

1.2 Schließen des Kreislaufs mit adaptiver automatisierter Demontage

R. H. Schmitt, A. Göppert, F. Sohnius, M. Frye, J. Elsner, K. Briele, L. Bergs, F. Balzereit, J. Bitter-Krahe, M. Drechsel, I. Geyer, T. Greshake, T. Häring, D. Mishra, C. Kokott, G. Nilgen, S. Schmitt

Gliederung

1	Einleitung	66
2	Remanufacturing für die Kreislaufwirtschaft	67
2.1	Entwicklung der Kreislaufwirtschaft aus der Linearwirtschaft	67
2.2	Potenziale und Herausforderungen des Remanufacturing	69
3	Demontage für wirtschaftliches Remanufacturing	70
3.1	Zielbild eines wirtschaftlichen Demontagesystems	70
3.2	„Design for Disassembly“ - Produkttechnologie als Befähiger für wirtschaftliche Demontagesysteme	72
3.3	Robotische Automatisierung, KI-Entwicklung & Sensortechnik -Prozesstechnologien als Befähiger für wirtschaftliche Demontagesysteme	73
3.4	Linienlose Montage - Systemtechnologie als Befähiger für wirtschaftliche Demontagesysteme	75
4	Use Cases	76
4.1	Refurbishmentprozesse für Second-Life Waschmaschinen	77
4.2	Demontage von PKW-Batteriekästen	80
4.3	Remanufacturing von Freizeitschuhen	83
4.4	Zusammenfassung des aktuellen Status Quo aus Sicht der Unternehmen	87
5	Fazit	87
6	Literatur	90

Kurzfassung

Schließen des Kreislaufs mit adaptiver automatisierter Demontage

Mit der Einführung von gesellschaftlichen und politischen Vorgaben wie dem „European Green Deal“ wird die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft zur Unternehmensaufgabe. Deren wirtschaftliche Umsetzung erfordert jedoch die Anpassung industrieller Prozessabläufe hinsichtlich des angestrebten Grades an Adaptivität an eine dann zunehmende Varianz von Eingangsmaterialien in die industrielle Wertschöpfung. Strategien wie das Remanufacturing bieten nicht nur ein ökologisches Potenzial, sondern bewirken eine Steigerung der Resilienz und eröffnen dadurch neue wirtschaftliche Geschäftsperspektiven. Innerhalb des Beitrags wird die Bedeutung geeigneter Demontagesysteme für die Kreislaufwirtschaft aufgezeigt. Aufbauend auf den spezifischen Herausforderungen der Kreislaufstrategien wird ein Zielbild für wirtschaftliche Demontagesysteme abgeleitet. Drei industrielle Use Cases zeigen verschiedene Ausprägungen solcher Systeme auf. Es besteht der Bedarf, die Demontage zu automatisieren und gleichzeitig die Adaptivität des Systems zu maximieren, um verschiedenen Produktzuständen gerecht zu werden. Die adaptive automatisierte Demontage stellt hierfür die zentrale Befähigung dar. Zur Umsetzung dienen Befähigertechnologien wie der Einsatz von Sensorik und KI, aber auch das „Design for Disassembly“. Aus organisatorischer Perspektive sind Standardisierungen notwendig, um die Verfügbarkeit von Daten sowohl aus der Produktion, dem User-Zyklus als auch aus automatisierten Zustandsbewertungen als ein Entscheidungsfundament für adaptive Prozesse nutzbar zu machen. Die Bereitstellung und Analyse der notwendigen Daten stellt folglich ein zentrales Anliegen für die Umsetzung der Demontageprozesse dar.

Schlagwörter: Demontage, Automatisierung, Adaptivität, Resilienz, Kreislaufwirtschaft

Abstract

Closing the Loop with Adaptive Automated Disassembly

With the introduction of social and political requirements such as the "European Green Deal", the implementation of the circular economy is becoming a corporate task. However, its economic implementation as an answer to regulatory demands requires the adaptation of industrial processes regarding the desired degree of adaptivity to a then increasing variance of input materials in industrial value creation. Strategies such as re-manufacturing not only offer ecological potential, but also bring about an increase in resilience and thus open new economic business perspectives. Within the contribution, the importance of suitable disassembly systems including dismantling abilities for the circular economy is shown. Based on the specific challenges of the circular strategies, a target picture for economic disassembly systems is derived. Three industrial use cases show different forms of such systems. There is a need to automate disassembly while maximizing the adaptivity of the system to cope with different product states. Adaptive automated disassembly is the key enabler for this. Enabling technologies such as the use of sensors, AI or "design for disassembly", serve to implement this. From an organizational perspective, standardization is necessary to make data from production, from the user cycle and from automated condition assessments available and usable as a decision-taking foundation for adaptive processes. Consequently, the provision and analysis of the necessary data represents a central concern for the implementation of disassembly processes.

Keywords: Disassembly, automation, adaptivity, resilience, circular economy

1 Einleitung

Bisherige Wirtschaftsmodelle unserer Gesellschaft orientieren sich vor allem an einem linearen Aufbau, bei dem Produkte nach der Nutzung entsorgt werden [1]. Die Endlichkeit von Ressourcen stellt jedoch eine steigende Problematik dar: Der weltweite Ressourcenbedarf hat sich in den letzten fünfzig Jahren nahezu vervierfacht [2]. So kommt es, dass die Hälfte aller Treibhausgasemissionen und mehr als 90 % des Verlusts biologischer Vielfalt auf die Gewinnung und Verarbeitung von Ressourcen zurückzuführen sind [3]. Im Zuge des European Green Deals [4] und dem Ziel der Klimaneutralität bis 2050 hat die EU Kommission im Frühjahr 2022 eine Reihe von Vorschlägen gemacht, um kreislaufbasierte Geschäftsmodelle zu fördern [5]. Der „Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft“ sieht vor, dass nahezu alle physischen Waren für ihren gesamten Lebenszyklus nicht nur energieeffizienter, sondern explizit kreislauffähiger – also für die Wiederverwendung als Sekundärressourcen – gestaltet sein müssen [3], [5]. Anforderungen, wie eine vereinfachte Wartung, Aufarbeitung und Recycling der Produkte, werden somit in Vorschriften verankert. So wird die Idee einer „echten Kreislaufwirtschaft in der EU“ durch konkrete Produktmaßnahmen umgesetzt [5].

Allerdings verwendet das globale Wirtschaftssystem im Jahr 2022 Ressourcen nur zu 7,2 % zirkulär; in Deutschland werden nur 12 % der Sekundärrohstoffe wieder in der Wirtschaft eingesetzt [3], [6]. Es bietet sich somit eine enorme Lücke, die durch Lebensverlängerung der Ressourcen als Sekundärrohstoffe – wie z. B. im Remanufacturing mit Eröffnung eines neuen Lebenszyklus bei Werterhaltung oder -steigerung – zu schließen ist [6]. Neben dem Umgang mit der Rohstoffverknappung sind mögliche Einsparpotenziale, die Erfüllung der Kundenforderungen und die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit Treiber für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft [7].

Zur Nutzung des Ressourcenpotenzials müssen nicht nur die Produkte entsprechend entwickelt sein, sondern auch auf Prozess- und Systemebene müssen die Strategien der Kreislaufwirtschaft wirtschaftlich und technisch umgesetzt werden [8]. Neben der Rückführungslogistik stellt vor allem die Demontage der Produkte eine Herausforderung dar [8], [9]. So kann die Demontage in Remanufacturing-Prozessen nicht als einfache Umkehr der Montagetätigkeiten verstanden werden, sondern zeichnet sich durch große Variantenvielfalt sowie durch schwankende Produktzustände und Stückzahlen aus [8]. Trotz der Variationen müssen die hohen Ansprüche an Skalierbarkeit dermaßen erfüllt werden, dass gleichzeitig ein reproduzierbarer Umgang mit der Vielzahl an Unsicherheiten ermöglicht wird [9]. Gelingt es, dieses Spannungsfeld aufzulösen, ist dies ein Schlüssel, um das benötigte Potenzial der Sekundärressourcen für eine nachhaltigere Produktion wirtschaftlich erfolgreich nutzen zu können. Den hierfür notwendigen Umbruch in der Produktionsgestaltung gilt es, aktiv durch Konzepte und Technologien zu unterstützen.

Dieser Beitrag zeigt auf, wie Demontagesysteme eine Rückführung von Materialien und Komponenten in die Kreislaufwirtschaft ermöglichen. Zunächst werden die „R“-Strategien der Kreislaufwirtschaft von Recycling bis Reuse diskutiert und die Notwendigkeit für ein industrielles Re-Manufacturing dargelegt. Dazu wird ein Zielbild eines wirtschaftlichen Demontagesystems sowie die vier zentralen Eigenschaften Demontagetiefe, Zerstörungsgrad, Prozess- und Systemadaptivität vorgestellt und die dazugehörigen Technologien erläutert. Anhand der Anwendungsfälle Waschmaschinen (Miele & Cie. KG), PKW-Batteriekästen (Ford Werke GmbH) und Freizeitschuhen (PCH Innovations) wird die Breite möglicher Anwendungen gezeigt. Abschließend werden die Gemeinsamkeiten diskutiert und übergeordnete Handlungsfelder aufgezeigt.

2 Remanufacturing für die Kreislaufwirtschaft

Aufgrund der vorgestellten Herausforderungen zur Ressourcenverfügbarkeit stellt die Dimension „Nachhaltigkeit“ eine wichtige Erweiterung zu den Optimierungszielen der Produktion dar [10]. Nachhaltigere Geschäftsmodelle setzen voraus, dass der Fokus von der Produktion auf den kompletten Lebenszyklus und insbesondere auf das Produktlebensende (engl.: „End-of-Life“) ausgeweitet werden muss [10], [11]. Eine nachhaltige industrielle Kreislaufwirtschaft endet nicht an den Werkstoren, sondern bezieht den Anwendungs-Zyklus mit ein. Insbesondere die Rückgewinnung von Ressourcen stellt ein zentrales Anliegen dar [11]. Allerdings unterscheidet sich das Ressourcenverständnis in den verschiedenen Konzepten, welche nachfolgend erläutert werden.

2.1 Entwicklung der Kreislaufwirtschaft aus der Linearwirtschaft

Ein nachhaltiges Wirtschaftssystem zeichnet sich durch eine ganzheitliche Betrachtungsweise aus, in der die Umwelteinwirkungen, die durch die Nutzung von Ressourcen entstehen, hinterfragt werden. Für eine vollständige Analyse ist daher der gesamte Produktlebenszyklus zu berücksichtigen [10]. Konventionell werden Produkte in einem linearen Wirtschaftsmodell betrachtet: Rohstoffe werden gefördert, um aus diesen Rohstoffen wiederum Produkte herzustellen. Das Produkt wird so entwickelt, dass es nach Ablauf der Lebensdauer zu Abfall wird [1], [12], [13]. Dieser einmalig durchlaufende Lebenszyklus wird auch als „Cradle-to-Grave“ bezeichnet [12].

Gestaltungsoptionen für eine nachhaltige Produktion ergeben sich aus den drei Konzepten Effizienz, Konsistenz und Suffizienz. Effizienzmaßnahmen – also eine vorteilhaftere Nutzung eingesetzter Ressourcen im Verhältnis zum produzierten Output – sind aus ökologischer und ökonomischer Perspektive eine kontinuierliche Verbesserungsaufgabe [14], [15]. Allerdings führen Effizienzmaßnahmen nur zur Abmilderung von negativen Effekten, z. B. zu Materialeinsparungen, aber nicht zur Problembeseitigung [16]. Stattdessen kann die Effektivität verbessert werden, indem neue Konzepte umgesetzt werden (Konsistenz-Ansatz): Der Produktlebenszyklus wird hierbei durch verschiedene Strategien verlängert, um Ressourcen möglichst lange und häufig wiederzuverwenden. Dieses Konzept ist als Kreislaufwirtschaft bzw. „Circular Economy“ bekannt. [17]–[19] Visionäres Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, Nutzungszyklen vollständig, ohne die Erzeugung von Abfällen zu etablieren. Charakteristische Eigenschaften sind die ganzheitliche Perspektive, eine vollständige Wiederverwertbarkeit der Materialien und der Einsatz von erneuerbaren Energien. [20], [21] Dies kann dann auch aus wirtschaftlicher Perspektive vorteilhaft sein. Insbesondere Design-Konzepte, die den gesamten Produktlebenszyklus vorausschauend gestalten, erfüllen eine wichtige Aufgabe [16].

