Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436–4980–2024–04–28

MRK unterstützt Entscheidungsfindung zur Befähigung einer Kreislaufwirtschaft

Stärken von Cobots und Menschen kombinieren

A. Braun, S. Löffler

ZUSAMMENFASSUNG Das Konzept der zirkulären Wertschöpfung beschreibt ein nachhaltiges Wirtschaftssystem. Aktuell ist es jedoch herausfordernd den Produktlebenszyklus so zu erweitern, damit Produkte langfristig im Wirtschaftssystem erhalten bleiben. Erforderlich sind Ansätze, mit denen Produktzustände diagnostizierbar sind und unkompliziert der bestmögliche Rückgewinnungsweg dargestellt werden kann. An dieser Stelle setzt dieser Beitrag an. Aufgezeigt wird, wie eine Mensch-Roboter-Kollaboration MRK die Entscheidungsfindung für eine Kreislaufwirtschaft befähigen kann.

STICHWÖRTER

Kreislaufwirtschaft, Rückgewinnungsstrategie, Mensch-Roboter-Kollaboration

Enhancing circularity decision-making for end-of-usage products through human-robot collaboration in a circular economy

ABSTRACT The concept of circular value creation describes a sustainable economic system. However, it is currently challenging to extend the product life cycle so that products remain in the economic system long-term. Approaches are required to diagnose the condition of products and to easily identify the best possible recovery path. This article starts at this point. It shows how human-robot collaboration can enable decision-making for a circular economy.

1 Einleitung

Im Zeitalter des Anthropozäns, der Ausdehnung von Ökosystemen, in denen der Mensch – oft durch bewusste Veränderungen – zur dominierenden ökologischen Kraft geworden ist, haben das stetige Wachstum der Weltbevölkerung und der zunehmende Wohlstand innerhalb eines linearen Wirtschaftssystems zu einem erheblichen Anstieg der Abfallproduktion, der Umweltverschmutzung und einer drohenden Ressourcenknappheit geführt. Als Antwort auf diese Herausforderungen hat sich das Konzept einer zirkulären Wertschöpfung verfestigt. Eine zirkuläre Wertschöpfung ersetzt das „End-of-Life“ Konzept durch die Rückgewinnung von Ressourcen für eine nachhaltige Wirtschaftsform, die zu einer verbesserten Umweltqualität, wirtschaftlichem Wohlstand und sozialer Gerechtigkeit führt [1].

Es existieren Strategien, die den Verbrauch von natürlichen Ressourcen reduzieren und die Kreislaufführung von Materialien unterstützen, wodurch die Entstehung von Abfall verringert wird. In der Literatur werden solche Strategien als „R-Strategien“ (das „R“ steht für das lateinische Präfix „re“ und bedeutet „wieder“ oder „zurück“) bezeichnet, die als Kerngerüst der Transformation hin zur zirkulären Wertschöpfung gesehen werden. In der Wissenschaft besteht kein Konsens darüber wie viele R-Strategien betrachtet werden – je nach Publikation werden zwischen drei und neun Strategien genannt [1]. Diese unterschiedliche Betrachtungsweise zeigt, dass die R-Strategien nicht vollständig überschneidungsfrei sind. In diesem Beitrag werden für Produkte, die sich am Ende eines Nutzungszyklus befinden, solche Strategien und Verwertungsoptionen betrachtet, um je nach Zustand ganze Produkte, Komponenten, Einzelteile oder Materialien, erneut dem Wirtschaftskreis zuzuführen zu können insbesondere die Wiederaufbereitung von Produkten oder Komponenten sowie die direkte Wiederverwendung.

