

Produkt-Produktions-Ökosysteme für die Wiederverwendung von Modulen im erweiterten Produktlebenszyklus

Product production ecosystems for the reuse of modules in the extended product life cycle

Sven Wehrend¹, Konrad Frischkorn², Magda Berkhahn³, Thomas Eickhoff⁴, Jan Reißmann⁵, Marvin May⁷, Gisela Lanza⁷, Benjamin Schleich⁶, Alexander Hasse⁵, Rainer Stark³, Jens C. Göbel⁴, Georg Jacobs², Dieter Krause¹

¹ Institute of Product Development and Mechanical Engineering Design, Hamburg University of Technology

² Institute for Machine Elements and Systems Engineering, RWTH Aachen University

³ Institute of Machine Tools and Factory Management, Technische Universität Berlin

⁴ Institute of Virtual Product Engineering; University of Kaiserslautern

⁵ Institute of Design Engineering and Drive Technology, Chemnitz University of Technology

⁶ Product Life Cycle Management (PLCM), TU Darmstadt

⁷ wbk Institute of Production Science, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

* Korrespondierender Autor:

Sven Wehrend

Technische Universität Hamburg (TUHH)

Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik

Denickestraße 17

☎ +49 40 42878 2013

✉ sven.wehrend@tuhh.de

Abstract

This paper examines the circularity of products across different product types. The focus is on short circulation paths such as remanufacturing and refurbishing, which offer the greatest value retention. To achieve this, products must have a modular design so that modules can be easily dismantled and reused via standardized interfaces. Sensors are required to record service life-relevant influences and digital module twins to store this data. Other topics include the requirements for modular products for efficient, highly automated disassembly and reassembly as well as the automated configuration of new products from modules with a defined remaining service life.

Keywords

Modular product development, Sustainability, Circular Economy, Adaptive Production, Reuse

1. Motivation

Trotz der steigenden Relevanz der Nachhaltigkeit von Produkten werden diese nach wie vor hauptsächlich in traditionellen, linearen Produktionssystemen hergestellt [1],[2]. In diesen Systemen werden neue Ressourcen zu Halbzeugen, weiter zu Komponenten und anschließend zu einem Endprodukt verarbeitet. Nach erfolgter Nutzung wird dieses Endprodukt abschließend in der Regel entsorgt (auch „Take make use dispose“ Verfahren genannt). Für einen nachhaltigen Umgang mit den endlichen Ressourcen ist jedoch eine Transformation von einer linearen hin zu einer zirkulären Wertschöpfung notwendig [3]. Hierzu hat die Europäische Union 2015 einen Aktionsplan verabschiedet, um den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft einzuleiten [4]. Anstatt neue Materialien und Komponenten im „take make use dispose“ Verfahren zu verwenden, werden hier zirkulär geführte Produkte, Module, Komponenten oder Materialien verwendet, um den Ressourcenverbrauch zu verringern [5].

Eine zirkuläre Wertschöpfung kann dabei auf verschiedenen Ebenen erfolgen. Beim Recycling wird die Gestalt eines Produkts vollständig aufgelöst, um die verschiedenen enthaltenen Rohstoffe bestmöglich zurückzugewinnen. Die Werterhaltung entspricht dabei lediglich dem Wert der substituierten Primärrohstoffe. Eine höhere Werterhaltung kann erreicht werden, indem Bauteile oder Komponenten direkt wiederverwendet werden [6][7]. Bei der direkten Wiederverwendung von Modulen (Reuse), wird das Produkt nur bis auf die Ebene der Module aufgelöst, so dass die höchste Werterhaltung ermöglicht wird. Damit einher geht jedoch ein bisher hoher Aufwand für größtenteils manuelle Demontage- und Prüfungstätigkeiten sowie eine eher ablehnende Haltung, gebrauchte Teile in neue Produkte einzusetzen. So hat sich eine direkte Wiederverwendung bisher nur in wenigen Bereichen durchgesetzt, und das Recycling ist in der Praxis die am weitesten verbreitete Strategie für eine Steigerung der Zirkularität [8].

Dies hat weitere Gründe neben den genannten: So haben Jaeger und Uphadyay im Rahmen einer Literaturanalyse unter anderem hohe Anfangsinvestitionen, komplexe und beschränkte Lieferketten, mangelnde Verfügbarkeit von Informationen, hohe Kosten für die Demontage von Produkten sowie eine mangelnde Berücksichtigung von Zirkularität im Produktdesign als Hindernisse für ein Zirkuläres Wirtschaftssystem identifiziert [9].

Modularisierung stellt einen Lösungsansatz dar, die Herausforderungen bei der Transformation hin zu einer Kreislaufwirtschaft zu adressieren [10][11]. Die Produktarchitektur wirkt sich in erheblichem Maße auf den gesamten Produktlebenszyklus aus und beeinflusst damit die nachhaltigen Eigenschaften eines Produkts und die Strategien am Ende eines Lebenszyklus [12]. Ein möglicher, ganzheitlicher Ansatz zur Steigerung der Zirkularität besteht in einer produktübergreifenden Wiederverwendung auf Modulebene. Hierbei werden Produkte bereits in der Entwicklung so gestaltet, dass ihre Module nach einer ersten Nutzung einfacher demontiert, befundet, und produktübergreifend wiederverwendet werden können. Zusätzlich zur Produktgestaltung müssen die Informationsbereitstellung zum Produkt und insbesondere der Digitale Zwilling sowie Produktionssysteme zur adaptiven, prozessrobusten De- und Remontage von gebrauchten Produkten neu gedacht werden, um eine direkte Wiederverwendung auch ökonomisch nachhaltig zu ermöglichen. Es stellt sich also die Frage: Wie kann ein ganzheitlicher Ansatz zur Gestaltung von Produkt-Produktions-Ökosystemen für die Wiederverwendung von Modulen in Produkten mit definierter Restlebensdauer aussehen