In der Literatur werden unterschiedliche Typen von Strategien benannt, die die Rückgewinnung von Ressourcen, deren Aufwertung und die Ermöglichung weiterer Lebenszyklen thematisieren [22]–[24]. So definieren POTTING *ET AL.* insgesamt 10 verschiedene „R-Strategien“ [22]. Einige ausgewählte Begriffe der R-Strategien werden für die weitere Ausarbeitung aufgeführt (siehe Abbildung 1):

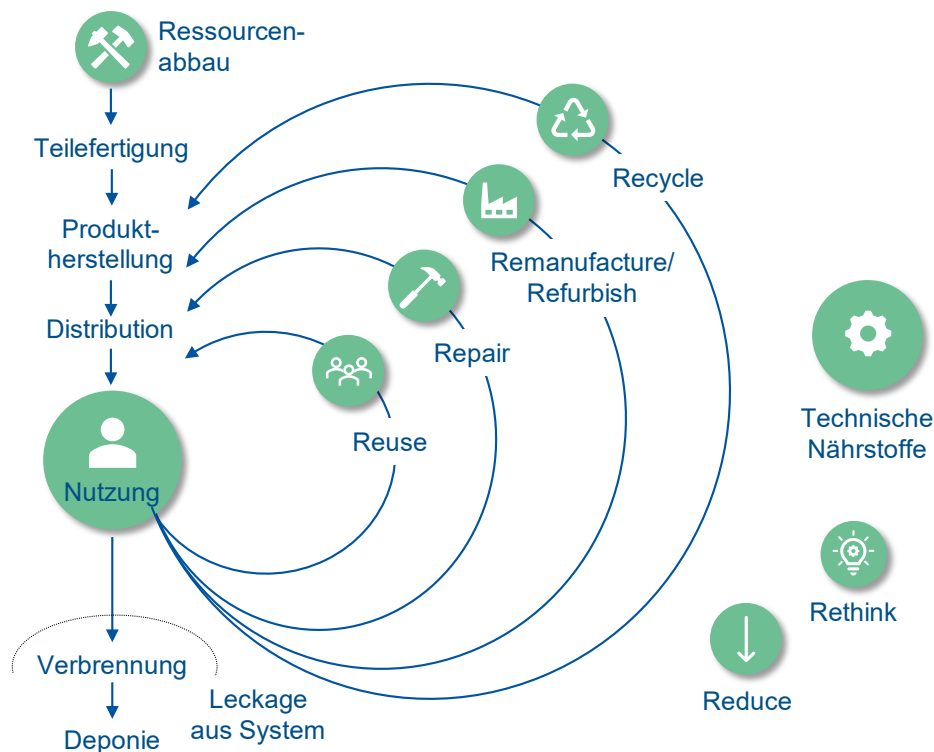


Abbildung 1: Industrielle Ressourcennutzung in der Kreislaufwirtschaft; in Anlehnung an [23]

Die am weitesten etablierte R-Strategie ist das „Recycling“ [16]. Als Recycling bezeichnet man den Prozess der stofflichen Wiederaufbereitung von Wertstoffen [22], [25]. Das Material verliert in diesem Prozess jedoch seine ursprüngliche Funktion und Form. Das Produkt muss daher über die Materialphase zurück in die Nutzungsphase geführt werden, sodass viele Prozessschritte erneut durchgeführt und Ressourcen aufgewendet werden müssen. Daher ist ein „längerer“ Weg bis zur erneuten Nutzung zu durchlaufen. [26]

Im Gegensatz dazu ist „Reuse“ als Strategie mit geringem zusätzlichem Material- und Energieaufwand zu nennen. Unter Reuse versteht man die Wiederverwendung von einem Produkt, nachdem es von einem anderen Konsumenten nach der ersten Nutzungsphase ausrangiert worden ist [22]. Im Vergleich zur vorherigen Strategie des Recyclings nimmt das Produkt also einen sehr viel „kürzeren“ Weg bis in die erneute Nutzungsphase. Die Strategie „Repair“ wiederum beinhaltet den zusätzlichen Weg der Reparatur bzw. Wartung eines defekten Produkts, um die ursprüngliche Funktion wiederherzustellen, bevor es erneut im Markt zur Nutzung zur Verfügung steht [22].

Sollte das Reparieren nicht möglich sein, können anstatt materialerhaltender Tätigkeiten in Form des Recyclings weitere werterhaltende Maßnahme genutzt werden [26]: Beim „Refurbishment“ wird ein Produkt wieder auf den neuesten Stand aufbereitet. Das „Remanufacturing“ beschreibt das Zusammenspiel aus Prozessen zur Demontage auf Modul- bzw. Komponentenebene, um daraus neue Produkte herzustellen. Wenn die Wiederaufbereitung nicht mehr den notwendigen Funktionslevel erreichen kann, so werden die ausrangierten Güter in Produkten mit anderer Funktionalität eingesetzt. [22] Diese aufgezählten Möglichkeiten sind für die industrielle Nutzung von großem Interesse. Dabei spielt nicht nur der Beitrag zur Kreislaufwirtschaft eine Rolle, sondern auch die Aussichten, Funktionalitätserweiterungen anzubieten und wertschöpfend tätig zu sein. Für die Umsetzung der vorgestellten Strategien sind verschiedene Arbeiten durchzuführen: Generell

erfolgt zunächst meist eine Zustandsbewertung. Basierend auf dem tatsächlich festgestellten Zustand des Produkts erfolgt dann die Demontage. Die Komponenten werden für den erneuten Einsatz aufbereitet, ggf. ersetzt und entweder im ursprünglichen oder in neuen Produkten remontiert. Qualitätsprüfungen vervollständigen die Prozesskette. [16], [26], [27]

Wie in Abbildung 1 verdeutlicht, sind generell „Strategien kürzerer Wege“ zu bevorzugen, weil eine schnellere erneute Produktnutzung und ein verringerter Ressourcenverbrauch erreicht werden können [22]. Für ganzheitliche ökologische und ökonomische Vorteile durch R-Strategien muss zudem sichergestellt sein, Problemverlagerungen im Lebenszyklus zu vermeiden [28].

2.2 Potenziale und Herausforderungen des Remanufacturing

Nach einer Studie von PARKER *ET AL.* wird für die EU bis zum Jahr 2030 das Marktpotenzial von Remanufacturing auf bis zu 90 Mrd. € bewertet [29]. Vor allem die hohe Flexibilität bei der Komponentenverwendung der verschiedenartigsten Produkte und mit gegebenenfalls neuem Technologiestandard ist von Interesse [30], [31]. Sowohl das Refurbishment als auch das Remanufacturing stellt aus Sicht der industriellen Produktion ein großes, zu förderndes Potenzial dar, mit dem Ressourcen für eine nachhaltige Produktion zurückgewonnen und zusätzliche Geschäftsfelder erschlossen werden können [29], [30]. Für die Implementierung von R-Strategien im industriellen Kontext sind wirtschaftliche und ökologische Geschäftsmodelle unabdingbar. Hierfür sind einige Herausforderungen zu lösen:

- Gebrauchte Produkte müssen durch die entsprechend zu etablierenden Redistributionswege gesammelt werden [16], [26].
- Produkte sind häufig nicht demontagegerecht konstruiert, sodass die wirtschaftliche Demontage und Wiederherstellung erschwert ist [12], [26], [27].
- Die hohe Variantenvielfalt einiger Produktgruppen führt zu zusätzlicher Komplexität im Remanufacturing Prozess [32].
- Auch die unterschiedlichen Nutzungszeiten bis zur Rückführung und den folglich verschiedenen Technologien bei der Demontage muss begegnet werden [33].
- Eine Hürde für den weiteren industriellen Ausbau stellen insbesondere die hohen Lohnkosten, z. B. durch die manuelle Demontage, dar [29].
- Als zentrale Schwierigkeit muss eine Erfassung der tatsächlichen Beanspruchung der Komponenten über den gesamten Lebenszyklus ermöglicht werden, um die passenden Aufbereitungsprozesse effizient durchführen zu können [27], [34].

Eine wirtschaftliche Gestaltung der Strategien kann über die Automatisierung mit den Möglichkeiten zur Skalierung und Kapazitätserweiterungen erreicht werden [35]. Gleichzeitig stellen viele der aufgeführten Herausforderungen auch besondere Aufgaben für die Automatisierung in linearer Verkettung, insbesondere für die Demontagesysteme, dar [36]. Zudem fehlen erprobte Systeme, die die benötigte Flexibilität und Wandlungsfähigkeit für produktindividuelle Verwendungswege ermöglichen können. Es besteht ein Bedarf, die Szenarien an industriellen Anwendungsbeispielen zu validieren.

3 Demontage für wirtschaftliches Remanufacturing

Die Demontage ist ein zentraler Bestandteil des Remanufacturing. Sie ermöglicht es, das Produkt in seine Einzelteile zu zerlegen, sodass diese überprüft und gegebenenfalls repariert oder ersetzt werden können. Während die Montage als Sicherstellung der Funktionsfähigkeit eines Produktes durch das Zusammenfügen aller Komponenten definiert ist, beschreibt die Demontage den Prozess, Baugruppen, Bauteile oder Materialien aus einem Mehrkörpersystem für die weitere Verwendung oder Wiederaufbereitung zu gewinnen. [37] Obwohl Montage und Demontage ähnliche und teilweise gleiche Anforderungen an Kinematik und Werkzeuge stellen, kann die Demontage nicht als logische Umkehrung der Montage verstanden werden [37], [38 nach 39]. Besondere Herausforderungen stellen vor allem aufwendige Demontageprozesse durch nicht demontagegerechte Konstruktionen, heterogene Produktzustände [39] und vielfältige Produkt- und Variantenspektren dar. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist die Umsetzung eines adaptiven Demontagesystems notwendig. Hierfür sind Produkt-, Prozess-, und Systemtechnologien kontinuierlich weiterzuentwickeln.

Nachfolgend werden zunächst die Merkmale Demontagetiefe, Zerstörungsgrad und Adaptivität wirtschaftlicher Demontagesysteme vorgestellt (siehe Abbildung 2). Anschließend werden Produkt-, Prozess und Systemtechnologien als befähigende Technologien für wirtschaftliche Demontagesysteme aufgezeigt.



Abbildung 2: Merkmale eines wirtschaftlichen Demontagesystems

3.1 Zielbild eines wirtschaftlichen Demontagesystems

Die **Demontagetiefe** ist ein wichtiger Indikator für Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit eines Demontageprozesses. Rechtliche Rahmenbedingungen legen in der Regel die minimale Demontagetiefe fest. Diese umfasst alle Demontageoperationen, die für eine vollständige Schadstoffentsorgung gesetzlich vorgeschrieben sind. Die vollständige Zerlegung eines Altprodukts hingegen wird als maximale Demontagetiefe bezeichnet. Zwischen diesen beiden Extrema liegt die optimale Demontagetiefe. Sie wird aus dem Arbeits- und Kostenaufwand für die Demontage sowie aus dem Restwert der Komponenten

ermittelt und erfordert detailliertes Wissen über den Produktzustand, den Produktaufbau, die Verbindungstechniken und die Verfahren zur Lösung der Verbindungen. [40] Damit ein Demontagesystem möglichst wirtschaftlich und nachhaltig betrieben werden kann, gilt es, die optimale Demontagetiefe zu maximieren. Erreicht werden kann eine hohe Demontagetiefe vor allem durch ein entsprechendes Produktdesign, welches die Demontage erleichtert und den damit verbundenen Kostenaufwand reduziert.

Neben der Demontagetiefe ist der **Zerstörungsgrad** maßgeblich für die wirtschaftliche Effizienz des Demontageprozesses verantwortlich. Im Rahmen der Demontage wird zwischen zerstörungsfreier, teilzerstörender und zerstörender Demontage unterschieden [37]. Zerstörende Demontageprozesse werden vor allem für Komponenten angewendet, die recycelt werden. Sind Komponenten aufgrund von irreversiblen Verbindungen oder durch Bauteilveränderungen, wie Oxidation oder Schäden an Schraubköpfen, nicht mehr zerstörungsfrei demontierbar, ist die zerstörende Demontage der bevorzugte Weg [41]. Zerstörungsfreie Demontageschritte hingegen sind beispielsweise das Lösen von Schraubverbindungen oder Clipbefestigungen und eignen sich vor allem für Komponenten, die aufbereitet und wiederverwendet werden. Zwischen der zerstörenden und der zerstörungsfreien Demontage existiert die teilzerstörende Demontage. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass Bauteile keine Beeinträchtigungen erfahren, während das Verbindungselement zerstört wird [42]. Häufig bildet sie den Ausgangspunkt für zerstörungsfreie Demontageschritte. Eine wirtschaftliche Demontage erfordert, dass der Grad der Zerstörung beim Zerlegen des Produkts minimiert wird. Zum einen ermöglicht die zerstörungsfreie Demontage die Maximierung der Wiederverwendbarkeit der Komponenten. Zum anderen reduziert sie dadurch den Ressourceneinsatz im Rahmen der Wiederaufbereitung. Wie auch zur Erreichung einer optimalen Demontagetiefe, ist ein entsprechendes Produktdesign für einen minimalen Zerstörungsgrad essenziell.

Neben Demontagetiefe und Zerstörungsgrad beeinflusst vor allem die **Adaptivität** des Demontagesystems die Wirtschaftlichkeit des Remanufacturing. „Adaptivität“ wird in der Literatur definiert als die Fähigkeit, frühzeitige und vorausschauende Anpassungen der Strukturen und Prozesse wirtschaftlich zu bewerkstelligen [43]. Während einem flexiblen Demontagesystem die Fähigkeit zugeschrieben wird, auf sich ändernde Umstände kurzfristig reagieren zu können, zeichnet sich ein adaptives System dadurch aus, dass neben den kurzfristigen gleichberechtigt langfristigen Anpassungen vorgenommen werden können. Langfristige Anpassungen greifen in der Regel tiefer in die zugrunde liegende Struktur ein, sind mit größerem Aufwand an Zeit, Geld und Ressourcen verbunden und erlauben es, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit von Produktionssystemen auch über Jahre hinweg zu gewährleisten. Kurzfristige Anpassungen hingegen sind schnell, effizient und mit minimalen Investitionen vorzunehmen. Flexibilität beschreibt somit vielmehr die kurzfristige Anpassungsfähigkeit im Flexibilitätskorridor, während Adaptivität definiert ist als kurzfristige Flexibilität und langfristige Wandlungsfähigkeit.

In einem Demontagesystem existieren verschiedene Arten der Adaptivität, darunter Prozessadaptivität und Systemadaptivität. Unter Prozessadaptivität versteht man die Fähigkeit, auf Änderungen der Gegebenheiten durch die Anpassbarkeit von Prozessen und Verfahren aktiv und schnell zu reagieren [44]. Ein prozessadaptives System ist zum einen in der Lage, verschiedene Produktarten und Varianten unter Berücksichtigung produktspezifischer Demontageanforderungen zu demontieren. Zum anderen sind adaptive Prozesse essenziell bei der Demontage von Produkten mit unbekanntem Produktzustand. Unbekannte Produktzustände durch Verschmutzung, Zerstörung, Alterung, Verschleiß und Korrosion von Bauteilen beeinflussen die Prozessrandbedingungen und erfordern adaptive, individuelle Bearbeitungsstrategien.