Vorrangiges Ziel einer zirkulären Wertschöpfung ist es, den höchstmöglichen Wert eines Produktes während seines gesamten Lebenszyklus und darüber hinaus zu erhalten [2]. Um dies zu erreichen, ist es von entscheidender Bedeutung, die am besten geeignete Verwertungsoption für ein Produkt zu bestimmen. Dafür bedarf es eines Entscheidungsprozesses, der reproduzierbar durchgeführt werden kann. Aufgrund hoher Unsicherheiten im Produktzustand [3], hochkomplexer Aufgabenstellungen [4] und vieler unterschiedlicher Produkte, die noch nicht für die Verwertung ausgelegt sind [4, 5], muss der Verwertungsweg in einem individuellen Entscheidungsprozess erfolgen. Hinzu kommt der technologische Fortschritt im Wandel zur 5. Industriellen Revolution, in dem sich die Perspektive von einer reinen Automatisierung hin zu menschenzentrierten Wertschöpfungssystemen verschiebt [6]. Entsprechend bedarf es neuer, kollaborativer Ansätze, welche die Fähigkeiten sowohl vom Menschen als auch von der Automatisierungstechnik in eine Symbiose bringt. Nachfolgend wird ein solcher Ansatz beschrieben, der mittels einer Mensch-Roboter Kollaboration die individuellen Fähigkeiten von Menschen und die analytischen Fähigkeiten von Robotern kombiniert und damit eine optimale Entscheidungsgrundlage für die Produktrückführung am Ende einer Nutzungsphase in zirkuläre Wertschöpfungssysteme ermöglicht.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-28 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

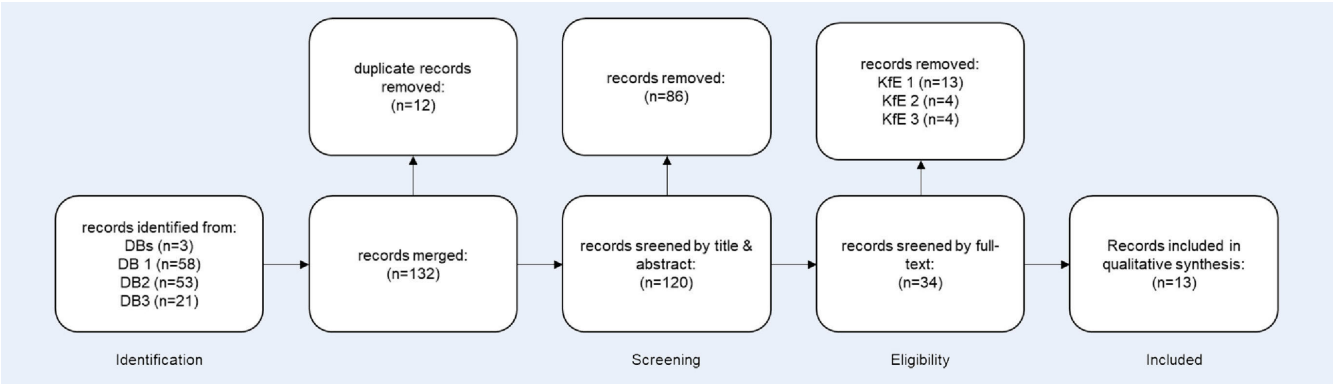

Bild 1. Quantitative Dokumentation des PRISMA-Prozesses. *Grafik: eigene Darstellung nach Moher*

2 Forschungsdesign

Zur Aufarbeitung des Stands der Technik und der Wissenschaft, wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Durch die Literaturanalyse konnte der Anwendungsbereich umrissen sowie der Entwicklungsrahmen definiert werden. Dieser Ansatz orientiert sich an der PRISMA Vorgehensweise zur Erarbeitung systematischer Darstellungen und Metaanalysen, welche die Grundlage für das zusammenfassende Flussdiagramm, **Bild 1**, bildet.

Für die Literaturrecherche wurden die Datenbanken Science Direct, IEEE explore und Web of Science unter der Verwendung boolescher Suchbegriffe herangezogen, um mit Abstracts, Titel und Schlüsselworten relevante Quellen zu identifizieren. Mittels einer Volltextanalyse wurde anschließend der Fokus der Studien auf Qualität und Wert überprüft und nach den Ausschlusskriterien in **Tabelle 1** bewertet.