2. Ansatz für Produkt-Produktions-Ökosysteme für die Wiederverwendung von Modulen

Folgend wird aufgezeigt, wie ein solcher ganzheitlicher Ansatz zur produktübergreifenden Wiederverwendung von Modulen aussehen kann. In einem solchen ganzheitlichen Ansatz werden Produkte bereits bei der Entwicklung über eine erste Nutzung hinausgedacht. Im Rahmen der Modularisierung wird das Produkt so gegliedert, dass einerseits eine

produktübergreifende Wiederverwendung, beispielweise durch produktübergreifend einheitliche Modulgrenzen ermöglicht wird. Andererseits erlaubt eine gezielte und standardisierte Gestaltung der Schnittstellen auch eine effiziente Demontage nach erfolgter Nutzung mit anschließender Remontage. Erfahrungen aus der Rekonfiguration von Second-Life Produkten hinsichtlich gegebenenfalls erforderlicher Modulmodifikationen für eine produktübergreifende Wiederverwendung fließen in die Produktentwicklung ein und führen zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Gestaltung und produktübergreifenden Wiederverwendbarkeit (siehe Kernthema 1, Abbildung 1).

Ein Digitaler Zwilling (DT, von engl. „Digital Twin“), welcher nicht nur das Produkt als Ganzes, sondern ergänzend auch auf Ebene der einzelnen Module in Form Digitaler Modulzwillinge (ein sogenannter „Digital Modul Twin“, DMT) repräsentiert, wird während Entwicklung, Beschaffung, Produktion und Nutzung mit Daten für die Zustandserfassung und -bewertung angereichert (siehe Kernthema 2, Abbildung 1). Aus der Entwicklung fließen beispielweise Verschleißmodelle sowie Soll-Werte verschiedenster Parameter ein. Aus der Fertigung werden neben dem DT auch die DMT mit entsprechenden IST-Daten erforderlicher Parameter angereichert. Während der Nutzungsphase schließlich können noch Daten, wie beispielsweise Belastungen, Nutzungsdauern etc. ergänzt werden. Anhand dieser DMT und des DT kann so der Zustand rücklaufender Produkte am Ende ihrer Nutzungsphase beim Eingang in die adaptive, robuste Zirkulationszelle (Kernthema 3, Abbildung 1) auf Modulebene bewertet werden, was zusammenfassend einer groben Bewertung einer Restlebensdauer entspricht.

Auf Basis dieser Zustandsbewertung auf Modulebene kann anschließend die Zirkulation geplant werden. Dies umfasst neben der Demontageplanung selbst auch die Entscheidung darüber, welche Module im Rahmen der Zirkulationszelle aufgrund der Restlebensdauer wiederverwendet werden können, und für welche wiederum beispielweise aufgrund zu geringer erwartbarer Restlebensdauer eine Ausleitung aus der Zirkulationszelle und Zuführung in eine Aufbereitung (Remanufacturing) oder Verwertung (Recycling) nachhaltiger ist (siehe Abbildung 1 oben Mitte). Nach erfolgter Demontage können Module in Abhängigkeit ihrer Restlebensdauer einer direkten Wiederverwendung in der Zirkulationszelle zugeführt werden, oder aber für einer spätere Wiederverwendung zwischengelagert werden. Die Rekonfiguration der Produkte mit definierter Restlebensdauer erfolgt durch einen entsprechenden restlebensdauerabhängigen Konfigurator. Auf Basis der Zustandsdaten aus den DMT kombiniert dieser Module mit ähnlicher Restlebensdauer zu Second-Life-Produkten mit einer abgestimmten erwartbaren Restlebensdauer, die dann in der Zirkulationszelle remontiert werden.

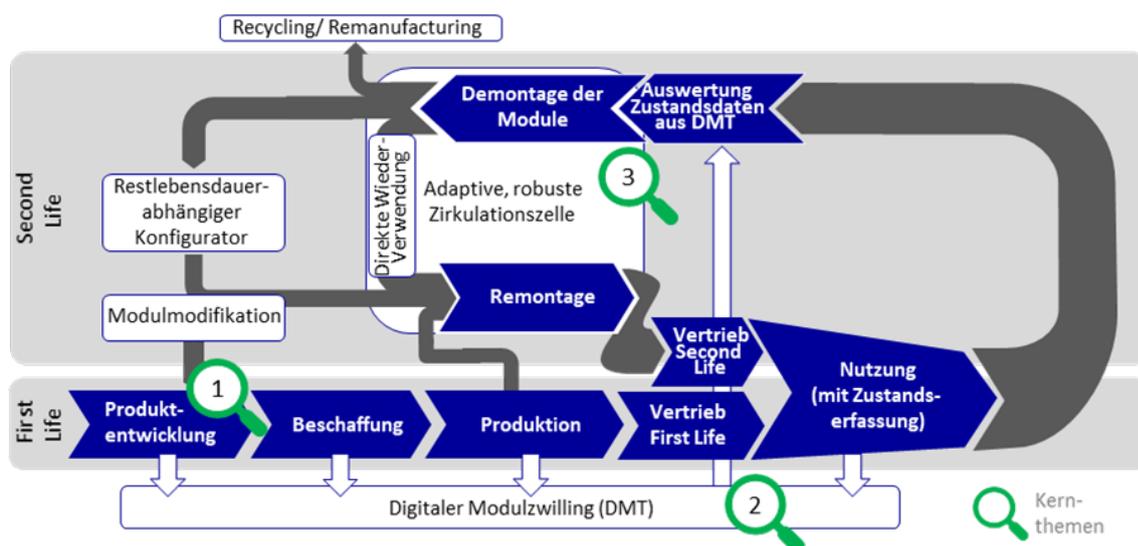


Bild 1: Ansatz für Produkt-Produktionsökosysteme für die Wiederverwendung von Modulen