Des Weiteren zeichnet sich ein adaptives Demontagesystem durch ein hohes Maß an Systemadaptivität aus. Systemadaptivität beschreibt die Anpassungsfähigkeit des Systems an äußere Bedingungen [45], wie Nachfrage am Markt oder Ressourcenverfügbarkeiten. Zu den wichtigsten Eigenschaften von adaptiven Systemen zählt die Rekonfigurierbarkeit. Diese erlaubt es, Kapazitäten, Funktionsinhalte und Technologien derart einzustellen [46], dass Systemeigenschaften wie Produktionsrate, Produktmix oder Ressourcen den äußeren Bedingungen angepasst werden können. Zusammenfassend zeichnet sich ein wirtschaftliches Demontagesystem durch folgende Eigenschaften aus:

- Maximierung der Demontagetiefe unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit
- Minimierung des Zerstörungsgrads zur Maximierung der Wiederverwendbarkeit
- Maximale Prozessadaptivität zur Demontage eines breiten Produkt- und Variationspektrums und zur Einführung produktindividueller Bearbeitungsstrategien
- Maximale Systemadaptivität zur Steigerung der Reaktionsfähigkeit auf äußere Einflüsse

Weiterentwicklungen in Produkt-, Prozess und Systemtechnologien tragen maßgeblich zur Erreichung des Zielbildes bei (siehe Abbildung 3).

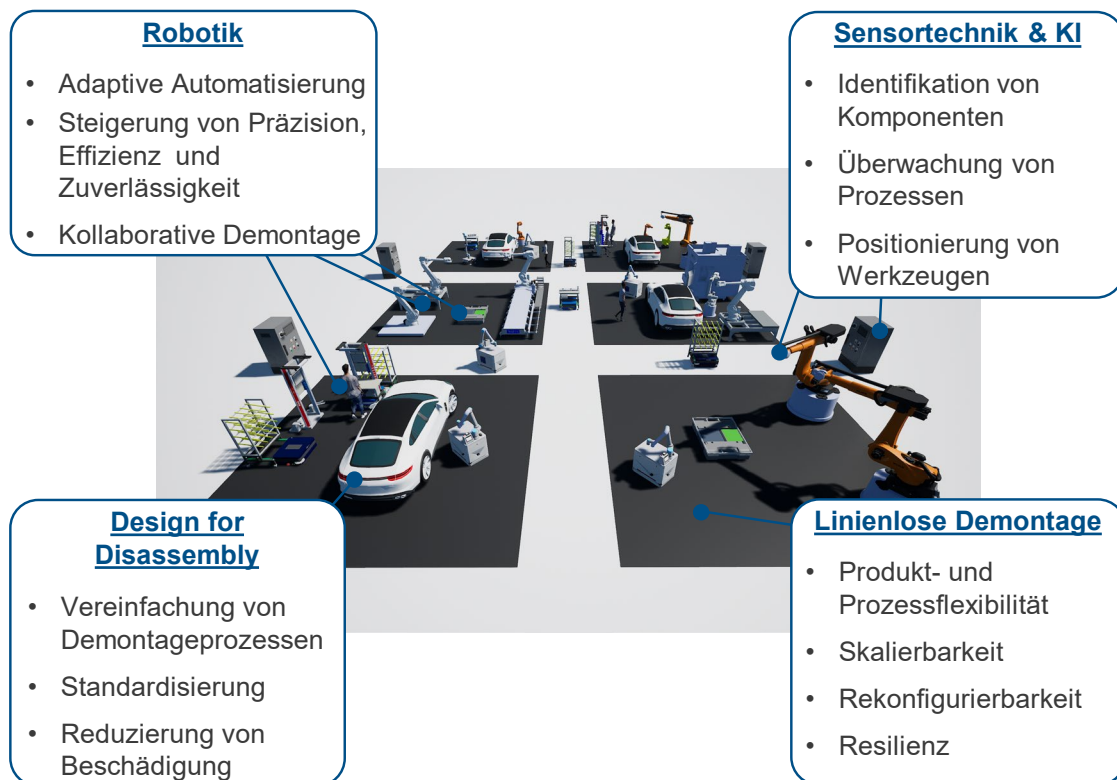


Abbildung 3: Zielbild für wirtschaftliche Demontagesysteme anhand beispielhafter Befähiger-technologien

3.2 „Design for Disassembly“ - Produkttechnologie als Befähiger für wirtschaftliche Demontagesysteme

„Design for Disassembly“ (DfD) ist ein Produktdesignansatz, der darauf abzielt, die Zerlegung von Produkten in ihre einzelnen Komponenten zu erleichtern, um die Wiederverwendung, das Recycling oder die Aufbereitung dieser Komponenten zu ermöglichen [47]. Das Konzept von DfD besteht darin, Produkte so zu gestalten, dass sie leicht und mit

minimalem Aufwand zerlegbar sind und die Beschädigung der Komponenten während der Demontage minimiert wird. Das primäre Ziel von DfD kann durch eine Vielzahl von Designtechniken erreicht werden. Zu diesen zählen:

- modulares Design
- die Auswahl und Verwendung von Materialien
- die Verwendung von mechanischen Befestigungstechnologien
- eindeutige Kennzeichnung von Komponenten und Materialien. [48]

Modulares Design als Kernelement des DfD-Ansatzes zielt darauf ab, durch modulare Produktarchitekturen Komplexität zu reduzieren und Synergien zu schaffen [49]. Vor allem die Modulbauweise variantenreicher Produkte erweist sich entlang aller Lebensphasen als vielversprechende Maßnahme. Im Rahmen des Remanufacturing bieten modulare Produktarchitekturen vor allem den Vorteil standardisierter Demontageprozesse und begünstigen somit die Prozessautomatisierung.

Neben modularem Design sind die Auswahl und Verwendung von geeigneten Materialien relevant. Design for Disassembly erfordert eine umfassende Untersuchung der eingesetzten Materialien, um diejenigen auszuwählen, die niedrige Umweltauswirkungen haben, die für Montage- und Demontageprozesse geeignet sind und zusätzlich ein hohes Recyclingpotenzial besitzen [48].

Die Verwendung von mechanischen Befestigungstechnologien wie Steckverbindungen, Schraubverbindungen und Verriegelungsmechanismen ist ein zentraler Bestandteil von DfD. Im Gegensatz zu stoffschlüssigen Verbindungen bieten diese den Vorteil der zerstörungsfreien Demontage, sodass die Anzahl wiederverwendbarer Komponenten erhöht und Kosten für Demontageprozesse gesenkt werden können.

Durch die eindeutige Kennzeichnung von Materialien und Komponenten wird das Ziel verfolgt, die Identifizierung und Trennung von Materialien während des Demontageprozesses zu erleichtern. So können Materialien für das Recycling oder die Wiederaufbereitung sortiert, die Rückverfolgbarkeit der Materialien gewährleistet und die Planung der weiteren Verwendung erleichtert werden [48].

Insgesamt kann DfD eine wesentliche Befähigertechnologie zu wirtschaftlichem Remanufacturing sein, die dazu beiträgt, dass Produkte effizient zerlegt, Komponenten wiederverwendet und Materialien recycelt werden.

3.3 Robotische Automatisierung, KI-Entwicklung & Sensortechnik - Prozesstechnologien als Befähiger für wirtschaftliche Demontagesysteme

Die Automatisierung von Demontageprozessen gilt als zentrale Befähigertechnologie für die Umsetzung wirtschaftlicher Demontagesysteme. Sie ermöglicht es, die Effizienz und Genauigkeit der Prozesse zu erhöhen, die Anzahl der Fehler zu reduzieren und trägt maßgeblich zur Senkung der Kosten bei. Der optimale Automatisierungsgrad des Demontagesystems ist anhand der auf Abbildung 4 dargestellten Faktoren zu wählen.

Manuelle, roboterassistierte und vollautomatisierte Demontage lassen sich anhand ihrer Eigenschaften gegenüberstellen und durch Entwicklungen in den Bereichen KI und Sensortechnik hinsichtlich der Prozessadaptivität von Demontagesystemen steigern.

Die **manuelle Demontage** zeichnet sich durch den höchstmöglichen Adaptivitätsgrad aus, da sie die Möglichkeit bietet, auf unvorhergesehene Gegebenheiten im Demontageprozess reagieren zu können [50]. Manuelle Demontagesysteme sind stufenweise ausbaufähig und im Vergleich zu höheren Automatisierungsgraden mit geringeren Fixkosten für Betriebsmittel verbunden. Geringere Produktivität, hohe Personalkosten und nicht sicher reproduzierbare Qualität hingegen sind Defizite von manueller gegenüber automatisierter Demontage. Insbesondere bei einer hohen Produkt- und Variantenvielfalt stellt die Identifikation von Komponenten eine zusätzliche Herausforderung dar. Abhilfe schaffen an dieser Stelle bildbasierte **KI-Systeme** zur Werkerassistenz [51]. Sie unterstützen beispielsweise bei der Identifikation von Bauteilen, bei denen Typenschilder und Seriennummern nicht mehr lesbar sind oder bei der Zustandsbewertung. Eine Zusammenarbeit zwischen Demontagepersonal und KI-System ermöglicht somit, die Vorteile beider zu kombinieren, Hindernisse und Schwierigkeiten in der Sortierung zu überwinden und die Fehlerquote bei der Identifikation von Produkten zu reduzieren.

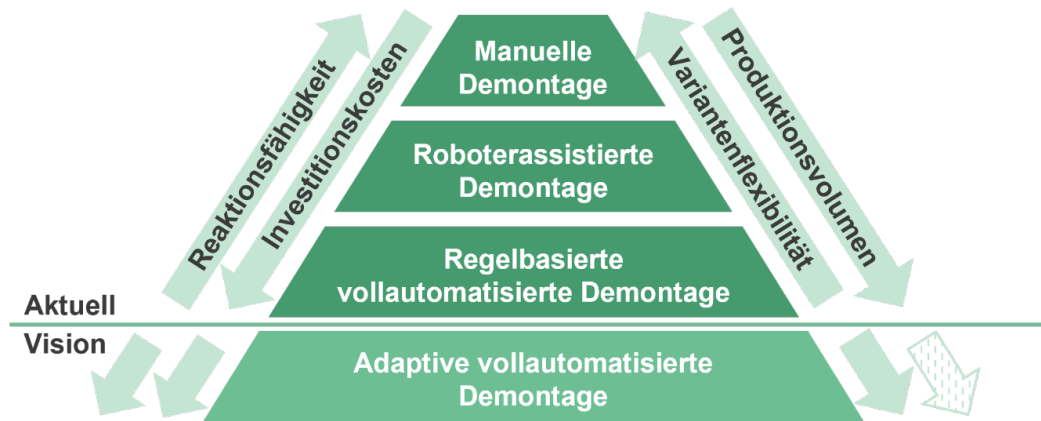


Abbildung 4: Faktoren zur Bestimmung des Automatisierungsgrads von Demontagesystemen, in Anlehnung an [50]

Zur Steigerung der Effizienz und somit des Demontagevolumens stellt die **roboterassistierte Demontage** eine mögliche Erweiterung der manuellen Demontage dar [11]. Im Rahmen der roboterassistierten Demontage arbeiten Mensch und Maschine gemeinsam am zu zerlegenden Objekt [52]. Während der Mensch komplexere Aufgaben ausführt, unterstützt der Roboter bei der Durchführung von wiederkehrenden und zeitintensiven Arbeitsschritten. Zu den Aufgaben des Menschen zählen das Trennen von komplexen Bauteilverbindungen, die Handhabung biegeschlaffer Bauteile oder die Durchführung manueller Prüfaufgaben. Der Roboter hingegen löst parallel Schrauben und Bolzen, deren Position im Vorfeld manuell eingelernt oder über eine Kamera erkannt wurde, und übernimmt Handhabungsaufgaben. Vorteile der roboterassistierten Demontage bestehen neben gesteigerter Produktivität darin, dass der Mensch entlastet und weniger Risiken ausgesetzt wird, indem der Roboter unter anderem das Heben schwerer Lasten oder das Entfernen von Gefahrstoffen übernimmt. [52]

Für Demontageaufgaben von gleichen und modularisierten Produkten in hohen Losgrößen sind häufig **vollautomatisierte Demontagesysteme** zu bevorzugen. Während in der Montage vollautomatisierte Prozesse bereits etabliert sind, sind sie in der Demontage noch kaum zu finden. Pilotprojekte zeigen jedoch, dass die Automatisierung der Demontage mittels SCARA- und 6-Achs-Robotern großes Potenzial birgt [53], [54]. Die für automatisierte Demontageprozesse verwendeten Werkzeuge lassen sich prinzipiell in Handhabungs- und Trennwerkzeuge einteilen [55]. Zu den Handhabungswerkzeugen zählen

beispielsweise Saug- oder Fingergreifer. Trennwerkzeuge können sowohl zerstörungsfreie Werkzeuge wie Schraubendreher oder zerstörende Werkzeuge, wie Bohrspindeln und Plasmaschneider, sein. Adaptivität auf Prozessebene wird in vollautomatisierten Demontagesystemen durch Multifunktionswerkzeuge und Werkzeugwechselsysteme sowie produktindividuelle Programmierung und den Einsatz von KI-Algorithmen erreicht.

Die Fähigkeit, kurzfristige Prozessanpassungen vorzunehmen, ist für die Automatisierung von Demontageprozessen von besonderer Relevanz. **Sensorische Fähigkeiten** von roboterassistierten und automatisierten Demontagezellen sind maßgeblich am Fortschritt dieser Entwicklung beteiligt. Fertigungstoleranzen, die Änderung geometrischer Abmessungen durch Verschleiß, die Verformung durch Prozesskräfte sowie steigende Produkt- und Variantenvielfalt stellen sowohl für die industrielle Produktion als auch für die Automatisierung der Demontage eine enorme Herausforderung dar. Zur Bewältigung der ihnen zugewiesenen Aufgaben müssen Demontageroboter somit ein gewisses Maß an Entscheidungsfreiheit aufweisen. Nach NEHMZOW impliziert Entscheidungsfreiheit „*die Fähigkeit der Maschine, ihren Handlungsablauf durch eigene Inferenzprozesse zu bestimmen, statt einer festgelegten, rigiden Anweisungssequenz von außen zu folgen*“ [56]. Ein Roboter muss demnach seine Umgebung wahrnehmen und interpretieren, einen Handlungsplan zur Bewältigung der Aufgabe definieren und schließlich eine entsprechende Aktion ausführen [56]. Die Wahrnehmung der Umgebung und der inneren Zustände von Robotern erfolgt durch den Einsatz von Sensoren. Sie erlauben es dem Roboter, seinen eigenen Zustand, wie die Position eines Roboterarms oder von Endeffektoren, zu bestimmen, Berührungen wahrzunehmen, Entfernungen zu Objekten zu messen oder Bilder der Umgebung aufzuzeichnen [57]. Die Fusion von Sensordaten aus verschiedenen Quellen und deren Interpretation erlauben somit eine Kompensation von Positionier- und Bauteilabweichungen und ermöglichen im Allgemeinen eine adaptive Prozessanpassung.