Tabelle 1. Ausschlusskriterien bei der Volltextprüfung der Förderungswürdigkeit.

#	Kriterium für Exklusion (KfE)
KfE 1	Das Dokument ist thematisch und inhaltlich nicht relevant, d. h. keine Untersuchung mit einer oder mehreren Fallstudien oder keine angemessene Beschreibung der Methodik.
KfE 2	Das Dokument ist nicht begutachtet und in Zeitschriften, Konferenzberichten, Arbeitspapieren, Buchkapiteln oder in Form einer Zusammenfassung, eines Tutoriums oder eines Vortrags veröffentlicht.
KfE 3	Der vollständige Text des Dokuments ist für den Forscher nicht zugänglich.

3 Literaturübersicht

3.1 Anwendungsbereich

Trotz der Fortschritte bei der Ressourcenverwertung [7–10] stellt das Fehlen eines standardisierten Entscheidungsprozesses für die Auswahl optimaler Kreislaufstrategien und Verwertungswege [8] in der Literatur und im Anwendungskontext eine große Herausforderung dar. Das Fehlen eines ganzheitlichen Ansatzes behindert die effiziente Erhaltung der Wertschöpfungsebene von Produkten während des gesamten Verwertungsprozesses. Darüber hinaus besteht ein zunehmender Bedarf, Möglichkeiten der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) zu erforschen, um Synergien bei den individuellen Fähigkeiten des Menschen und gleichzeitig den analytischen Möglichkeiten von Robotern im Bereich der Kreislaufwirtschaft zu nutzen [11]. Daher ist ein umfassender Rahmen zu entwickeln, der die Auswahl der R-Strategie, die Festlegung der Verwertungsroute und die Zusammenarbeit zwischen Menschen und Roboter integriert, um eine zirkuläre Wertschöpfung zu ermöglichen.

Ein weiteres vorherrschendes Thema in der Literatur ist die wesentliche Verbindung zwischen MRK und Demontageaktionen. Roboter spielen eine zentrale Rolle bei der Automatisierung und Rationalisierung des Demontageprozesses, oft in Verbindung mit menschlicher Anleitung [13–19]. Diese Synergie verbessert die Entscheidungsfindung durch Bereitstellung von Echtzeitdaten über Zustand der Komponenten, Recycelbarkeit und die Möglichkeit zur Aufarbeitung [20–22]. Die Mehrheit der Studien konzentriert sich jedoch ausschließlich auf Demontageaktionen und die Entscheidung über die Aufgabenverteilung zwischen Menschen und Roboter oder die Demontagereihenfolge [23–25]. Die Literatur zu Demontageaktionen hebt hervor, dass manuelle Demontageprozesse, obwohl traditionell von Einzelpersonen mit Handwerkzeugen durchgeführt, arbeitsintensiv, ineffizient und oft ergonomisch herausfordernd sind. Mit zunehmendem Umweltbewusstsein und steigenden Arbeitskosten gibt es einen bemerkenswerten Trend zur Automatisierung von Demontageprozessen mit Industrierobotern [19]. Kognitive Roboter, insbesondere solche auf Basis von Vision, werden bereits eingesetzt, um Herausforderungen in verschiedenen Demontageprozessen zu überwinden und effektiv mit menschlichen Operatoren zusammenzuarbeiten [23]. Es wurden Wissensgraphen für die kollaborative Demontage [19] und nachhaltigkeitsbasierte Modelle für die Planung von Roboter-Demontagesequenzen [18] vorgeschlagen. Verschiedene Studien führen Entscheidungssysteme ein, die auf bioinspirierten Konzepten wie Motivationen, Antrieben und Wohlbefinden basieren, um natürliche Verhaltensweisen bei Robotern zu fördern und die Akzeptanz durch den Benutzer zu erhöhen [24].