In den nächsten Abschnitten wird für die drei genannten Kernthemen der jeweilige Stand der Forschung aufgezeigt und anschließend offene Fragenstellungen und der sich ergebende Forschungsbedarf abgeleitet

3. Stand der Forschung

Folgend wird ein Überblick über den derzeitigen Stand der Forschung gegeben. Es wird aufgezeigt, wie Nachhaltigkeit im Rahmen der Entwicklung modularer Produkte berücksichtigt wird. Es werden aktuelle Herausforderungen für Produktionssysteme im Zusammenhang mit einer Kreislaufwirtschaft erläutert und anschließend darauf eingegangen, welche Rolle digitale Zwillinge und die Zustandserfassung von Produkten im Laufe der Nutzungsphase spielen

3.1. Produktentwicklung im Kontext der Wiederverwendung

In der Produktentwicklung gibt es unter den Begriffen DfX und EcoDesign verschiedene Ansätze zur Gestaltung nachhaltigerer Produkte. EcoDesign zielt auf die Reduktion der Umweltbelastung eines Produktes über den gesamten Lebenszyklus hinweg ab. Dies umfasst sowohl verwendete Materialien als auch die Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes [13]. DfX fasst eine Reihe von Designprinzipien zusammen, die darauf abzielen, verschiedene Anforderungen und Aspekte, wie Fertigung, Wartung oder Umweltfreundlichkeit, bereits im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen. Hier gibt es bereits erste Ansätze, die auch das Lebensende eines Produktes adressieren, jedoch müssen diese noch besser auf eine Kreislaufwirtschaft abgestimmt werden [14].

Modularisierung bietet ebenfalls Potentiale zur Steigerung der Nachhaltigkeit von Produkten. Sie ermöglicht es, Produkte aus einzelnen, voneinander möglichst entkoppelten Modulen zusammenzusetzen, die bei Bedarf einfacher ausgetauscht, repariert oder wiederverwendet werden können. Beispielsweise durch die Berücksichtigung nachhaltigkeitspezifischer Modultreiber können einzelne Aspekte gezielt adressiert werden [15]. So kann mittels Modularisierung die Lebensdauer von Produkten verlängert und die Menge an Abfall deutlich reduziert werden [16].

Modularisierungsmethoden lassen sich in technisch-funktionale und produktstrategische Methoden einteilen (siehe Abbildung 2) [17]. Die technisch-funktionale Modularisierung gliedert die Komponenten auf Basis technischer Funktionsweisen und deren Eigenschaften in Module. Beispiele hierfür sind eine Design Structure Matrix (DSM) nach Steward [18] und Modularisierung auf Basis von Heuristiken nach Stone [19].

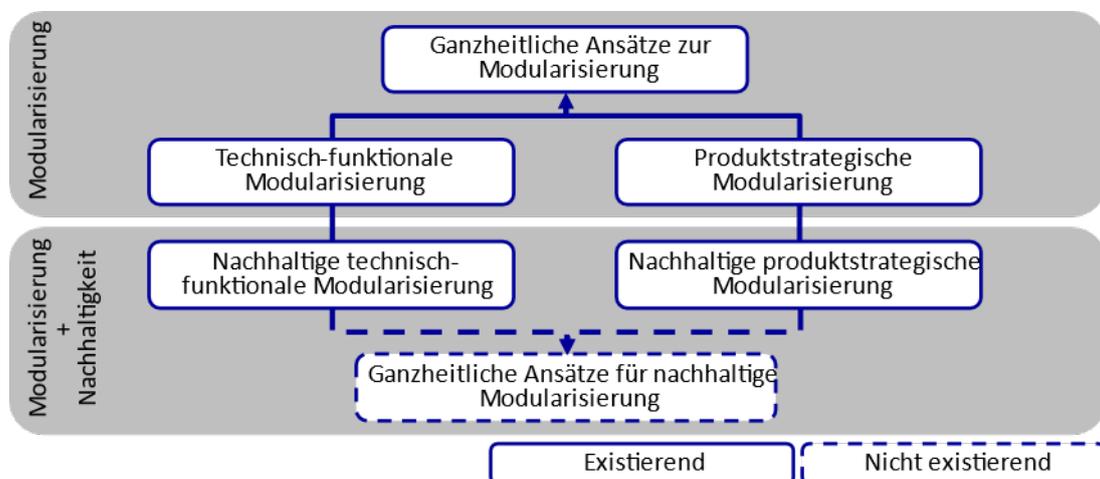


Bild 2: Ansätze zur Modularisierung

Ein anderer Ansatz besteht darin, Module auf Basis produktstrategischer Gründe zu bilden, Beispiele hierfür sind das Modular Function Deployment nach Erixon [20] und die Lebensphasenmodularisierung nach Blees [21]. Im Rahmen der Lebensphasenmodularisierung werden die Anforderungen der unterschiedlichen Lebensphasen einer Produktfamilie an die modulare Produktfamilie aufgenommen und anschließend abgestimmt.