Insgesamt trägt die technologische Entwicklung in den Bereichen Automatisierung, Sensortechnik und KI maßgeblich dazu bei, kostenintensive manuelle Demontageprozesse durch automatisierte adaptive Prozesse zu ersetzen und somit Remanufacturing wirtschaftlich zu realisieren.

3.4 Linienlose Montage - Systemtechnologie als Befähiger für wirtschaftliche Demontagesysteme

Für die erfolgreiche Implementierung eines wirtschaftlichen Demontagesystems ist die Wahl einer geeigneten Organisationsform essenziell. Mit ihr werden die grundlegenden Eigenschaften des Systems, wie Flexibilität und Adaptivität, aber auch die räumlichen und zeitlichen Zusammenhänge festgelegt [58]. Schwankungen im Produktionsvolumen, die Integration neuer Produkte und Prozesse sowie hohe Variantenflexibilität stellen besondere Herausforderungen an Demontagesysteme.

Die **getaktete Fließmontage** basiert auf einer räumlich und zeitlich starren Verkettung von Montagestationen. Aufgrund der räumlichen Verkettung können Stationen im Prozess weder übersprungen noch nachträglich hinzugefügt werden, während durch die zeitliche Verkettung Aufträge nur dann weitergegeben werden können, wenn die nachfolgende Station ihren Auftrag ebenfalls weitergegeben hat. Durch die räumlich und zeitlich starre Verkettung ergibt sich somit eine gemeinsame Taktzeit für alle Stationen. [36] Durch Produktvarianten mit dann variierenden Arbeitsinhalten und Prozesszeiten sinkt die Effizienz der getakteten Fließmontage. Demnach eignet sich die getaktete Fließmontage vor allem für Demontageprozesse von Standardprodukten ohne große Varianten-

vielfalt in hohen Stückzahlen. Andere Organisationsformen, wie beispielsweise die **Einzelplatzdemontage**, **Baustellendemontage** oder **Werkstattdemontage** ermöglichen zwar eine höhere Prozess- und Systemadaptivität, sind aber zum wirtschaftlichen Betrieb von Großserien nicht geeignet.

Die Organisationsform der sogenannten **linienlose Montage** schafft an dieser Stelle Abhilfe und leitet einen Paradigmenwechsel in der Gestaltung von Montagesystemen ein. Ein linienloses Montagesystem unterscheidet sich dadurch von der klassischen Fließmontage, dass die Komponenten nicht auf festgelegten Wegen, wie einem Förderband, durch die Montagesstationen geleitet werden. Stattdessen kann jedes Produkt individuell durch das Montagesystem geführt werden und muss nicht mehr einem festen Takt folgen. Die linienlose Montage zeichnet sich demnach vor allem durch produktindividuelle, flexible Montageabfolgen und die Koordination des Materialflusses durch ein ereignisbasiertes Leitsystem aus, welches Auftragsrouten anhand des System- und Produktstatus autonom bestimmt [36]. Skalierbarkeit, Stationsrekonfigurationen im laufenden Betrieb und die Abbildung variantenreicher Prozesse erhöhen die Ressourcennutzung des Produktionssystems und schaffen über organisatorisch induzierte Redundanz die Grundlagen, welche die linienlose Organisationsform nicht nur für Montagesysteme, sondern auch für Demontagesysteme begünstigt. Durch die Möglichkeit, das System, um zusätzliche Stationen zu ergänzen, sowie durch hohe Flexibilität gegen Produkt- und Prozessvariationen oder Störungen, eignet sich die linienlose Organisationsform außerdem für kombinierte Montage- und Demontagesysteme. Ein kombiniertes Montage- und Demontagesystem ist ein Fertigungssystem, das in der Lage ist, sowohl Produkte aus Einzelteilen zusammenzubauen als auch Produkte in Einzelteile zu zerlegen. Diese Systeme sind so konzipiert, dass sie eine flexible und effiziente Produktion ermöglichen, indem die Rückgewinnung von Materialien und die Wiederaufbereitung von Produkten in den Produktionsprozess integriert wird. Dies schafft Lieferantenunabhängigkeit und ermöglicht eine partielle Entkopplung von globalen Einflüssen.

Eine linienlose Organisationsform birgt somit großes Potenzial, um erfolgreich in Demontage- als auch in kombinierten Montage- und Demontagesystemen eingesetzt zu werden. Vor allem durch die geschaffenen Synergien und den hohen Adaptivitätslevel grenzt sie sich von anderen Organisationsformen ab und schafft die Möglichkeit, Remanufacturing Systeme wirtschaftlich zu betreiben.

4 Use Cases

Im Folgenden werden drei Beispiele aus Unternehmen der Expertengruppe vorgestellt, die konkrete Anwendungen zur Schließung von Stoffkreisläufen aufzeigen. Das Beispiel der Firma Miele & Cie. KG stellt das Refurbishment von Waschmaschinen vor. Bei der Ford Werke GmbH steht das zukünftige flächendeckende Remanufacturing von Fahrzeugbatterien im Fokus. Im dritten Use Case werden die Möglichkeiten der Schuhaufbereitung durch PCH Innovations vorgestellt. Die im Folgenden beschriebenen Beispiele zeigen die aktuellen Überlegungen zur Kreislaufwirtschaft in drei sehr verschiedenen Branchen, die sich sowohl im Markt als auch in der Produktgestaltung und den zu erwartbaren Rückläuferquoten unterscheiden. In den Use Cases werden konkrete Potenziale von R-Strategien, die Umsetzung der notwendigen Demontage und die resultierenden Herausforderungen für die Unternehmensbereiche diskutiert.

4.1 Refurbishmentprozesse für Second-Life Waschmaschinen

Ausgangssituation

Die Umsetzung von Kreislaufstrategien stellt auch für etablierte Unternehmen eine wichtige Perspektive dar. Mit über 23.000 Mitarbeitenden erwirtschaftete die Miele & Cie. KG im Geschäftsjahr 2022 einen Umsatz von 5,43 Mrd. €. In ihrer aktuellen Unternehmensstrategie wird das Thema Nachhaltigkeit explizit als eine der tragenden Säulen implementiert. Auf diese Weise begegnet Miele den gesellschaftlichen Herausforderungen und der erweiterten Produktverantwortung, aber auch der gestiegenen Nachfrage nach nachhaltigen und langlebigen Produkten. Als weltweit führender Anbieter von Premium-Haushaltsgeräten sowie von Premium-Elektrogeräten für den gewerblichen Einsatz gilt daher dem Bereich Kreislaufwirtschaft und damit einhergehend Second-Life-Produkten ein besonderes Augenmerk, der am Business Case der Waschmaschine umgesetzt wird. Dazu findet seit Herbst 2022 in einem regional begrenzten Vertriebsbereich das sogenannte Refurbishment – also die Wiederaufbereitung – von Waschmaschinen statt.

Tabelle 1: Kurzübersicht Miele & Cie. KG Use Case

Unternehmen:	Miele & Cie. KG
Produkt:	Waschmaschine
R-Strategie:	Refurbishment
Haupt Herausforderungen:	Produktvarianz und -komplexität
Wichtigste Befähigertechnologie:	Adaptive Prozessautomatisierung

Ziel des Anwendungsfalls und Aufbau des Produkts

Ziel des Anwendungsfall ist es, das Refurbishment von hochwertigen Geräten und somit von Verwendungswegen im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu etablieren. Je nach Typ, Alter und Zustand der Waschmaschine muss der Aufbereitungsprozess adaptiv auf das vorliegende Produkt angepasst werden. Hierfür sind geeignete Demontagesysteme notwendig. Das Potential zum Refurbishment leitet sich aus der Überlegung ab, dass die angebotene Waschmaschine auch bisher so ausgelegt ist, dass nach einem langen ersten Lebenszyklus beim Kunden das Produkt grundsätzlich weiterhin funktionsfähig ist und daher noch nicht dem Rohstoffrecycling zugeführt werden sollte. Somit stellt das Refurbishment von Haushaltsgroßgeräten nicht nur eine Reaktion auf zukünftige Verordnungen zur Kreislauffähigkeit von Produkten, sondern auch einen interessanten Business Case dar. In dem regional begrenzten Vertriebsbereich befindet sich der Anteil wiederaufbereiteter Geräte derzeit noch im einstelligen Prozentbereich und soll weiter ausgebaut werden.

Für das benötigte Demontagesystem ist es notwendig, den Produktaufbau zu betrachten. Grundsätzlich bleibt die individuelle Waschmaschine als Produkt bestehen und bildet das Gerüst des Refurbishments. Verschiedene Komponenten werden jedoch aufbereitet oder getauscht sowie in jedem Falle gereinigt. Es wird generell nicht eine hohe Demontage-tiefe bis auf die einzelnen Komponentenbestandteile benötigt, sondern die Zugänglichkeit für den Austausch ist entscheidend. Gleichzeitig sollen die Komponenten mit einem geringen Zerstörungsgrad austauschbar sein.

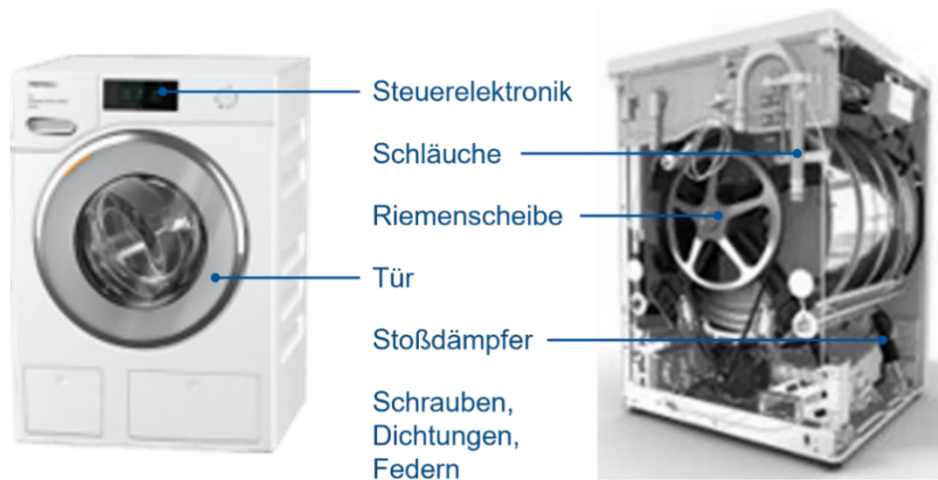


Abbildung 5: Beispielhafte Auswahl von Waschmaschinen-Komponenten, die im Refurbishment-Prozess getauscht werden können (Quelle: Miele)

Abbildung 5 zeigt exemplarisch den Aufbau einer Waschmaschine und mögliche Bauteile, die potenziell im Rahmen der Wiederaufbereitung zu untersuchen sind. Zu diesen gehören beispielsweise die Gebrauchsteile Schläuche, die Riemenscheibe oder die Stoßdämpfer, aber auch die Tür sowie die Steuerelektronik. Dieser Vorgang bietet dann auch die Möglichkeit das Gerät z. B. durch Softwareupdates aufzuwerten. Der Variabilität der Komponenten sowie ihren – in jedem Gerät unterschiedlichen – Zustand muss in einem Refurbishment-System begegnet werden.

Eigenschaften des Demontagesystems

Die Aufbereitung von Miele Waschmaschinen erfolgt nach einer umfassenden Prozesskette, die in den Grundzügen im Folgenden gemäß Abbildung 6 erläutert wird:



Abbildung 6: Vorgesehene Refurbishment Prozesskette für die Second-Life Waschmaschine (Quelle: Miele)

Zustandsbewertung. Es erfolgt eine zentrale Sammlung der Geräte durch den Kundendienst als eigene Logistiklösung. Der Produktzustand wird geprüft und die technische Aufbereitung sowie deren Wirtschaftlichkeit hinsichtlich Aufbereitungsdauer und Teilekosten werden mit Hilfe einer eigenen Softwarelösung bewertet.

Automatisierte Montageplanung. Sofern die technische Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Aufbereitung gegeben sind, wird softwaregestützt die Detailplanung des Aufbereitungsprozesses durchgeführt. Es wird eine gerätespezifische Planung der De- und Remontageprozesse durch die Bestimmung der zu tauschenden Komponenten durchgeführt. Die Demontagetiefe wird dabei in Abhängigkeit vom Zustand der zu tauschenden Komponenten individuell bestimmt. Auch der notwendige Zerstörungsgrad wird je nach Zustand und Produktmodell festgelegt.

De- und Remontage. Nach durchgeführter Planung folgen die Prozesse Demontage, Teiletausch und Remontage. Zunächst werden hierfür die in der Vorprüfung ermittelten Teile, darunter auch „hygienisch belastete“ Teile, demontiert. Im Anschluss werden die zu tauschenden Komponenten unter Berücksichtigung der gerätespezifischen Refurbishment-Planung ersetzt und die Waschmaschine wird in ihrer Gesamtheit remontiert. Diese De- und Remontagetätigkeiten sind je nach Produkttyp und -zustand starken Schwankungen unterlegen. Verschiedene Lösungskomponenten unterstützen beim Erreichen des Zielbildes: Als Teil eines demontagegerechten Produktdesigns reduziert die weitgehende Vermeidung von stoffschlüssigen Verbindungen, wie z. B. durch Klebprozesse, den Demontageaufwand sowie die -kosten erheblich und verringert den Zerstörungsgrad im Prozess. Weiterhin handelt es sich in der bisherigen Gestaltung um eine Werkstattmontage, in der der Automatisierungsgrad gering und auf punktuelle Prozessschritte beschränkt ist. Der hohe Adaptivitätslevel manueller Prozesse ermöglicht es, auf unvorhergesehene Gegebenheiten individuell zu reagieren. Das Gesamtsystem richtet sich zurzeit vor allem nach dieser hohen Prozessadaptivität. Gleichzeitig ist die Systemadaptivität – also z. B. die Anpassung der Produktionsrate – bisher niedrig priorisiert, weil der vorgestellte Use Case neu in der Umsetzung ist.