Zusammenfassend umfasst die aktuelle Forschungslandschaft in der Entscheidungsfindung für die Kreislaufwirtschaft von Produkten am Ende ihrer Nutzungsdauer innovative Ansätze, wie den Einsatz kognitiver Roboter mit visuellen Fähigkeiten, um die Komplexität der Demontage anzugehen und mit menschlichen Operatoren zusammenzuarbeiten. Ein gemeinsames Entscheidungsmodell zur Auswahl und Zuweisung des Rückgewinnungsweges muss jedoch noch vollständig erforscht werden. Trotz zahlreicher Studien, welche die Herausforderungen der Demonta-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-28 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

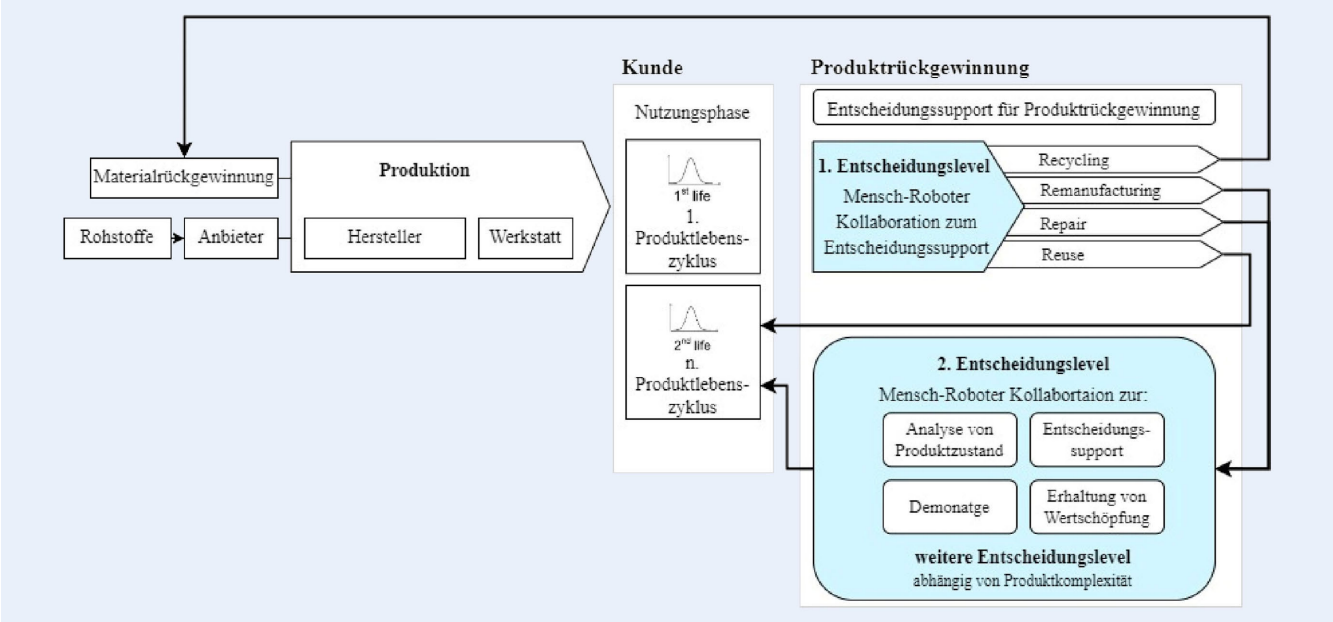

Bild 2. Zirkulärer Produktlebenszyklus. *Grafik: eigene Darstellung*

ge beschreiben, gibt es eine bemerkenswerte Lücke in der Literatur bezüglich des Entscheidungsmodells zur Auswahl des Rückgewinnungsweges in einem kollaborativen Umfeld, um den Produktwert oder Mehrwert zu maximieren. Diese identifizierte Forschungslücke [23–25] dient als Motivation für die in dieser Arbeit vorgestellte Forschungsarbeit.