Im Kontext der Nachhaltigkeit finden sich sowohl technisch-funktionale Ansätze, wie beispielsweise das Konzept zur Produktmodularisierung im Kontext der Kreislaufwirtschaft nach Riesener [22] oder die Targetoriented Modularization Method (TOMM) nach Halstenberg [23], als auch eher produktstrategische Ansätze, beispielsweise das Circular Function Deployment nach Vimal [24] oder nachhaltigkeitspezifische Modultreiber [15]. Ein ganzheitlicher Ansatz, der Aspekte der Nachhaltigkeit sowohl auf technisch-funktionaler Ebene als auch produktstrategischer Ebene berücksichtigt, ist nicht bekannt. Zudem ist bisher insbesondere der Aspekt einer produktklassenübergreifenden Wiederverwendung, also eine herstellerübergreifende Wiederverwendung von Modulen in ähnlichen Produkten nicht adressiert. Nur für genormte Teile, wie Schrauben oder Ladestecker, gibt es heutzutage diese Austauschmöglichkeit, wobei der Produktbezug keine Rolle spielt.

Weiterhin können lebensphasen- und abteilungsübergreifende Betrachtungen sowie funktionale und produktstrategische Sichtweisen die Komplexität in der Entwicklung modularer Produktfamilien erhöhen. Eine Möglichkeit dieser steigenden Komplexität zu begegnen, stellen modellbasierte Ansätze dar. Gängige modellbasierte Ansätze zur Produktentwicklung bilden das Produkt nach RFLP-Logik ab (siehe Abbildung 3 links). Dabei werden Anforderungen (R: Requirements) mit Funktionen (F: Functions), logischem Verhalten (L: Logical Framework) und der Produktstruktur (P: Physical Framework) verknüpft. Ein solcher Ansatz ist beispielsweise die Motego-Methode nach Spütz et. al. [25], die auf die Entwicklung mechatronischer Systeme abzielt. Der Fokus liegt dabei auf der Beschreibung des Systemverhaltens mittels wiederverwendbarer domänenspezifischer Modelle und physikalischer Effekte. Nach Arbeiten von Wyrwich et al. wurde die Methode um die Modellierung physischer Schnittstellen zwischen Strukturen erweitert [26]. Dies ist insbesondere bei der Modularisierung von Produkten von Vorteil, da ein Hauptaugenmerk bei der Modulentwicklung auf die Kompatibilität der Modulschnittstellen gelegt wird. Im Zusammenhang mit modularen Produktfamilien können mittels modellbasierter Ansätze Inkonsistenzen vermieden [5] und die Ableitung von DT unterstützt werden [27]. Modulschnittstellenidentifikation sowie die Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten sind bisher im Rahmen modellbasierter Ansätze gar nicht oder kaum adressiert. Weiter finden sich derzeit keine Rahmenwerke zur Modularisierung mit dem Ziel einer produktübergreifenden Wiederverwendung.