Software Update. Nach erfolgreicher Remontage wird die Software der Waschmaschine aktualisiert. Je nach Alter und Ausstattung können die Waschmaschinen dadurch auch eine zusätzliche Wertsteigerung erfahren.

Automatisierte Funktionstests. Im anschließenden Prozessschritt wird eine vollautomatisierte Teststation durchlaufen. Diese stellt sicher, dass die Maschine vollständig funktionsfähig ist, bevor ein Aufbereitungszertifikat ausgestellt wird.

Hygienische Reinigung. Nach Abschluss der Funktionsprüfung erfolgt die hygienische Reinigung. Dabei werden die äußeren und vor allem die inneren hygienisch belasteten Komponenten, wie die Trommel, intensiv gereinigt.

Vorbereitung Versand. Zuletzt wird die aufbereitete, überprüfte und gereinigte Maschine für den Versand vorbereitet und ausgeliefert.

Herausforderungen und nächste Schritte

Mit dem neuen Business Case des Refurbishments von Waschmaschinen stellen sich für Miele gleichzeitig technische und betriebswirtschaftliche Herausforderungen, die sich aus dem Produkt und dem Demontagesystem ergeben:

Vor allem die angesprochene hohe Produktvarianz und Produktkomplexität erfordern eine hohe Adaptivität der Prozesse sowie des Gesamtsystems. Aufgrund der regionalen Begrenzung des Vertriebsbereichs der Second-Life-Waschmaschinen ist die Stückzahl refurbisierter Geräte im Vergleich zur Neuproduktion derzeit noch gering. Demnach ist es möglich, De- und Remontageprozesse größtenteils manuell durchzuführen. Diese manuellen Tätigkeiten ermöglichen zwar produktindividuelle Demontageprozesse; sie sind jedoch mit steigenden Stückzahlen zu automatisieren, um die Skalierbarkeit und damit die Wirtschaftlichkeit des Business Cases sicherzustellen. Gerade diese Automatisierbarkeit

muss jedoch aufgrund der gezeigten Teilevielfalt und den individuellen Prüfergebnissen die hohe Prozessadaptivität weiterhin gewährleisten können. Hierfür werden adaptive Demontagesysteme benötigt, die die Möglichkeit bieten, den vorgestellten Business Case zu skalieren und dadurch industriell auszuweiten. Auch kann auf diese Weise die Systemadaptivität des Zielsystems gesteigert werden, weil das System variabel auf unterschiedliche Stückzahlen und schwankende Losgrößen eingehen kann. Potenziale für die Automatisierung des Demontagesystems bietet zunächst das bereits bekannte Montagesystem, da hierbei für die ersten Automatisierungsschritte auf Parallelen zurückgegriffen werden kann. Die vollständige Automatisierung der Demontage stellt dann eine langfristige Aufgabe aufgrund der für die verschiedenen Produktzustände notwendigen Adaptivität dar. Hinzu kommt der Bedarf an entsprechenden Planungs- und Steuerungsprozessen in der Demontage. Zudem stellt die Nutzung von Daten einen zentralen Befähiger adaptiver Prozesse dar: Sensorik ermöglicht die Prozessanpassung der Demontagetätigkeiten basierend auf dem tatsächlichen Zustand der Komponenten.

Zusammenfassend lässt sich daher sagen, dass bei Miele die Geschichte traditionell langlebiger Produkte eine Fortschreibung erfahren hat: Durch eine zertifizierte Aufbereitung kann zusätzlich ein „Second-Life“ für diese Geräte ermöglicht werden, sodass die Lebensdauer über den ersten Lebenszyklus hinweg verlängert wird. Refurbishment mit adaptiver Demontage trägt somit auf neuartige Weise zu Ressourcenkreisläufen bei und kann sogar neue Käuferschichten erschließen. Darüber hinaus kann sich in Zukunft über Leasing-Modelle und „Pay-per-Use-Optionen“ der Kund:innenkreis für aufbereitete Geräte noch weiter erhöhen. Für die Erschließung größerer Märkte stellen insbesondere die Automatisierung des Demontagesystems und der Erhalt der Adaptivität zentrale Aufgaben dar.

4.2 Demontage von PKW-Batteriekästen

Ausgangssituation

Die Ford Motor Company ist ein weltweit agierender Automobilkonzern mit 186.000 Mitarbeitenden (2020) und 136,3 Mrd. USD Umsatz (2021) [59]. In dem globalen Bestreben zur Reduktion von CO₂-Emissionen haben sich die EU-Mitgliedsstaaten im EU-Umweltrat 2023 darauf geeinigt, dass ab 2035 neuzugelassene Fahrzeuge keine CO₂-Emissionen mehr ausstoßen dürfen [60]. Ford of Europe hat in diesem Zuge angekündigt, bereits ab 2030 in Europa ausschließlich elektrische Fahrzeuge herzustellen und anzubieten [61]. In der Ford Werke GmbH in Köln sollen ab 2023 reine Elektrofahrzeuge auf einer VW-Plattform hergestellt werden. Da Hersteller von Batterien durch die EU-Batterierichtlinie verpflichtet sind, ein Rücknahmesystem anzubieten und strenge Sammelquoten zu erfüllen [62], rechnet Ford in der EU in 10-15 Jahren mit mehreren Hunderttausend Rückläufer-Batterien jährlich. Die verbauten Batterien müssen am Ende ihrer Nutzungsphase dem Recycling zugeführt werden, haben aber mit der aktuellen Zelltechnologie auch weiteres Potenzial für Second Life-Anwendungen.

Tabelle 2: Kurzübersicht Ford Motor Company Use Case

Unternehmen:	Ford Motor Company
Produkt:	Antriebsbatterie von Elektrofahrzeugen
R-Strategie:	Remanufacture, Repurpose, Recycling
Haupt Herausforderungen:	Rückführungslogistik und rechtliche Rahmenbedingungen
Wichtigste Befähigertechnologie:	Design for Disassembly

Ziel des Anwendungsfalls und Aufbau des Produkts

Das Ziel eines adaptiven Demontagesystems bei Ford ist es, Batterien bis auf Modulebene zerstörungsfrei zu demontieren, um sie so auf verschiedene Arten in die Kreislaufwirtschaft zurückführen zu können. Dafür sind bereits Forschungsprojekte mit Partnern und Hochschulen gestartet, mit deren Ergebnissen Pilotanlagen aufgesetzt werden können. Folgende Wege für die Rückführung in der Kreislaufwirtschaft sind aktuell denkbar:

- Die Batterie wird demontiert und neu zusammengestellt sowie getestet, um als Ersatzbatterie oder für Gebrauchtwagen in den Markt gebracht zu werden (Remanufacturing).
- Die Batterie wird für einen anderen Einsatzzweck, wie z. B. in stationären Speichern bei anderen Unternehmen, genutzt (Repurposing).
- Die wertvollen Metalle der Batterie werden zurückgewonnen und für die Herstellung neuer Batterien genutzt (Recycling).

Neben dem Zustand der Batterien ist die Art der Rückführung abhängig von der verwendeten Zellchemie. Aktuell konkurrieren Lithium-Ionen-Batterien mit Kathodenmaterial basierend auf Nickel, Mangan und Cobalt (NMC) in unterschiedlicher Zusammensetzung mit Batterien, die ohne diese teils teuren und in Bezug auf die Gewinnung und die Sicherheit bei mechanischen und thermischen Einflüssen problematischen Grundstoffe auskommen. Lithium-Eisenphosphat (LFP) Batterien stellen eine solche Alternative innerhalb des oben erwähnten Zeithorizonts dar. Dies führt zu einer hohen Produktvariabilität und damit Komplexität für die Aufbereitungsprozesse.

Der derzeitige, generelle Aufbau der Batterie eines E-Fahrzeuges ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Batterie mit ihren einzelnen Modulen ist im Fahrzeug in einem Batteriekasten eingebettet. Dort befinden sich außerdem Steuerungssystem, Kühlanlage und Verkabelung. Durch den modularen Aufbau der Batterie ist generell eine hohe Demontagetiefe möglich. Neben den wertvollen Batteriemodulen können die anderen Komponenten unterschiedliche Wege nehmen: Die Metallplatten und Batteriekästen sind voraussichtlich einzuschmelzen, da sich zum einen das Design für neue Fahrzeuge innerhalb der Lebenszeit des Fahrzeugs geändert hat und zum anderen die Alterung durch äußere Einflüsse signifikant ist. Die Zähflüssigkeit gealterter Kühlflüssigkeit führt bei der Demontage der Platten zur Verformung, was eine Wiederverwendung zum heutigen Stand ausschließt. Die Verkabelung wiederum kann z.B. über das bereits heute schon existierende Recycling der Kreislaufwirtschaft zurückgeführt werden. Eine Erhöhung der Zähigkeit gealterter Wärmeleitpasten führt in einigen Batteriedesigns, bei der Demontage der Platten,

zu Verformungen, was eine Wiederverwendung ausschließt. Neuere Designs haben dieses Problem bereits gelöst.

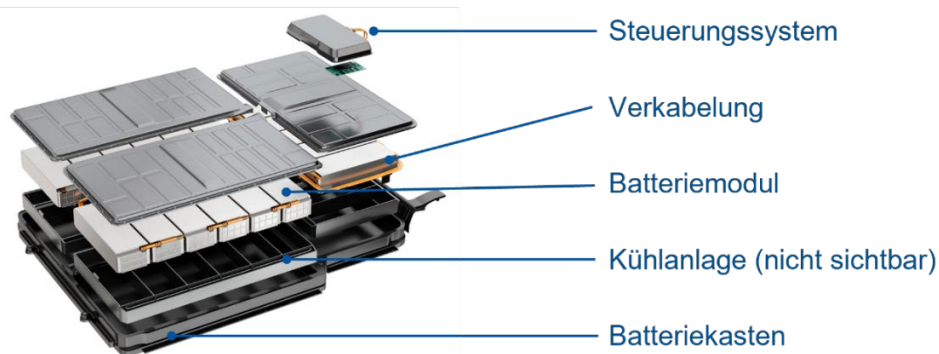


Abbildung 7: Schematischer Aufbau eines Batteriekastens © iStock

Eigenschaften des Demontagesystems

In der technischen Ausgestaltung des Demontagesystems in Hinblick auf die in Kapitel 3 vorgestellten Lösungsbausteine ergeben sich je nach Anforderung Möglichkeiten, die an dieser Stelle diskutiert werden.

Die Stahlkonstruktion des Batteriekastens schützt die wertvollen Batteriemodule vor äußeren Einflüssen. Bisherige Tests deuten darauf hin, dass Korrosion vermutlich keine großen Auswirkungen auf das System hat und innen liegende Komponenten bei der Rückführung gut erhalten sind. Dies bedeutet geringere Anforderungen an die Prozessadaptivität, da nicht so stark auf mechanische Veränderungen reagiert werden muss. Mechanische Prüfungen sind automatisiert möglich, wie es auch bereits bei z. B. Nähten und Verschraubungen in der Fertigung der Fall ist. Der Automatisierungsgrad der Demontage kann also in einem ähnlichen Bereich wie bei der Montage liegen. Allerdings sind weitere sensorische Fähigkeiten für die Erkennung von Varianten erforderlich. Wenn in dem Demontagesystem ausschließlich herstellereigene Systeme vorliegen, können die Fahrzeug-IDs mit der eigenen Datenbasis abgeglichen werden und vorbestimmte Demontage-Anweisungen geladen werden. Neben einer vollautomatisierten Demontage ist die in Kapitel 3 beschriebene roboterassistierte Demontage denkbar. Gerade die Handhabung von schweren Komponenten, die Übernahme von wiederholenden Tätigkeiten wie das Entfernen von Schrauben oder der Umgang mit Giftstoffen kann in einer Mensch-Maschine-Kollaboration von Robotern übernommen werden.

Logistische Fragestellungen beeinflussen die Organisationsform. Fahrzeuge müssen dezentral entgegengenommen werden. Bevor der Batteriekasten zentral komplett demontiert werden kann, muss er aus dem Fahrzeug herausgenommen werden. Dies kann dezentral in den Annahmestellen oder zentral bei den Demontagesystemen geschehen. Da der Transport von Batteriekästen ohne Fahrzeug zwar kompakter ist, aber hohe Sicherheitsanforderungen hat, ist die Festlegung aktuell noch in Diskussion. Die anschließende Demontage kann anders als die Montage in festen Fertigungslinien in Modulen aufgebaut sein, um auf schwankende Stückzahlen reagieren zu können.

Eine hohe Bedeutung für die Ausgestaltung des Demontagesystems kommt außerdem Design for Disassembly-Ansätzen zu. Die Batterie ist eine statische Komponente innerhalb des Fahrzeugdesigns und kann so aufgebaut werden, dass sie leicht zu demontieren ist. Allerdings gibt es aus Platz- und Designgründen den Trend, die Batterie in die existierende Fahrzeugstruktur zu integrieren. Dies führt zu höherer Komplexität und Produktvarianz. Aktuell gibt es noch Designs bei denen die Deckel der Batteriekästen verklebt

werden, was die Demontage erschwert. Die Integrationsmöglichkeiten in die Fahrzeugstruktur und der Einsatz von Verschraubungen in Zusammenhang mit nicht geklebten Dichtungen statt klebenden Flüssigdichtungen müssen als Kostenberechnung über beide Prozessschritte Montage und Demontage evaluiert werden. Eine zerstörungsfreie Entnahme der Batteriemodule ist dabei die notwendige Randbedingung.