3.2 Wissensbasis

Die Wissensbasis des vorliegenden Beitrags konzentriert sich auf das allgemeine Verständnis der Terminologie. Da der Begriff zirkuläre Wertschöpfung bereits in der Einleitung eingeführt und definiert wurde, konzentriert sich die Übersicht auf MRK und den Entscheidungsprozess im Kontext der Entscheidungsfindung für die zirkuläre Wertschöpfung. MR in dieser Arbeit wird als Zusammenspiel zwischen einem menschlichen Operator und einem Cobot betrachtet. Die Zusammenarbeit zwischen dem menschlichen Operator und dem Cobot wird nach Müller et al. als eng gekoppeltes Interaktionssystem klassifiziert, bei dem die Aktion des einen unmittelbare Konsequenzen für den anderen hat, dank spezieller Sensoren und Visionssysteme [26]. Beide Teilnehmer dieser Zusammenarbeit werden hinsichtlich ihrer Funktionalität in der kollaborativen Umgebung beschrieben. Das Verständnis der Fähigkeiten des menschlichen Operators ist entscheidend im MRK-Rahmen. Der Kompetenz Atlas nach KODE wird verwendet, um die Kompetenzen des Operators in fünf Schlüsselbereiche zu kategorisieren: technisch-methodische Fähigkeiten, sozial-kommunikative Fähigkeiten, persönliche Fähigkeiten, aktivitäts- und umsetzungsorientierte Fähigkeiten und kognitive Fähigkeiten [27]. Diese Kompetenzen umfassen ein breites Spektrum an Fähigkeiten, von IT-Kenntnissen und technischen Fertigkeiten bis hin zu Anpassungsfähigkeit und Teamarbeit. Der Cobot als Teilnehmer des MRK hingegen stellt eine natürliche Weiterentwicklung dar, ermöglicht die physische Interaktion mit dem Menschen in einem gemeinsamen Arbeitsbereich und ist leicht umprogrammierbar, selbst von Nicht-Experten [28]. Zu den besonderen Merkmalen der Cobots gehören Kraft- und Drehmomentsensoren, Bildverarbeitungssysteme, Antikollisionssysteme, die Koordination mit dem menschlichen Bediener und ihr Regelungsrahmen, der Flexibilität und Anpassungsfähigkeit für eine breite Palette von Aufgaben bietet. Die Zusammenarbeit zwischen Menschen und Robotern wird als vielversprechender Ansatz zur Steigerung der Produktivität bei gleichzeitiger Senkung der Wertschöpfungskosten angesehen.

Der Entscheidungsprozess im Rahmen dieser Arbeit soll eine effiziente Entscheidungsfindung für eine optimale Produktverwertung in zirkulären Wertschöpfungssystemen ermöglichen und erfordert eine umfassende Berücksichtigung von (1) wirtschaftlichen, (2) ökologischen und (3) sozialen Faktoren [29]. Um fundierte Entscheidungen zu treffen, ist eine gründliche Analyse auf strategischer, taktischer und operativer Ebene unabdingbar. Strategische Entscheidungen orientieren sich an den Kreislaufwirtschaft-Prinzipien und externen Einflüssen, während taktische Entscheidungen die Ressourcen auf der Grundlage von Produktauswahl und Nachfrage zuweisen. Operative Entscheidungen zur Bewertung einzelner zurückgenommener Produkte stützen sich auf Kennzahlen und spezifische Informationen, wie Stücklisten, Arbeitspläne, Standardarbeitsanweisungen und Kenntnisse des Herstellungsprozesses. Die Einbeziehung dieser Faktoren und Phasen in die Entscheidungsfindung gewährleistet Nachhaltigkeit und Effizienz bei der Produktrückgewinnung und trägt zur Verringerung von Abfällen und zur Ressourcenschonung bei [29, 30].