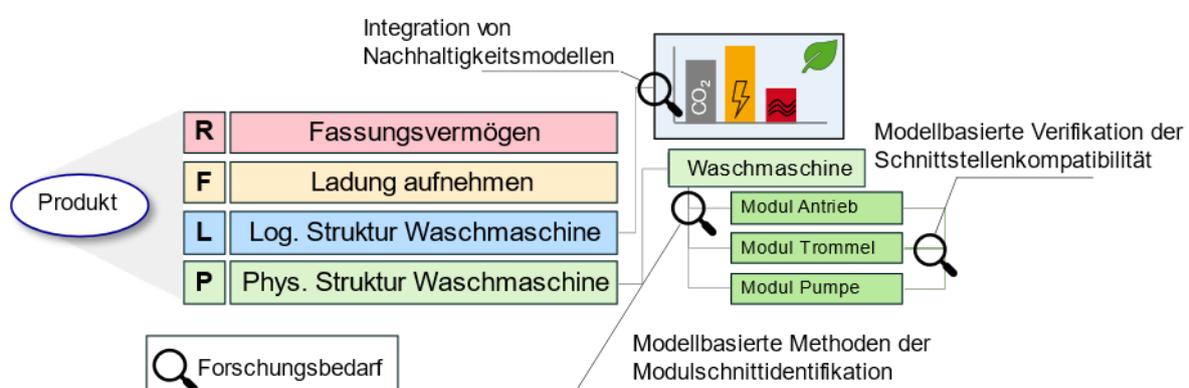


Bild 3: Modellbasierte Entwicklung und Modularisierung

3.2. Produktion im Kontext der Wiederverwendung

Der Schlüssel der Modularisierung hinsichtlich der Produktion sind die Standardisierung und die produktübergreifende (Wieder-) Verwendbarkeit. Hierdurch wird einerseits die Stückzahl gleicher Module erhöht, was gleichzeitig die Produktivität erhöht, und andererseits stehen damit ausreichend viele Module für eine Kreislaufwirtschaft zur Verfügung [28]. Heutzutage werden unterschiedliche Module mit vielfältigen Zuständen durch die Produktion gefertigt und montiert, wozu eine hohe Flexibilität benötigt wird [11]. Bisher wurde die Automatisierung vor allem im Bereich der Montage stark vorangetrieben, während die Demontage weitgehend manuell erfolgt [29]. Beispiele, wie das Fairphone, zeigen, dass Modularisierung in der Elektronikindustrie denkbar, jedoch noch nicht weit verbreitet ist. Besonders bei Massenprodukten, wie dem iPhone, fehlt eine umfassende modulare Denkweise. Dies hängt u.a. damit zusammen, dass die Produktvarianz extrem klein gehalten wird und daher eine modulare Struktur keine nennenswerten Vorteile liefert. Modularisierung dagegen ermöglicht es, Produktfamilien mit einer hohen Varianz in standardisierte, austauschbare Module zu zerlegen. Dies führt zu einer erhöhten Stückzahl der Module und damit zu Synergieeffekten, besserer Qualität und niedrigeren Kosten. Durch die Vereinheitlichung von Modulen können Produktionsprozesse flexibler gestaltet werden und Unternehmen schneller auf Marktveränderungen reagieren [30]. Ein noch nicht umfassend betrachteter Vorteil der Modularisierung ist das Potenzial für die Wieder- und Weiterverwendung einzelner Module. Modular aufgebaute Produkte können leichter demontiert und spezifische Module repariert oder ausgetauscht werden. Dies reduziert die Anzahl an Neuprodukten, was die Nachhaltigkeit steigert, da weniger Materialabfall entsteht und die Lebensdauer von Produkten verlängert wird [31]. Ein zentrales Problem in der Wiederverwendung von Modulen ist der unterschiedliche Zustand der rücklaufenden Produkte, die stark in ihrem Verschleiß und der Nutzungsdauer variieren, was eine einheitliche Verarbeitung erschwert. Hinzu kommt die Unsicherheit bezüglich der Stückzahlen und des Zeitpunkts, zu dem Produkte in den Produktionszyklus zurückgeführt werden. Produkte verlassen das Unternehmen und kehren in unvorhersehbaren Intervallen zurück, was eine präzise Planung und Lagerhaltung herausfordernd macht [28]. Die Modularisierung könnte hier Abhilfe schaffen. Standardisierte Module könnten unabhängig vom Zustand des gesamten Produkts leichter geprüft und wiederverwendet werden. Zudem könnte ein modulares Design die Automatisierung und Standardisierung der Demontage vereinfachen, was die Verarbeitung rücklaufender Produkte effizienter gestaltet. Die Modularisierung bietet somit nicht nur Vorteile in Bezug auf Flexibilität und Kosteneffizienz in der Produktion, sondern birgt auch erhebliches Potenzial für die Nachhaltigkeit in der Wiederverwendung von Modulen selbst [11]. Durch die Standardisierung und Vereinheitlichung von Modulen und vor allem deren Schnittstellen können Synergieeffekte genutzt und die Qualität gesteigert werden, während gleichzeitig Herausforderungen, wie der variierende Zustand und die unvorhersehbaren Rücklaufzeiten von Produkten adressiert werden [28]. Eine umfassende Implementierung der Modularisierung könnte somit einen bedeutenden Beitrag zur Kreislaufwirtschaft leisten und die Nachhaltigkeit in der Produktion maßgeblich verbessern. Zentral hierfür ist die Untersuchung des Umgangs mit Modulen, in der Kreislaufwirtschaft, sowie die potentielle Erfassung von Lebenszyklusdaten bzw. DT wie sie im Folgenden erläutert werden.

3.3. Digital Twin und Zustandserfassung im Kontext der Wiederverwendung

Die Wiederverwendung von Bauteilen und Modulen nach dem technischen oder ideellen Lebensende von Maschinensystemen setzt die objektive Erfassung ihres Zustands voraus. Die Prüfung folgt aus einem SOLL-IST-Vergleich. Die SOLL-Größen werden durch die Produktentwickler festgelegt und dokumentiert und mit den Ist-Daten bei Auslieferung zum DT ergänzt. Die Überprüfung des aktuellen IST-Zustandes des Bauteils nach der Nutzungsphase kann die unterschiedlichen erlebten Beanspruchungen des Bauteils, den Schädigungs- und Verschleißgrad oder die Oberflächenbeschaffenheit und weitere Kenngrößen umfassen.

Im Kontext von Produkt-Produktions-Ökosystemen stellt der DT für die Wiederverwendung von Modulen eine weitere wichtige Säule dar. So beschreibt das Konzept des DT eine digitale Repräsentation einer individuellen Instanz eines Produktes oder eines Produkt-Service-Systems und beinhaltet deren anwendungsrelevante Merkmale und Zustände [32]. Insbesondere erlaubt ein DT den Aufbau einer bidirektionalen Verbindung zwischen einer physischen Produktinstanz und einer virtuellen Repräsentation [33] und damit neben der Live-Bilanzierung der CO₂-Emission in der Fertigung [34] auch die Sammlung der wiederverwendungsrelevanten Belastungen während des Betriebs. Im Fokus steht vor allem die Vernetzung von Datens- und Verhaltensmodellen [35], [36]. Für eine vollständige Durchgängigkeit über den kompletten Produktlebenszyklus müssen alle Anforderungen und Modelle von der frühen Phase der Entwicklung über Datenmodelle aus PLM-Lösungen, Nutzungsdaten (beispielsweise aus einer IoT-Plattform), Verhaltensmodelle und weitere Datenbestände verknüpft werden.