Herausforderungen und nächste Schritte

Da in den nächsten Jahren zunächst geringe Stückzahlen zu erwarten sind (z. B. in Form von Batterien mit Produktionsfehlern), ist die industrielle Ausgestaltung des Demontagesystems zunächst offen. Wegen der rechtlichen Notwendigkeit zur Annahme von Batterien ist die Logistik (dezentral oder zentral) von Priorität. Eine Strategie könnte sein, eine manuelle Demontage zu einem gewissen Grad vorzusehen, um eine dezentrale Reparatur in lokalen Werkstätten zu ermöglichen. Darauf aufbauend kann die Logistikstruktur für eine zentrale Demontage aufgebaut werden. Daneben sind Gewährleistung, Haftung und Wertbestimmung der Batterien bei der Bereitstellung reparierter Batteriemodule für Second Life-Anwendungen bei anderen Unternehmen sowie der Einbau überholter Batteriesysteme in Gebrauchtfahrzeugen noch nicht geklärte Fragestellungen, welche die Kreislaufwirtschaft beeinflussen können. Für Letzteres ist ein einheitliches (herstellerübergreifendes) zertifiziertes Verfahren anzustreben, was auch die Kundenakzeptanz von aufbereiteten Batterien erhöhen könnte.

Entwicklungen in der Zellchemie haben erhebliche Einflüsse auf die Möglichkeiten der Weiterverwendung von Batterien. Zusammen mit Veränderungen im Fahrzeugdesign bedeutet dies, dass sich das Demontagesystem kontinuierlich weiterentwickeln muss. Im Demontageprozess wird Arbeitssicherheit wegen der eingesetzten Materialien eine Rolle spielen, was den Bedarf an Automatisierung weiter erhöht. Wenn die Stückzahlen steigen, ist eine weitgehende Automatisierung in Demontagelinien oder freien Modulen notwendig. In der Automobilindustrie haben Montagesysteme bereits einen hohen Reifegrad, weswegen auf bekannte Technologien und Partner zurückgegriffen werden kann. Aber das starke prognostizierte Wachstum wird den erweiterten Einsatz von Daten und Sensorik erfordern, um eine hohe Adaptivität zu ermöglichen. Daten über das Design und aus der Nutzungsphase liefern wichtige Informationen über Demontageprozesse und den Zustand der Batterie. Sensorik kann, wie aktuell in der Montage, zur Positionierung der Produkte und Maschinen zueinander genutzt werden und vor allem zur genauen Bestimmung des Zustandes und des Restwerts der Batterie.

4.3 Remanufacturing von Freizeitschuhen

Ausgangssituation

PCH Innovations, gegründet 2006 in Los Angeles, ist ein Berliner Forschungs- und Entwicklungs-Labor, spezialisiert auf zirkuläre Robotik, generative KI und Computer Vision Lösungen. PCH entwickelt maßgeschneiderte Systeminnovationen bis hin zu skalierbaren industriellen Anwendungen. Seit einigen Jahren konzentriert sich das Unternehmen auf die Entwicklung von Systemen zum Handling von verformbaren Materialien und Produkten wie z. B. Textilien, Schuhe, Rucksäcken und Zelten. Hintergrund ist die Ausweitung bestehender Ökodesign-Richtlinien der EU für nachhaltige Produkte auf Produktkategorien wie Kleidung und Schuhe. Kernziel der Initiative zur Senkung des ökologischen Fußabdrucks von Produkten ist es, den Materialeinsatz zu minimieren und die Ressourceneffizienz zu maximieren, inkl. entsprechender Wiederaufbereitungs- und Recycling-

Maßnahmen. Bei Turnschuhen existieren beispielsweise bereits erste Ansätze die Schuhe zu einem hohen Anteil zu recyceln oder einzelne Komponenten in den Materialkreislauf zurückzuführen. PCH Innovations erforscht für die Textilbranche in diesem Kontext den Einsatz von Automatisierungslösungen und entwickelt Demontagesysteme für Schuhe, Zelte, Rucksäcke etc.

Tabelle 3: Kurzübersicht PCH Innovations Use Case

Unternehmen:	PCH Innovations
Produkt:	Freizeitschuhe
R-Strategie:	Remanufacture, Repair, Recycling
Haupt Herausforderungen:	Produktvarianz und Handhabung
Wichtigste Befähigertechnologie:	Sensorik + Machine Learning

Ziel des Anwendungsfalls und Aufbau des Produkts

Dieser Beitrag fokussiert die technischen Anforderungen und Umsetzungsmöglichkeiten für die Demontage von Schuhen. Als Ziel eines solchen Demontagesystems wird die Zerlegung von Schuhen in die jeweiligen Einzelkomponenten und die Rückführung der Materialien in die entsprechenden, separaten Materialströme definiert. Die Demontage stellt somit einen unabdingbaren Befähiger für eine zielgerichtete Rückführung von Produkten und ihren Bestandteilen dar, die anderenfalls als Gesamtprodukt nur thermisch oder chemisch verwertet werden könnten.

Allerdings ist die Zerlegung und Materialseparation von Schuhen eine komplexe Herausforderung im industriellen Kontext: Demontagesysteme sind bei Turn- und Freizeitschuhen mit einer hohen Varianz in Bezug auf die Produktbestandteile und den individuellen Zustand konfrontiert. Schuhe bestehen aus einer Kombination von bis zu 500 Materialien, darunter Naturfasern, Kunstfasern, Metalle und Kunststoffen, wie TPU oder PLA. Um die gewünschten Produkteigenschaften zu erreichen, setzen Hersteller vor allem auf firmeneigene Materialmischungen, welche keine Transparenz über die Materialeigenschaften und -zusammensetzungen für die Wiederaufbereitung zulassen. Auch die Verbindungsmöglichkeiten dieser Materialien sind vielzählig: Kleben, Nähen, Kitten oder Spritzgießen sind gängige Verfahren, die kombiniert bei Schuhen eingesetzt werden. Nicht zuletzt ist bereits der Produktaufbau eines Schuhs komplex und über die Modelle hinweg wenig einheitlich, wie in Abbildung 8 schematisch dargestellt. Dies ist darin begründet, dass produktseitig weder Standards in der Entwicklung noch in der Produktion existieren. Zudem werden keine Stücklisten zur Verfügung gestellt, die Transparenz über die verwendeten Materialien ermöglichen.

Neben der hohen Varianz in den Schuhmodellen muss zusätzlich die schwankende Abnutzung des Schuhs und somit der Produktzustand bei der Demontage berücksichtigt werden. Der Zustand bestimmt, ob und auf welche Weise Komponenten und Materialien in den Kreislauf zurückgeführt werden können. Weiterhin muss das Demontagesystem der Anforderung gerecht werden, dass bestimmte zentrale Materialeigenschaften erhalten bleiben müssen; um beispielsweise Baumwolle recyceln zu können, ist der Erhalt einer gewissen Restfaserlänge notwendig. Diese Randbedingungen beeinflussen den durch das System maximal erlaubten Zerstörungsgrad. Auch wenn die maximale Demontagetiefe auf der Ebene der einzelnen und reinen Materialien angestrebt wird, ist zunächst auch eine komponentenweise Demontage denkbar. Ein realistischer Business Case be-

steht in der Demontage und der Reparatur der Sohlen von Wanderschuhen. Wanderschuhe sind hochwertige Produkte mit einem definierten Einsatzzweck. Folglich sind die Modelle und ihre Abnutzungsbereiche einheitlicher und die Varianz, der das Demontagesystem begegnen muss, geringer.

Zusammenfassend stellt sich die zentrale Forderung, dass ein Demontagesystem für Schuhe eine hohe Systemadaptivität aufweisen muss, um auf eine große Anzahl an Produkten und deren Abnutzung reagieren zu können. Der jeweilige zu wählende Zerstörungsgrad und die Demontagetiefe sind insbesondere vom tatsächlichen Zustand des individuellen Schuhs sowie der gewünschten Rückführungsart abhängig.

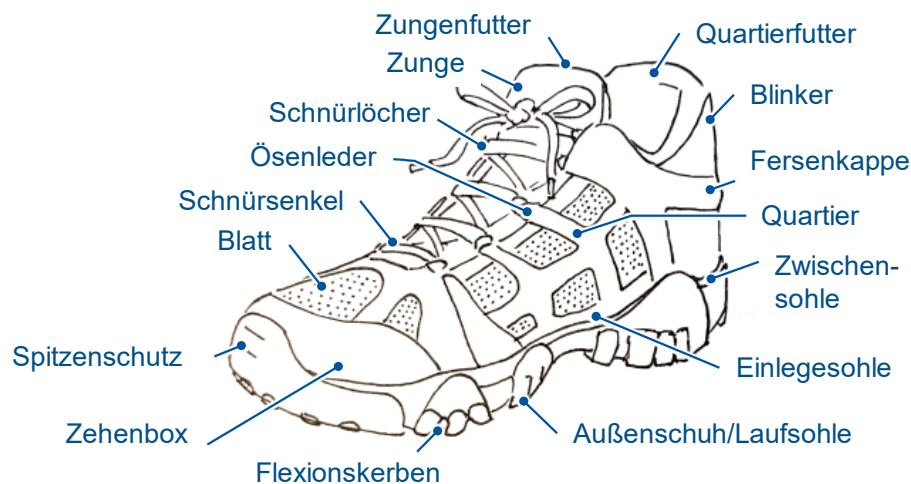


Abbildung 8: Beispiel eines Schuhs und seiner Komponenten

Eigenschaften des Demontagesystems

Obwohl noch viele Randbedingungen der Demontage unbekannt sind, kann ein Prozess mit den vier zentralen Aufgaben der Erkennung, Sortierung, Handhabung und Demontage beschrieben werden, die in dieser oder einer vergleichbaren Reihenfolge zu durchlaufen sind:

Erkennung. Die erste Aufgabe besteht darin, die zu demontierenden Schuhe zu identifizieren und deren Zustand zu erkennen. Dabei spielen Computer Vision-Systeme eine zentrale Rolle. Die Herausforderung ist die Vielzahl an benötigten Trainingsdaten, um alle Marken, Modelle und Zustände mit hoher Sicherheit erkennen zu können. Eine digitale Produktakte könnte beispielsweise mittels eines RFID-Transponders Daten über die Zusammensetzung des Produktes bereitstellen. Neben der Kombination konventioneller Industriekameras mit Computer Vision können auch spezielle Bildgebungstechnologien wie die Infrarotspektroskopie eingesetzt werden, um die Materialien des vorliegenden Schuhs zu ermitteln und auch den Zustand dieser Materialien abzuschätzen. Auf Basis dieser Daten können die weiteren Prozessschritte geplant und durchgeführt werden.

Sortierung. Abhängig vom Business Case und den Fähigkeiten des Demontagesystems sind verschiedene Arten der Sortierung denkbar: Eine produktseitige Herausforderung liegt in der Erkennung und Sortierung nach Marke, Materialzusammensetzung oder Schuhaufbau. Beispielsweise könnte ein herstellereigenes Logistiksystem mit einer für die Kund:innen einfachen Annahmestelle für gebrauchte Schuhe die Varianz bereits im

Vorhinein deutlich reduzieren. Zusätzlich muss eine Sortierung nach Produktzustand erfolgen, welcher die Rückführungsart maßgeblich bestimmt. Möglich sind die Unterscheidung in eine vollständige Demontage (Recycling oder Remanufacturing), die Demontage von Komponenten (für z. B. Repair) oder gar der Wegfall einer Demontage (Resell).

Handhabung. Die Handhabung des Schuhs – eines halbweichen, verformbaren Objekts – ist eine zentrale Herausforderung, da jede automatisierte Operation einen Gegendruck von der Innenseite des Schuhs erfordert. So kann die Zuverlässigkeit und Stabilität des Prozesses gewährleistet werden. In der automatisierten Herstellung von Schuhen werden Leisten genutzt, d. h. Formstücke aus hochdichtem Kunststoff, die menschlichen Füßen nachempfunden sind. Sie garantieren die definierte Positionierung der Materialien und bieten den erforderlichlich gleichmäßigen Gegendruck im Montageprozess. Da Leisten jedoch nur für einzelne Modelle spezifisch genutzt werden können und es nicht möglich ist, sie in einen fertigen Schuh wiedereinzuführen, wird aktuell an flexibel ausdehnbaren Leisten geforscht. Dazu hat PCH Innovations für Nike's *Bot Initiated Longevity Lab Anlage* einen, in einer Richtung ausdehnbaren, Leisten entwickelt. Ein allgemein anwendbarer Leisten sollte in mehrere Richtungen ausdehnbar sein und potenziell intelligente, programmierbare, formverändernde Materialien verwenden.

Demontage. Zuletzt ist die eigentliche Demontage mit gegebenenfalls ergänzenden Aufarbeitungsschritten, wie Reparaturmaßnahmen, durchzuführen. Auch hier steht die Handhabung von Werkzeugen im Vordergrund: Zunächst müssen Werkzeuge, mit denen einzelne Materialschichten entfernt werden, koordiniert werden; neben dem Schneiden kommen das Schleifen, Sägen, der Einsatz von Wärme oder chemische Separationstechnologien zum Einsatz. Die dadurch gewonnenen, flexiblen und verformbaren Materialschichten müssen einzeln behandelt und zu ihren jeweiligen Materialströmen oder den nächsten Prozessschritten der Demontage zugeführt werden. Das Ziel ist es, mit einer möglichst geringen Anzahl von eingesetzten Werkzeugen eine Vielzahl von Materialien und Technologien abdecken zu können. Dies erfordert die Entwicklung von maßgeschneiderten Endeffektoren und Greifern für die entsprechenden Robotersysteme, die sich an die Bedürfnisse der verschiedenen Schuharten und Materialien anpassen.