Die Integration von MRK in die Entscheidungsfindung für die Kreislaufführung von End-of-Use-Produkten stellt daher ein überzeugendes Konzept dar. Es nutzt die Stärken sowohl des menschlichen Bedieners als auch des Roboters und gewährleistet einen flexiblen, anpassungsfähigen und effizienten Ansatz für die zirkuläre Verwaltung und Aufwertung von Ressourcen, wodurch ein wesentlicher Beitrag zur nachhaltigen Fertigung geleistet wird.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-28 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle 2. Fähigkeitsprofile in fünf Bereichen für den menschlichen Bediener und den Roboter in einem Entscheidungsfindungsrahmen für die Bestimmung der Rückgewinnungsstrategie.

Bereich	Qualifikationsprofil des menschlichen Bedieners	Qualifikationsgebiet des Cobots
Technisch-methodische Fähigkeiten	Wartung und Reparatur des Cobots, individuelle Anpassung der Funktionen des Cobots, Nutzung eines systematischen Ansatzes für effizientes Aufgabe-management, interdisziplinäres Wissen und Fähigkeiten zur Datenanalyse. ¢ unerlässlich, um fundierte Entscheidungen zu treffen.	Zeichnet sich durch Automatisierung, Präzision, Sensorintegration, Programmiervielfalt, Sicherheitsfunktionen und eine benutzer freundliche Schnittstelle aus. [31] ¢ wertvolles Kapital für die Automatisierung von Aufgaben. ¢ gewährleistet eine sichere und benutzerfreundliche Umgebung für die Zusammenarbeit.
Sozial-kommunikative Fertigkeiten	Lernbereitschaft, Eigenverantwortung, Motivation und Zuverlässigkeit sind für eine effektive Zusammenarbeit unerlässlich, Umgang mit komplexen Systemen, ganzheitliches Denken. Offenheit für neue Ideen, Stressresistenz und Durchsetzungsvermögen. ¢ ermöglicht eine klare und effektive Kommunikation mit dem Cobot.	Anpassungsfähigkeit, Zusammenarbeit, Sicherheitsbewusstsein, klare Kommunikation und menschliche Kontrollmöglichkeiten. [32, 33] ¢ effektive Zusammenarbeit und Sicherheit gewährleisten. ¢ Anpassung an sich ändernde Aufgabenanforderungen, effektive Kommunikation mit dem Menschen und Priorisierung der Sicherheit.
Persönliche Fähigkeiten	Anpassungsfähigkeit, Zusammenarbeit, kundenorientiertes Denken, partnerschaftliches Denken, Teamarbeit, Gewissenhaftigkeit & Problemlösung ¢ Stärken, die den Entscheidungsprozess fördern flexibel zu reagieren, effektive Kommunikation sicherstellen, Entscheidungen gezielt zu treffen. ¢ spezifische Ziele und sorgen für eine harmonische Interaktion mit dem Cobot.	Verlässlichkeit, Effizienz, Autonomie, kontinuierliches Lernen, Aufgabenorientierung und sicherheitsorientiertes Verhalten [22, 34] ¢ trägt zu einer effizienten und sicheren kollaborativen Entscheidungsfindung bei.
Aktivitäts- und umsetzungsorientierte Fertigkeiten	Zeichnet sich durch selbständiges Arbeiten, Kreativität, sichere Entscheidungsfindung, Stressresistenz, Engagement und Entschlossenheit aus ¢ Gelassenheit unter Druck. ¢ treibt die erfolgreiche Durchführung von Gemeinschaftsprojekten voran.	Zeichnet sich durch Vielseitigkeit, Schnelligkeit, Präzision, adaptive Problemlösung und Ressourcenoptimierung aus [31] ¢ passt sich an verschiedene Branchen an und optimiert die Ressourcennutzung.
Kognitive Fertigkeiten	Schnelle Reaktionszeit, technisches Verständnis, visuelle Wahrnehmung, logisches Denken, räumliches Vorstellungsvermögen & Beherrschung von Überwachungs- und Steuerungsaufgaben. ¢ tragen zu einer fundierten Entscheidungsfindung bei.	Umweltwahrnehmung, Datenanalyse, Lernen und Gedächtnis, Aufgabenplanung und autonome Entscheidungsfindung [35]. ¢ ein Verständnis für seine Umgebung gewährleisten, Daten verarbeiten, sich anpassen, im Laufe der Zeit verbessern und fundierte Entscheidungen in Echtzeit treffen.