Derzeit werden DT vor allem als Bindeglied zwischen Produkt und Produktion eingesetzt. Für die gezielte Verwaltung über Lebenszyklusiterationen hinweg muss jedoch die Idee eines Abbildes verfolgt werden, welches kontinuierlich mit Daten aus dem gesamten Lebenszyklus, wie etwa Nutzungs- oder Demontageprozessdaten, gefüllt wird. Für den Einsatz als Produktdokumentation im After-Life-Kontext und die Ermöglichung einer zweiten Nutzung auf Modul-Ebene muss ein derartiges, solides Datenmanagement zusätzlich auf Modul-Ebene verfügbar sein. Teile eines solchen vollständig vernetzten Modells auf Produkt- oder Modul-Ebene können während der Nutzungsphase die Vorhersage von Restlebenszeiten kritischer Komponenten ermöglichen. Ebenfalls liefern andere Teile des Modells wertvolle Informationen für Service- oder End-of-Life-Prozesse.

Aus diesem Grund können unterschiedliche Sichten auf verschiedene Abstraktionsebenen sinnvoll sein. Hierbei muss jedoch der Grundsatz der Single Source of Truth verfolgt werden, um Redundanzen und inkonsistente Datensätze zu vermeiden [5]. Bestehende Ansätze ermöglichen bereits heute eine entsprechende Verwaltung von Geometriemodellen und Zustandsdaten. Diese müssen jedoch erweitert werden, um die geforderte Betrachtung auf modularer Ebene bis hin zur Prognose von Verhalten zu ermöglichen. Die IST-Größen können entweder am Lebensende des Vorproduktes nach dem Ausbau oder in-Line während des Einsatzes des Vorproduktes ermittelt werden. Diese Identifikation des aktuellen Zustands und der restlichen Lebensdauer, das sog. Condition-based Maintenance [37] benötigt umfangreiche Sensorik [38] für einwirkende Belastungen, wie Kräfte, Momente und Umgebungsbedingungen. Daraus können Belastungsregime, Werkstoffalterung, Verschleiß [39] und Geometrieintegrität abgeleitet werden.

Die Daten zur Überwachung des Bauteils können unter Inkaufnahme hoher Datenmengen und Energieverbrauch kontinuierlich erfasst oder nur im ausgelösten Extremfall, z.B. einem Missbrauch, aufgenommen werden. Die Sensoren können entweder direkt im zur Wiederverwendung in Frage stehenden Modul integriert oder über spezifische sensorintegrierende Maschinenelemente [38] eingebracht werden und erlauben damit Rückschlüsse auf den Zustand des Wechselmoduls in verschiedenen Qualitäten. Die Inline-Zustandserfassung durch integrierte Sensoren im Rahmen von Industrie 4.0 ermöglicht den Verzicht auf externe Sensorik, erfordert jedoch eine geometrische und ggf. auch stoffliche Anpassung des Moduls an den Sensor bzw. die Messaufgabe.

4. Handlungsbedarf

Das vorgestellte Idealbild einer produktübergreifenden Wiederverwendung von Modulen im Rahmen von Produkt-Produktionsökosystemen bietet Potential zur Überwindung der Hürden einer zirkulären Wertschöpfung. So können mittels produktklassenübergreifender Wiederverwendung Lieferketten vereinfacht und die Beschränkung auf spezifische Produkte verringert und so Stückzahlen erhöht werden. Mittels digitaler Modulzwillinge (DMT), welche

eine Evaluation der Restlebensdauer von Modulen ermöglichen, sowie adaptiver, robuster Zirkulationszellen können De- und Remontage neu gedacht werden, und somit die Nachhaltigkeit von Produkten gesteigert werden. In einem entsprechenden Ansatz müssen die modulare Gestaltung der Produkte sowie die zugehörigen Produktionsökosysteme für zirkuläre Wertschöpfung und die Erfassung und Nutzung relevanter Daten gemeinsam gedacht werden. Hinsichtlich der Produktentwicklung ist vor allem die Frage zu beantworten, wie eine produktübergreifende Wiederverwendung durch gezielte Modularisierung ermöglicht und modellbasiert unterstützt werden kann. Für eine möglichst effiziente De- und Remontage auf Modulebene sind beim Schnittstellendesign die technologischen Anforderungen seitens der Produktionsökosysteme in der Produktentwicklung gezielt zu berücksichtigen. Zudem ist zu klären, wie die Restlebensdauer eines Moduls bewertet und damit die Entscheidung für oder gegen eine Wiederverwendung in der Zirkulationszelle getroffen werden kann und damit einem restlebensdauerabhängigen Konfigurator zur Verfügung zu stellen, der die verfügbaren und eingelagerten Module verwaltet und daraus unterschiedliche Produkte mit unterschiedlichen Restlebensdauern konfiguriert und als mögliche neue Produkte vorschlagen kann. Hinsichtlich der technologischen Herausforderungen einer Zirkulationszelle muss für eine produktklassenübergreifende Wiederverwendung adressiert werden, dass es sich bei den rücklaufenden Produkten um unterschiedliche Produkte mit diversen Verbrauchs- und Verschleißzuständen handelt. Dies erfordert hoch adaptive und robuste Produktionssysteme sowie eine flexible, dynamische Prozessplanung, was zu erforschen ist.