Herausforderungen und nächste Schritte

Aufgrund der hohen Varianz in Schuhmodellen und der Diversität der Zustände hat die Identifikation dieser die höchste Priorität für die Entwicklung und Implementierung industrieller Wiederaufbereitungsverfahren. Obwohl Computer Vision-Systeme in der Erkennung von Varianten und Materialeigenschaften präziser werden, ist die Unterstützung mit Daten auch weiterhin sinnvoll und notwendig. Schuhe verfügen gewöhnlich jedoch nicht über eingebettete Sensoren, was die Bestimmung des Produktzustandes erschwert. Eine realistische Option stellt das Einbetten eines RFID-Transponders oder Speichers dar, der direkt Informationen über die eingesetzten Materialeigenschaften oder sogar Demontageinstruktionen zur Verfügung stellt, die die Planung der Demontageschritte unterstützen. Auch in der Demontage selbst gibt es technische Herausforderungen. Wenn nicht nur die Reparatur, sondern das Zurückführen aller Materialien in eigene Materialströme betrachtet wird, müssen die Stoffe dekontaminiert oder von Kleberesten gereinigt werden. Dies ist aktuell nur bedingt möglich. Generell muss bereits die Schuhproduktion über "Design for Disassembly"-Ansätze stärker auf eine Demontage ausgelegt werden. Schlussendlich ist die Realisierung eines Demontagesystems für Schuhe nicht zuletzt abhängig vom tatsächlichen Business Case. Ohne eine gesetzlich geforderte Rücknahmepflicht oder ohne eindeutigen Kundenwunsch sind momentan die Voraussetzungen für einen weitreichenden Einsatz von Demontagesystemen für Schuhe noch nicht gegeben. Eine Regulierung

der verwendeten Materialien in Richtung Demontierbarkeit oder über entsprechende Recyclingquoten können Hersteller jedoch jetzt schon zu einer schnelleren Umsetzung motivieren.

4.4 Zusammenfassung des aktuellen Status Quo aus Sicht der Unternehmen

Strategien zur Kreislaufwirtschaft sollen im Sinne der ganzheitlichen nachhaltigen Produktion sowohl ökologische als auch ökonomische Ziele fördern. Wie in den Use Cases dargestellt ist, werden die Potenziale der Kreislaufwirtschaft von der Industrie anerkannt und gefördert. Neue regulatorische Bestimmungen sind wichtige Treiber für die Entwicklung zur Kreislaufwirtschaft. Vor allem hat die stetig steigende Kundenbereitschaft für aufbereitete Produkte einen starken positiven Einfluss auf diese Entwicklung. Auch eröffnet Kreislaufwirtschaft neue Geschäftsperspektiven, indem sich Unternehmen im Wettbewerb durch das Angebot von Second-Life Produkten differenzieren können. Folglich steigt zurzeit die Implementierungsgeschwindigkeit für die Umsetzung von industriellen Systemen zur Wiederaufarbeitung stark an, sodass die Gestaltung von De- und Remontagesystemen zu einem zentralen Anliegen wird.

Da sich die vorgestellten Use Cases in der frühen Umsetzungsphase befinden, werden De- und Remontagetätigkeiten aktuell zumeist manuell ausgeführt. Dies bietet die Vorteile, dass selbst individuelle Produktzustände entsprechend bearbeitet werden und die Unternehmen Erfahrungen in der Demontage sammeln können. Aufgrund der hohen Varianz von Produkttypen und -zuständen ist eine regelbasierte Automatisierung von Demontagesystemen nicht ausreichend. Vielmehr benötigt die Demontage für die weitere Skalierung Prozessautomatisierung bei gleichzeitig hoher Adaptivität, die mithilfe von verfügbaren Daten sowie von Sensorik und KI-Systemen umzusetzen ist.

Vergleicht man die Use-Cases im Hinblick auf die vorgestellten Merkmale von Demontagesystemen, sind Unterschiede bezogen auf die Demontagetiefe und den Zerstörungsgrad festzustellen. Eine Gemeinsamkeit der drei diskutierten Anwendungsfälle ist der Bedarf nach einer hohen Prozessadaptivität. Im Falle des Refurbishment von Waschmaschinen kann die Prozessadaptivität bisher durch manuelle Tätigkeiten abgebildet werden. Für die Demontage der PKW-Batteriekästen bietet die Modularität Potenzial, Prozessadaptivität im industriellen Maßstab umzusetzen. Systemadaptivität ist bei dem frühen Stadium zunächst nicht als zentraler Fokus gesetzt; perspektivisch wird diese Eigenschaft jedoch von großer Bedeutung für die Gestaltung von Demontagesystemen sein, da Produkt- und Technologiezyklen kürzer werden und Variantenzahlen steigen. Während die Kreislaufstrategien in den Unternehmen als strategisches Thema angekommen sind, verbleiben eine Vielzahl von Herausforderungen, die durch entsprechende Befähigungstechnologien zu lösen sind.

5 Fazit

Effiziente Ressourcennutzung und die Erweiterung der Produktlebenszyklen stellen eine zentrale Perspektive für nachhaltig ausgerichtete Unternehmen dar. Die Bestrebungen der EU, Kreislaufwirtschaft zu etablieren, geben Unternehmen einen zusätzlichen Anstoß frühzeitig nachhaltige Systeme umzusetzen, und eröffnen zudem neue Geschäftsperspektiven. Die Möglichkeit zur Ausweitung von Wiederaufarbeitungsprozessen im industriellen Maßstab allerdings wird erst durch eine Etablierung von automatisierten Demontagesystemen geschaffen. Aufgrund der hohen Produkt- und Zustandsvarianz ist eine regelbasierte Automatisierung der Systeme jedoch nicht ausreichend, sondern muss durch adaptive Fähigkeiten erweitert werden.

Auf Basis der Motivation (Kapitel 1) und den grundlegenden Begrifflichkeiten zur Kreislaufwirtschaft (Kapitel 2) beschreibt dieser Beitrag ein Zielbild eines adaptiven Demontagesystems und seinen Charakteristiken, um die Schließung von Ressourcenkreisläufen zu unterstützen (Kapitel 3). Kernstück des Beitrages sind die vorgestellten Use Cases „Refurbishmentprozesse der Second-Life Waschmaschinen“, „Demontage von PKW-Batteriekästen“ und „Remanufacturing von Freizeitschuhen“ (Kapitel 4). Während einige Überlegungen produktspezifisch sind, können dennoch übergreifende Gemeinsamkeiten und Herausforderungen für die Umsetzung der adaptiven automatisierten Demontage festgestellt werden. Im Folgenden werden die weiteren Handlungsfelder für die adaptive automatisierte Demontage und die benötigten Befähigertechnologien als Ausblick aufgezeigt.

Um in der Wiederaufbereitung auf starke Schwankungen reagieren zu können, müssen qualitativ hochwertige und konsistente Daten verfügbar sein. Produktvariante und -zustand dienen als Entscheidungsfundament. Eine automatisierte Zustandsbewertung kann die Wirtschaftlichkeit der Bewertung steigern: Aufgenommene Daten von z. B. Tiefenkameras können KI-Modelle für die Bauteilklassifikation trainieren, und somit die Varianz des Produktzustands vom Ursprungszustand automatisiert bestimmen.

Auch die Prozesse müssen adaptiv auf die Zustandsbestimmungen reagieren. Hierfür müssen Maschinen ihren Handlungsablauf durch eigene Schlussfolgerungen bestimmen können, anstatt einer festgelegten Anweisungssequenz von außen zu folgen. Insbesondere Sensoren wie Laserscanner und Tiefenkameras ermöglichen Prozessüberwachungen oder adaptive Werkzeugpositionierungen. 5G-Mobilfunkstandard und Edge Computing unterstützen Sensordatenverarbeitung in zentralen Rechenzentren, sodass leistungsstarke Robotiksteuerungen und KI-Algorithmen kostengünstig für Roboterflotten verfügbar gemacht werden. Durch adaptive automatisierte Prozesse wird die Zustandsvarianz industriell kontrollierbar gemacht.

Die aufgeführten Handlungsfelder sind vor allem im kurz- und mittelfristigen Umfeld der Industrie anzusiedeln. Es verbleiben jedoch auch Aufgaben, die längerfristig und in Zusammenarbeit mit mehreren Akteuren zu lösen sind:

Übergeordnet stellen Konzepte der Datenaufnahme und -nutzung eine langfristig bedeutende Aufgabe dar. Zwar sind wie beschrieben bereits jetzt Daten die Grundlage für alle Handlungen in adaptiven Prozessen. Anstatt diese jedoch in Zustandsbewertungen aufwendig zu erheben, sollen perspektivisch die notwendigen Daten bereits mit dem Produkt zurück in die Fabrik gelangen. Für Daten über den Aufbau und die verwendete Materialien ist die digitale Produktakte eine Möglichkeit, die im Beitrag „Re-Manufacturing Green Factory“ näher vorgestellt wird. Zum anderen können Daten aus dem gesamten Produktlebenszyklus - und insbesondere aus der Nutzung – verwendet werden, um Aufschluss über den Produktzustand zu geben. Ziel ist es, in Kombination mit prädiktiven Algorithmen Entscheidungen für die Wiederaufbereitung zu treffen, um der Varianz des Produktzustands optimal begegnen zu können.

Zudem sind Industrie, Forschung und Gesetzgeber gleichermaßen gefordert, Anforderungen an aufgearbeitete Produkte zu standardisieren, um Markt und Qualitätsansprüche der Kund:innen zusammenzubringen. Auch erleichtern Standardisierungen in den Produkten die Demontage, indem die Varianz zwischen den Produkttypen von Beginn an verringert wird. Schließlich verbleiben rechtliche Fragestellungen, die durch den Gesetzgeber zu lösen sind. Dies betrifft die Speicherung und Verarbeitung der Nutzungsdaten

aus dem Produktlebenszyklus. Weiterhin sind auch Haftungsfragen für wiederaufgearbeitete Produkte auf rechtlicher Ebene festzuschreiben. Die Handlungsfelder lassen sich zusammenfassen in:

- Produkt- und Nutzungsdatenerhebung über den gesamten Produktlebenszyklus
- Automatisierte Zustandsbewertungen
- Adaptive und automatisierte Demontageprozesse befähigt durch Sensor- und KI-Systeme
- Standardisierung und Modularität für „Design for Disassembly“
- Rechtlicher Rahmen für die Datenspeicherung aus der Nutzungsphase

Aus übergeordneter Perspektive ist festzustellen, dass nicht eine einzelne Lösung, sondern eine Vielzahl verschiedener Handlungsfelder parallel zu verfolgen ist, um industrielle Systeme zur Wiederaufbereitung umzusetzen. Ebenso wie Montagelinien spezialisiert und mit hoher Genauigkeit arbeiten, aber erst durch die großen Stückzahlen wirtschaftlich agieren, gelten diese Anforderungen auch für Demontagesysteme. Diese müssen jedoch in den Aufbereitungsprozessen eine viel größere Varianz handhaben können, sodass Adaptivität als zentrale Eigenschaft ermöglicht werden muss. Die konkrete Ausgestaltung von Ressourcenkreisläufen erfordert vielfältige technologische, aber auch strategische Bestandteile. Auf diese Weise trägt die adaptive automatisierte Demontage dazu bei, Ressourcen in einer Vielzahl von Produktlebenszyklen mit zusätzlichen Wertschöpfungsmöglichkeiten zu verwenden.

Danksagung

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

6 Literatur

- [1] S. Bonafé, „Die Bedeutung des Kreislaufwirtschaftsmodells: Die Beschleunigung des Übergangs zu einem Kreislaufwirtschaftsmodell ist keine Option, sondern eine zwingende Entscheidung,“ in *Kreislaufwirtschaft in der EU. Eine Zwischenbilanz*, S. Eisenriegler, Hg., Wiesbaden: Springer Gabler, 2020, S. 63–65.
- [2] Deloitte und Bundesverband der Deutschen Industrie. „Zirkuläre Wirtschaft. Herausforderungen und Chancen für den Industriestandort Deutschland.“ deloitte.com. https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/risk/Zirkul%C3%A4re%20Wirtschaft%20Studie_Deloitte%20und%20BDI.pdf (Zugriff am: 24. Feb. 2023).
- [3] Europäische Kommission. „Änderung unserer Produktions- und Verbrauchsmuster: neuer Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft ebnet Weg zu klimaneutraler und wettbewerbsfähiger Wirtschaft mit mündigen Verbrauchern.“ ec.europa.eu. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_20_420 (Zugriff am: 24. Feb. 2023).
- [4] Europäische Kommission. „Europäischer Grüner Deal: Erster klimaneutraler Kontinent werden.“ commission.europa.eu. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de (Zugriff am: 24. Feb. 2023).
- [5] Europäische Kommission. „Der Grüne Deal: Neue Vorschläge, um nachhaltige Produkte zur Norm zu machen und Europas Ressourcenunabhängigkeit zu stärken.“ ec.europa.eu. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_22_2013 (Zugriff am: 24. Feb. 2023).
- [6] M. Fraser *et al.* „The Circularity Gap Report 2023.“ circularity-gap.world. <https://www.circularity-gap.world/2023#download> (Zugriff am: 24. Feb. 2023).
- [7] A. von Wecus und K. Willeke, „Status quo der Ressourceneffizienz im Mittelstand: VDI ZRE Publikationen: Studie,“ 2015. Zugriff am: 24. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Studien/Studie_VDI_ZRE_Status_quo_Ressourceneffizienz_2015.pdf
- [8] C. Herrmann und O. Vetter, „Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands: Remanufacturing von Produkten,“ 2021. Zugriff am: 24. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Studien/VDI-ZRE_Studie_Remanufacturing_Web_bf.pdf
- [9] S. Baazouzi, F. P. Rist, M. Weeber und K. P. Birke, „Optimization of Disassembly Strategies for Electric Vehicle Batteries,“ *Batteries*, Jg. 7, Nr. 4, Art.-Nr. 74, 2021, doi: 10.3390/batteries7040074.
- [10] E. Westkämper und C. Löffler, *Strategien der Produktion: Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- [11] J. R. Duflou, G. Seliger, S. Kara, Y. Umeda, A. Ometto und B. Willems, „Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study,“ *CIRP Annals*, Jg. 57, Nr. 2, S. 583–600, 2008, doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.009.
- [12] M. Has, *Sustainable Products: Life Cycle Assessment, Risk Management, Supply Chains, Eco-Design*. Berlin, Boston: De Gruyter, 2022.