4 Entscheidungsfindung zur Befähigung einer Kreislaufwirtschaft durch MRK

Der Rahmen für die kollaborative Entscheidungsfindung für Produkte am Ende ihrer Nutzungsdauer, um eine zirkuläre Wertschöpfung zu ermöglichen, stützt sich auf die Fähigkeitsprofile des menschlichen Bedieners und des Cobots. Daher wurden die Fähigkeitsprofile zunächst entwickelt und dann in ein umfassendes Entscheidungsprozess-Modell integriert.

4.1 Fähigkeitsprofile des menschlichen Bedieners und des Cobots

Um die MRK in der Entscheidungsfindung für Produkte am Ende eines Nutzungszyklus einzusetzen, liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Erstellung der Fähigkeitsprofile des menschlichen Bedieners und des Cobots, um Prozessschritte und Aufgaben gemäß den spezifischen Fähigkeiten zuzuweisen. Wie Kapitel 3.2 darstellt, können die Fähigkeiten des menschlichen Bedieners mit dem Kompetenz Atlas, der von Kode [27] vorgestellt wurde, beschrieben werden. Diese Fähigkeiten werden in eine kollaborative Umgebung im Kontext der Entscheidungsfindung für die zirkuläre Wertschöpfung übertragen. Ein menschlicher Bediener, der in einer kollaborativen Aufgabe mit einem Cobot arbeitet, verfügt über ein facettenreiches Fähigkeitsprofil, das technische Expertise, sozial-kommunikative Kompetenz, persönliche Fähigkeiten, aktivitäts- und umsetzungsorientierte Fähigkeiten sowie kognitive Fähigkeiten kombiniert. Der Cobot kann ebenfalls anhand eines Fähigkeitsprofils beschrieben werden, das auf denselben Domänen basiert wie das des menschlichen Bedieners. Dieses Fähigkeitsprofil umfasst technisch-methodische Fähigkeiten, in denen der Cobot in Automatisierung und Robotik herausragt, mit Präzision Aufgaben ausführt und verschiedene Sensoren für die Wahrnehmung der Umgebung integriert. Er ist für vielfältige Anwendungen programmierbar und beinhaltet Sicherheitsfunktionen für eine reibungslose Interaktion. Zudem bietet er eine benutzerfreundliche Schnittstelle für eine einfache Programmierung und Steuerung [28]. Die Domänen und die spezifischen erwarteten Fähigkeiten werden in **Tabelle 2** dargestellt.

Im kollaborativen Entscheidungsprozess für die Rückgewinnungswege von Produkten am Ende eines Nutzungszyklus bringen Mensch und Cobot ergänzende Fähigkeitsprofile ein, die eine effiziente, informierte und sicherheitsbewusste Auswahl der Rückführungswege reproduzierbar ermöglichen. Die Fähigkeit des Menschen, technisches Wissen, soziale Kommunikationsfähigkeiten, persönliche Attribute und kognitive Fähigkeiten mit

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-28 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