Für die Analyse einzelner Module sind Digitale Zwillinge auf Modulebene zu definieren. Hierzu müssen Frameworks für ein solides Datenmanagement entwickelt werden, um die Konsistenz und Interoperabilität der Modulzwillinge untereinander sowie mit dem übergeordneten Produktzwillings sicher zu stellen. Bestehende Ansätze im Bereich digitaler Zwillinge müssen erweitert werden, um auch auf Modul-Ebene eine Prognose von Verhalten und Restlebensdauern auf Basis von Verschleißmodellen und Nutzungsdaten zu ermöglichen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag zeigt den Bedarf einer Transformation linearer Wirtschaftssysteme hin zu einer Kreislaufwirtschaft auf. Im Stand der Forschung wird aufgezeigt, wie Nachhaltigkeitsaspekte im Rahmen der Modularisierung berücksichtigt werden können, wie Digitale Zwillinge eine Kreislaufwirtschaft unterstützen können und welche Herausforderungen sich für Produktionssysteme durch eine Kreislaufwirtschaft ergeben. Anschließend wird dargestellt, wie Produkt-Produktions-Ökosysteme für die direkte Wiederverwendung ganzer Module unter Einbeziehung einer entsprechenden modularen Produktgestaltung, der Nutzung digitaler (Modul-)Zwillinge und auf eine Kreislaufwirtschaft ausgerichteter adaptiver, robuster Zirkulationszellen aussehen kann. Des Weiteren wird der Handlungsbedarf zur Umsetzung solcher Produkt-Produktionsökosysteme aufgezeigt.

Im Rahmen zukünftiger Forschung ist zu untersuchen, wie Produkte gezielt für eine direkte, produktübergreifende Wiederverwendung von Modulen gestaltet werden müssen, wie ein digitaler (Modul-)Zwillings definiert sein sollte, und welche Daten in diesem enthalten sein müssen, um eine Zustandsauswertung und Demontageplanung im Rahmen der Zirkulationszellen zu ermöglichen. Hinsichtlich der Zirkulationszellen ist zu erforschen, wie diese adaptiv und robust gestaltet werden können, um den Herausforderungen der verschiedenen gebrauchten rücklaufenden Produkte zu begegnen. Insbesondere die unterschiedlichen Zustände und die davon abhängige Planung der De- und Remontage ist hier zu adressieren. Hinsichtlich der Nachhaltigkeit ist zu bewerten, welche R-Strategie hierfür den größten Mehrwert bietet und wie die Bewertung im Zirkulationsprozess dynamisch bewertet werden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] Eurostat: Circular material use rate. Dataset, 2022. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_cur\\$defaultview/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_cur$defaultview/default/table?lang=en), DOI: https://doi.org/10.2908/ENV_AC_CUR
- [2] Circle Economy: The Circularity Gap Report 2022. Amsterdam: Circle Economy, 2022
- [3] Ellen MacArthur Foundation, Completing the picture: How the circular economy tackles climate change. 2021
- [4] Europäische Kommission: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft, COM(2015) 614 final
- [5] Hanna, Michael; Schwenke, Johann; Krause, Dieter: Inconsistency Management for Product Families with many Variants through a Model-Based Approach in Modular Lightweight Design. In: Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, 1 (2020), S. 917-926, DOI: <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.309>.
- [6] Reike, Denise; Vermeulen, Walter J.V.; Witjes, Sjors: The Circular Economy: New or Refurbished As Ce 3.0? — Exploring Controversies in The Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. In: Resources, Conservation and Recycling 135 (2018), S. 246–264, DOI: [10.1016/j.resconrec.2017.08.027](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027)
- [7] Muller, Luiz Neto Paiva e. Silva; Delai, Ivete; Alcantara, Rosane Lucia Chicarelli: Circular value chain practices for developing resource value retention options. In: Journal of Cleaner Production 359 (2022), id 131925, DOI: [10.1016/j.jclepro.2022.131925](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131925)
- [8] Mhatre, Purva; Panchal, Rohit; Singh, Anju; Bibyan, Shyam: A systematic literature review on the circular economy initiatives in the European Union. In: Sustainable Production and Consumption, Volume 26, 2021, Pages 187-202, ISSN 2352-5509, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.09.008>.
- [9] Jaeger, Björn; Upadhyay, Arvind: Understanding barriers to circular economy: cases from the manufacturing industry. In: Journal of Enterprise Information Management (2020), Vol. 33 No. 4, S. 729-745, DOI: <https://doi.org/10.1108/JEIM-02-2019-0047>
- [10] Jones, David; Snider, Chris; Hicks, Ben: A framing of design as pathways between physical, virtual and cognitive models. In: Proceedings of the Design Society 1 (2020), S. 41–50.
- [11] Sundin, Erik: Product and process design for successful remanufacturing. In: Lingköping studies in science and technology (2004).
- [12] Bonvoisin, John; Halstenberg, Friedrich; Buchert, Tom; Stark, Rainer: A Systematic Literature Review on Modular Product Design, In: Journal of Engineering Design 27 (7) (2016) S. 488–514, DOI: [10.1080/09544828.2016.1166482](https://doi.org/10.1080/09544828.2016.1166482)
- [13] Abele, Eberhard., Anderl, Reiner; Birkhofer Herbert; Rüttinger, Bruno, EcoDesign Von der Theorie in die Praxis, Berlin: Springer Vieweg, 2007, DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-75438-1>
- [14] Sassanelli, Claudio et al.: Addressing circular economy through design for X approaches: A systematic literature review. In: Computers in Industry, 120 (2020), 103245, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103245>
- [15] Breimann, Richard; Rennpferdt, Christoph; Wehrend, Sven.; Kirchner, Eckhard; Krause, Dieter: Exploiting the Sustainability Potential of Modular Products by Integrating R-Imperatives into Product Life Phases. In: Proceedings of the Design Society, Volume 3: ICED23 (2023), S. 1785 – 1794, DOI: <https://doi.org/10.1017/pds.2023.179>
- [16] Ma, Junfeng; Kremer, Gül E.Okudan: A systematic literature review of modular product design (MPD) from the perspective of sustainability. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology 86, 1509–1539 (2016), DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8290-9>
- [17] Krause, Dieter, Gebhardt, Nicolas: Methoden zur Entwicklung modularer Produktfamilien. In: Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien. Berlin: Springer Vieweg, 2018, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-53040-5_6
- [18] Steward, Donald V.: The design structure system – A method for managing the design of complex systems, 1981 IEEE Transactions on Engineering Management EM-28 (1981), S. 71–74
- [19] Stone, Robert Boyce: Toward a theory of modular design. Dissertation, University of Texas at Austin 1997
- [20] Erixon Gunnar: Modular function deployment – a method for product modularisation. Dissertation, The Royal Institute of Technology, Stockholm, 1997
- [21] Blees, Christoph; Jonas, Henry; Krause, Dieter: Development of Modular Product Families. Proceedings of 12th International DSM Conference, Cambridge, England (2010).
- [22] Riesener, Michael et al.: Concept for Product Modularization in the Context of Circular Economy, In: Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET), Monterrey, Mexico, 2023, S. 1-9, DOI: [10.23919/PICMET59654.2023.10216863](https://doi.org/10.23919/PICMET59654.2023.10216863)

