022 – Datengrundlagen. Stand: 2023. Internet: www.umweltbundesamt.de/publikationen/ressourcennutzung-in-deutschland-weiterentwicklung. Zugriff am 12.12.2024
- [5] UN Environment Programme: We're gobbling up the Earth's resources at an unsustainable rate. Stand: 2019. Internet: www.unep.org/news-and-stories/story/were-gobbling-earths-resources-unsustainable-rate. Zugriff am 12.12.2024
- [6] Bocken, N. M. P.; Pauw, I. de; Bakker, C. et al.: Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering* 33 (2016) 5, pp. 308–320
- [7] Europäische Kommission: Europäischer Grüner Deal: Kommission schlägt Neuausrichtung von Wirtschaft und Gesellschaft in der EU vor, um Klimaziele zu erreichen. Stand: 14.07.2021. Internet: ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_21_3541. Zugriff am 12.12.2024
- [8] Schuh, G.; Riesener, M.: Produktkomplexität managen. Strategien – Methoden – Tools. München: Carl Hanser Verlag 2018
- [9] Krause, D.; Hartwich, T. S.; Rennpferdt, C.: Produktentwicklung und Konstruktionstechnik. Heidelberg: Springer-Verlag 2020
- [10] Machado, N.; Morioka, S. N.: Contributions of modularity to the circular economy: A systematic review of literature. *Journal of Building Engineering* 44 (2021), # 103322, pp. 1033–1043
- [11] Mestre, A.; Cooper, T.: Circular Product Design. A Multiple Loops Life Cycle Design Approach for the Circular Economy. *The Design Journal* 20 (2017) sup1, pp. 1620–1635
- [12] Mesa, J. A.: Design for circularity and durability: an integrated approach from DFX guidelines. *Research in Engineering Design* 34 (2023) 4, pp. 443–460
- [13] Schulte, A.; Maga, D.; Thonemann, N.: Combining Life Cycle Assessment and Circularity Assessment to Analyze Environmental Impacts of the Medical Remanufacturing of Electrophysiology Catheters. *Sustainability* 13 (2021) 2, #898
- [14] Blomsma, F.; Brennan, G.: The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. *Journal of Industrial Ecology* 21 (2017) 3, pp. 603–614
- [15] MacNeill, A. J.; Hopf, H.; Khanuja, A. et al.: Transforming the medical device industry: Road map to a circular economy. *Health affairs (Project Hope)* 39 (2020) 12, pp. 2088–2097
- [16] Schuh, G.; Kuhn, M.; Keuper, A. et al.: Neue Modularität und Technologie-Roadmapping. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2023, doi.org/10.24406/publica-960
- [17] Potting, J.; Hekkert, M.; Worrell, E. et al.: Circular economy: Measuring innovation in the product chain. The Hague: PBL Netherlands Assessment Agency 2017
- [18] Schuh, G.; Mauß, W.; Potente, T. et al.: Grüne Re-Montage Upgrade-Fabrik. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2023, doi.org/10.24406/publica-968
- [19] Mast, J.; Friederike, v. U.; Wolfgang, I.: R-Strategien und Innovation im Circular Economy Management. Unternehmerische Strategien der zirkulären Wertschöpfung. Prospektiven – Neues zur zirkulären Wertschöpfung. Bottrop: Prosperkolleg e.V. 2022
- [20] Arnoscht, J.: Beherrschung von Komplexität bei der Gestaltung von Baukastensystemen. Aachen: Apprimus-Verlag 2011
- [21] Krause, D.; Spallek, J.; Blees, C. et al.: Modulare Produktstrukturierung. In: Rieg, F.; Steinhilper, R.; Alber-Laukant, B. (Hrsg.): *Handbuch Konstruktion*. München: Carl Hanser Verlag 2018, S. 717–741
- [22] Hollander, M. C. den; Bakker, C. A.; Hultink, E. J.: Product Design in a Circular Economy: Development of a Typology of Key Concepts and Terms. *Journal of Industrial Ecology* 21 (2017) 3, pp. 517–525
- [23] Blees, C.: Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien. Dissertation, TU Hamburg, 2011
- [24] Tchertchian, N.; Millet, D.; Pialot, O.: Modifying module boundaries to design remanufacturable products: the modular grouping explorer tool. *Journal of Engineering Design* 24 (2013) 8, pp. 546–574
- [25] Aleksic, S.: Nachhaltige Weiterentwicklung von modularen Produktarchitekturen durch Release-Management. Dissertation, RWTH Aachen, 2015
- [26] Tan, E. S. H.; Lee, A. W. L.; Shekar, Y. C. et al.: Design for Circularity: A Framework for Sustainable Product Redesign. *Procedia CIRP* 122 (2024), pp. 479–484
- [27] Wenner, H.: Erwartete Lebensdauer von Medizinprodukten: Was bedeutet das genau? Stand: 24.07.2023. Internet: www.vde.com/topics-de/health/beratung/erwartete-lebensdauer-von-medizinprodukten. Zugriff am 12.12.2024
- [28] Bernhard, M.; Waydhas, C.; Hossfeld, B.: Vom Lebenszyklus der Medizinprodukte und Innovationen. *Notfall + Rettungsmedizin* 20 (2017) 2, S. 97–99
- [29] Martin, M. V.; Ishii, K.: Design for variety: developing standardized and modularized product platform architectures. *Research in Engineering Design* 13 (2002) 4, pp. 213–235
- [30] Agrawal, V.; Atasu, A.; Ülkü, S.: Leasing, Modularity, and the Circular Economy. *Management Science* 67 (2021) 11, pp. 6782–6802
- [31] Sinha, K.; Han, S.-Y.; Suh, E. S.: Design structure matrix-based modularization approach for complex systems with multiple design constraints. *Systems Engineering* 23 (2020) 2, pp. 211–220
- [32] Favi, C.; Germani, M.; Luzi, A. et al.: A design for EoL approach and metrics to favour closed-loop scenarios for products. *International Journal of Sustainable Engineering* 10 (2017) 3, pp. 136–146

Prof. Dr.-Ing. Günther Schuh 


Dr.-Ing. Alexander Keuper 



Frederike Hellwig, M.Sc. 

Foto: Autorin

f.hellwig@wzl.rwth-aachen.de

Christina Ruschitzka, M.Sc. 

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen

Tel. +49 241 / 80-27400

www.wzl.rwth-aachen.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)