- [13] S. Del-Aguila-Arcentales, A. Alvarez-Risco und S. Senthilkannan Muthu, „Measuring Circular Economy,“ in *Circular Economy: Impact on Carbon and Water Footprint*, A. Alvarez-Risco, S. S. Muthu und S. Del-Aguila-Arcentales, Hg., Singapore: Springer, 2022, S. 3–17.
- [14] D. Reichert, C. Cito und I. Barjasic, *Lean & Green: Best Practice: Wie sich Ressourceneffizienz in der Industrie steigern lässt*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2018.
- [15] A. Kropp, *Grundlagen der Nachhaltigen Entwicklung: Handlungsmöglichkeiten und Strategien zur Umsetzung (essentials)*. Wiesbaden: Springer, 2019.
- [16] C. N. Madu *et al.*, „Systems Design and Innovations in Circular Economy: The Industry and Business Perspective,“ in *Handbook of Environmentally Conscious Manufacturing*, C. N. Madu, Hg., 2. Aufl. Cham: Springer, 2022, S. 27–38.
- [17] H. Holzinger, „Mehr Effizienz allein reicht nicht: Potenziale und Grenzen von Kreislaufwirtschaft,“ in *Kreislaufwirtschaft in der EU: Eine Zwischenbilanz*, S. Eisenriegler, Hg., Wiesbaden: Springer Gabler, 2020, S. 195-216.
- [18] S. Blömeke, J. Rickert, M. Mennenga, S. Thiede, T. S. Spengler und C. Herrmann, „Recycling 4.0 – Mapping smart manufacturing solutions to remanufacturing and recycling operations,“ *Procedia CIRP*, Jg. 90, S. 600–605, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.02.045.
- [19] M. H. G. Kraft, O. Christ und L. Scherer, *Management der Kreislaufwirtschaft: Positionierung und Gestaltung zirkulärer Unternehmen (essentials)*. Wiesbaden: Springer, 2022.
- [20] J. H. Becker, „Cradle to Cradle als neue Philosophie der nachhaltigen Produktentwicklung,“ in *Praxishandbuch Nachhaltige Produktentwicklung: Ein Leitfaden mit Tipps zur Entwicklung und Vermarktung nachhaltiger Produkte*, U. Scholz, S. Pastoors, J. H. Becker, D. Hofmann und R. van Dun, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2018, S. 31–38.
- [21] P. Lacy, J. Long und W. Spindler, *The Circular Economy Handbook: Realizing the Circular Advantage*. London: Palgrave Macmillan, 2020.
- [22] J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell und A. Hanemaaijer. „Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain: Policy Report.“ pbl.nl. <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf> (Zugriff am: 24. Feb. 2023).
- [23] Ellen MacArthur Foundation, „Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition: Vol 1,“ 2013. Zugriff am: 24. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>
- [24] J. Kirchherr, D. Reike und M. Hekkert, „Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions,“ *Resources, Conservation and Recycling*, Jg. 127, S. 221–232, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.
- [25] A. Zühlsdorff, „Stoffrecht,“ in *Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft*, P. Kurth, A. Oexle und M. Faulstich, Hg., 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022, S. 211–234.
- [26] G. Ferrer und D. C. Whybark, „Communicating Product Recovery Activities: Processes, Objectives, and Performance Measures,“ in *Handbook of Environmentally Conscious Manufacturing*, C. N. Madu, Hg., 2. Aufl. Cham: Springer, 2022, S. 39–48.

- [27] C. N. Madu, „Sustainable Manufacturing: Strategic Issues in Green Manufacturing,“ in *Handbook of Environmentally Conscious Manufacturing*, C. N. Madu, Hg., 2. Aufl. Cham: Springer, 2022, S. 1–11.
- [28] S. H. Gheewala und T. Silalertruksa, „Life Cycle Thinking in a Circular Economy,“ in *An Introduction to Circular Economy*, L. Liu und S. Ramakrishna, Hg., Singapore: Springer, 2021, S. 35–53.
- [29] D. Parker *et al.*, „Remanufacturing Market Study: For Horizon 2020, grant agreement No 645984, November 2015,“ 2015. Zugriff am: 24. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5a4bc7898&appId=PPGMS>
- [30] J. Yang, *From Zero Waste to Material Closed Loop: The Way Towards Circular Economy*. Singapore: Springer, 2022.
- [31] W. R. Stahel, „History of the Circular Economy. The Historic Development of Circularity and the Circular Economy,“ in *The Circular Economy in the European Union: An Interim Review*, S. Eisenriegler, Hg., Cham: Springer, 2020, S. 7–19.
- [32] K. Wegener, S. Andrew, A. Raatz, K. Dröder und C. Herrmann, „Disassembly of Electric Vehicle Batteries Using the Example of the Audi Q5 Hybrid System,“ *Procedia CIRP*, Jg. 23, S. 155–160, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.10.098.
- [33] S. Bräuer und A. Stieger, „End-of-Life-Strategien für Traktionsbatterien,“ in *Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien: Szenarien, Dienstleistungen und Entscheidungsunterstützung*, J. Becker, D. Beverungen, M. Winter und S. Menne, Hg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019, S. 21–123.
- [34] P. Burggräf, J. Wagner, F. Steinberg, B. Heinbach, M. Wigger und T. Saßmannshausen, „Life Cycle Assessment for Adaptive Remanufacturing: incorporating ecological considerations into the planning of maintenance activities – a case study in the German heavy machinery industry,“ *Procedia CIRP*, Jg. 105, S. 320–325, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.02.053.
- [35] M. Hochwallner, E. Sundin und K. Johansen, „Automation in Remanufacturing: Applying Sealant on a Car Component,“ in *SPS2022: Proceedings of the 10th Swedish Production Symposium (Advances in Transdisciplinary Engineering 21)*, A. H. C. Ng, A. Syberfeldt, D. Högberg und M. Holm, Hg., Amsterdam: IOS Press, 2022, S. 147–158, doi: 10.3233/ATDE220134.
- [36] R. Schmitt *et al.*, „Frei verkettete wandlungsfähige Montage,“ in *29. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017: Internet of Production für agile Unternehmen, 18. bis 19. Mai*, G. Schuh, C. Brecher, F. Klocke, R. Schmitt, Hg., 2017, S. 339–368.
- [37] K. Feldmann, S. Trautner und O. Meedt, „Innovative disassembly strategies based on flexible partial destructive tools,“ *Annual Reviews in Control*, Jg. 23, S. 159–164, 1999, doi: 10.1016/S1367-5788(99)90079-2.
- [38] N. Nasr, C. Hughson, E. Varel und R. Bauer, *State-of-the-art assessment of remanufacturing technology*. New York: Rochester Institute of Technology, 1998.
- [39] A. Priyono, W. Ijomah und U. Bititci, „Disassembly for Remanufacturing: A Systematic Literature Review, New Model Development and Future Research Needs,“ *Journal of Industrial Engineering and Management*, Jg. 9, Nr. 4, S. 899–932, 2016, doi: 10.3926/jiem.2053.
- [40] K. von Westernhagen, *Planung und Steuerung der Retro-Produktion*. Essen: Vulkan-Verlag, 2001.

- [41] M. Porta, F. Sebastiani, M. Santochi und G. Dini, „Destructive Disassembly of End-of-Life Household Appliances: A Structured Analysis of Cutting Methods of the Housing,“ in *AMST'05: Proceedings of the Seventh International Conference*, E. Kuljanic, Hg., Wien: Springer, 2005, S. 653–662.
- [42] M. Nave, *Beitrag zur automatisierten Demontage durch Optimierung des Trennprozesses von Schraubenverbindungen*, Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Dortmund, Dortmund, 2003. Zugriff am: 24. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.17877/DE290R-14924>.
- [43] O. Sauer und J. Jasperneite, „Adaptive information technology in manufacturing,“ in *New worlds of manufacturing: proceedings of the 44th CIRP International Conference on Manufacturing Systems: University of Wisconsin, Madison, USA, 1 - 3 June 2011*, N. A. Duffie, Hg., 2011. Zugriff am: 24. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/profile/Juergen-Jasperneite/publication/273456159_Adaptive_information_technology_in_manufacturing/links/5502f3520cf231de076fc9a8/Adaptive-information-technology-in-manufacturing.pdf?origin=publication_detail
- [44] W. Günthner, E. Klenk und P. Tenerowicz-Wirth, „Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0,“ in *Handbuch Industrie 4.0: Bd. 4: Allgemeine Grundlagen* (Springer Reference Technik), B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl und M. ten Hompel, Hg., 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017, S. 99–125.
- [45] F. Kneer, E. Kamsties und K. Schmid, „Environment Modeling for Adaptive Systems: A Systematic Literature Review,“ 2020. [Online]. Verfügbar unter: arXiv:2011.07892.
- [46] T. Stehle und U. Heisel, „Konfiguration und Rekonfiguration von Produktionssystemen,“ in *Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation*, D. Spath, E. Westkämpfer, H.-J. Bullinger und H.-J. Warnecke, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017, S. 333–367.
- [47] S. L. Soh, S. K. Ong und A. Y. C. Nee, „Design for Disassembly for Remanufacturing: Methodology and Technology,“ *Procedia CIRP*, Nr. 15, S. 407–412, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.06.053.
- [48] R. Bogue, „Design for disassembly: A critical twenty - first century discipline,“ *Assembly Automation*, Jg. 27, Nr. 4, S. 285–289, 2007, doi: 10.1108/01445150710827069.
- [49] D. Krause und N. Gebhardt, *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien: Hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018.
- [50] G. Michalos, S. Makris, N. Papakostas, D. Mourtzis und G. Chryssolouris, „Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach,“ *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Jg. 2, Nr. 2, S. 81–91, 2010, doi: 10.1016/j.cirpj.2009.12.001.
- [51] R. Möhlmann und C. Engel. „Aus alt mach neu: Ein zweites Leben für Fahrzeug-Bauteile,“ *Forschung Kompakt*, Nr. 4, 2022, <https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/presse-medien/2022/april/ipk-aus-alt-mach-neu-ein-zweites-leben-fuer-fahrzeug-bauteile.pdf> (Zugriff am: 27. Feb. 2023).
- [52] S. Vongbunyong und W. H. Chen, *Disassembly Automation: Automated Systems with Cognitive Abilities*. Cham: Springer, 2015.

- [53] H.-J. Kim, S. Kernbaum und G. Seliger, „Emulation-based control of a disassembly system for LCD monitors,“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 40, Nr. 3-4, S. 383–392, 2009, doi: 10.1007/s00170-007-1334-z.
- [54] B. Basdere und G. Seliger, „Disassembly Factories for Electrical and Electronic Products To Recover Resources in Product and Material Cycles,“ *Environmental Science & Technology*, Jg. 37, Nr. 23, S. 5354–5362, 2003, doi: 10.1021/es034555g.
- [55] J. Fleischer, E. Gerlitz, S. Rieß, S. Coutandin und J. Hofmann, „Concepts and Requirements for Flexible Disassembly Systems for Drive Train Components of Electric Vehicles,“ *Procedia CIRP*, Jg. 98, S. 577–582, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.01.154.
- [56] U. Nehmzow, *Mobile Robotik: Eine praktische Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002.
- [57] E. Hering und G. Schönfelder, *Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012.
- [58] T. Heller, M. Duisberg, M. Kranz und B. A. Latos. „Montageorganisationsformen.“ toolbox.flexdemo.eu. https://toolbox.flexdemo.eu/uploads/medien/2021/08/09/Montageorganisationsformen_Bg.pdf (Zugriff am: 27. Feb. 2023).
- [59] Ford Motor Credit Company LLC. „Current Report: Pursuant to Section 13 or 15(d) of the Securities Exchange Act of 1934.“ d18rn0p25nwr6d.cloudfront.net. <https://d18rn0p25nwr6d.cloudfront.net/CIK-0000038009/2fd06f5b-1d25-4ba1-9ca9-ac261f33fd60.pdf> (Zugriff am: 27. Feb. 2023).
- [60] Europäisches Parlament. „Fit für 55: neue Pkw und leichte Nutzfahrzeuge ab 2035 emissionsfrei.“ europarl.europa.eu. <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20230210IPR74715/fit-fur-55-neue-pkw-und-leichte-nutzfahrzeuge-ab-2035-emissionsfrei> (Zugriff am: 27. Feb. 2023).
- [61] Tagesschau. „Ab 2030 in Europa: Ford will nur noch Elektroautos anbieten.“ tagesschau.de. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/ford-elektroautos-europa-101.html> (Zugriff am: 27. Feb. 2023).
- [62] Europäisches Parlament. „Neue EU-Vorschriften für nachhaltigere und ethisch bedenkenlose Batterien.“ europarl.europa.eu. https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2022/3/story/20220228STO24218/20220228STO24218_de.pdf (Zugriff am: 27. Feb. 2023).

Die Inhalte für den Vortrag 1.2 erarbeiteten die Autor:innen mit weiteren Expert:innen in dieser Arbeitsgruppe:

Dr. Frank Balzereit, Ford, Region Köln/Bonn

Lukas Bergs, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Dr. Jan Bitter-Krahe, Wuppertal Institute, Region Köln/Bonn

Kristof Briele, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Michael Drechsel, Intelligent Energy System Services GmbH, Ingolstadt

Juliane Elsner, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Maik Frye, Fraunhofer IPT, Aachen

Immanuel Geyer, MHP Management- und IT-Beratung GmbH, Ludwigsburg

Dr. Amon Göppert, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Dr. Thilo Greshake, MHP Management- und IT-Beratung GmbH, München

Dr. Tobias Häring, Intelligent Energy System Services GmbH, Waltenhofen

Christian Kokott, PCH Innovations, Berlin

Andé Knörig, PCH Innovations, Berlin

Dev Mishra, PCH Innovations, Berlin

Guido Nilgen, Miele & Cie. KG, Euskirchen

Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt, WZL | RWTH Aachen University und Fraunhofer IPT, Aachen

Dr. Sebastian Schmitt, Viega Group, Düsseldorf

Felix Sohnius, WZL | RWTH Aachen University, Aachen