-
- [23] Halstenberg, Friedrich et al.: Target-oriented Modularization – Addressing Sustainability Design Goals. In Product Modularization, Procedia CIRP, Volume 29, 2015, S. 603-608, ISSN 2212-8271, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.166>.
- [24] Vimal, K.E.K. et al.: Circular function deployment: a novel mathematical model to identify design factors for circular economy, In: Environment, Development and Sustainability. 24. (2022), S. 9068-9101, DOI: [10.1007/s10668-021-01813-2](https://doi.org/10.1007/s10668-021-01813-2).
- [25] Spütz, Kathrin et al.: Modeling language for the function-oriented development of mechatronic systems with motego. Forsch Ingenieurwes 87 (2023), S. 387–398, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10010-023-00623-4>
- [26] Wyrwich, Christian et al.: Seamless Function-Oriented Mechanical System Architectures and Models. In: Eng 2024 5 (1), S. 301–318, DOI: [10.3390/eng5010016](https://doi.org/10.3390/eng5010016)
- [27] Laukotka, Fabian Niklas; Krause, Dieter: Supporting Digital Twins for the Retrofit in Aviation by a Model-Driven Data Handling. In: Systems 2023, 11 (3), DOI:142. <https://doi.org/10.3390/systems11030142>
- [28] Tolio, Tullio et al.: Design, management and control of demanufacturing and remanufacturing systems. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 66 (2), 2017, S. 585–609, DOI: [10.1016/j.cirp.2017.05.001](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.001).
- [29] Lanza, Gisela et al.: Agiles Produktionssystem mittels lernender Roboter bei ungewissen Produktzuständen am Beispiel der Anlasser-Demontage. In: Automatisierungstechnik, vol. 70 (6) (2022), S. 504-516, DOI: <https://doi.org/10.1515/auto-2021-0158>
- [30] Kurilova-Palisaitiene, Jelena; Sundin, Erik; Poksinska, Bonnie: Remanufacturing challenges and possible lean improvements. In: Journal of Cleaner Production 172 (2018), S. 3225–3236, DOI: [10.1016/j.jclepro.2017.11.023](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.023)
- [31] Parker, David et al.: Remanufacturing Market Study. In: European Remanufacturing Network (2015).
- [32] Stark, Rainer et al.: WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“ In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115 (2020), Nr. s1. S. 47-50, DOI: <https://doi.org/10.3139/104.112311>
- [33] Schleich, Benjamin; Anwer, Nabil; Mathieu, Luc; Wartzack, Sandro: Shaping the digital twin for design and production engineering. In: CIRP Annals, 66 (1) (2017), S. 141 – 144, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>.
- [34] Winter, Sven et al.: Live Estimating the Carbon Footprint of Additively Manufactured Components -- a Case Study. In: Procedia CIRP, 116 (2023), S. 642-647, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.108>.
- [35] Eickhoff, Thomas; Forte, Sven; Göbel, Jens C.: Approach for Developing Digital Twins of Smart Products Based on Linked Lifecycle Information. In: Proceedings of the Design Society 2 (2022), S. 1559-1568, DOI: [10.1017/pds.2022.158](https://doi.org/10.1017/pds.2022.158)
- [36] Stark, Rainer; Kind, Simon; Neumeyer, Simon: Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design, In: CIRP Annals 66 (1) (2017), S. 169-172, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.045>.
- [37] Fromberger, Maximilian. et.al.: Comparing Data Sources for Condition Monitoring Suitability. In: Forschung im Ingenieurwesen 83 (2019), S. 521-527, DOI: doi.org/10.1007/s10010-019-00331-y
- [38] Kirchner, Eckhard et.al.: A Review on Sensor-Integrating Machine Elements. In: Advanced Sensor Research 3 (4) (2023), DOI: <https://doi.org/10.1002/adsr.202300113>
- [39] Peters, Julian; Ott, Lorenz; Gwosch, Thomas; Matthiesen, Sven: Requirements for Sensor Integrating Machine Elements - A Review of Wear and Vibration Characteristics of gears. In: KIT Scientific working papers 157 (2020), DOI: <https://doi.org/10.5445/IR/1000127139>