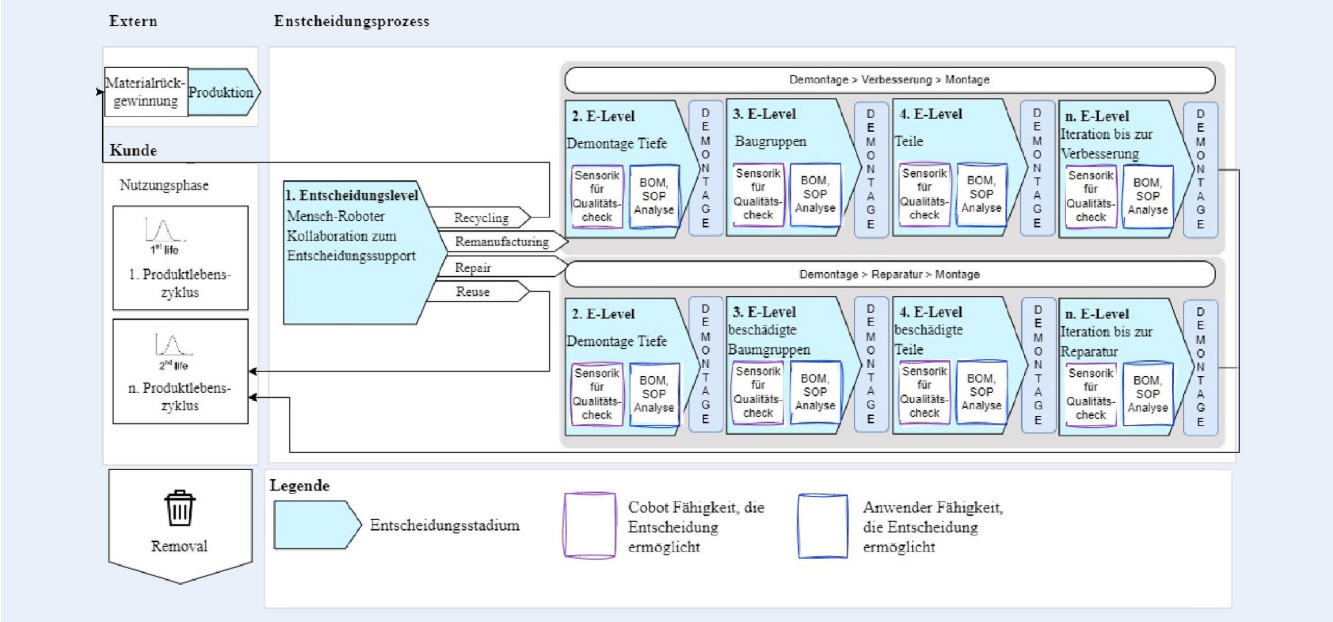

Bild 3. Rahmen des Entscheidungsprozesses auf Produktebene für die Kreislaufwirtschaft. *Grafik: eigene Darstellung*

der technischen Kompetenz, Anpassungsfähigkeit und kollaborativen Fähigkeiten des Cobots zu kombinieren, führt zu einem gut abgerundeten kollaborativen Team für kritische Entscheidungen. Innerhalb dieser Zusammenarbeit bieten die einzigartigen Spezifikationen des Cobots, wie seine Tragfähigkeit, Reichweite, Freiheitsgrade und austauschbare Endeffektoren, einen signifikanten Vorteil. Diese Spezifikationen bieten Vielseitigkeit und Anpassungsfähigkeit und ermöglichen es dem Cobot, ein breites Spektrum von Aufgaben zu bewältigen und zu informationsbasierten, effizienteren und flexibleren Entscheidungsprozess für optimale Rückführungswege in zirkulären Wertschöpfungssystemen beizutragen.

4.2 Entscheidungsrahmen für Produkte am Ende ihrer Nutzungsphase

Der allgemeine zirkuläre Produktlebenszyklus wird in Abbildung 2 veranschaulicht, einschließlich der Produktrückgewinnung und mit Schwerpunkt auf den vier Rückgewinnungsstrategien (1) Recycling, (2) Wiederaufbereitung, (3) Reparatur und (4) Wiederverwendung. Der Bereich „Produktrückgewinnung“ ist der Schwerpunkt für die Implementierung des MRK zur Entscheidungsfindung der R-Strategien.

Dieser Bereich wird weiter untersucht und hinsichtlich der Fähigkeitsprofile spezifiziert. **Bild 3** zeigt die verschiedenen Entscheidungsphasen und die Integration des menschlichen Bedieners und des Roboters.

In der ersten Entscheidungsphase wird über den Verwertungsweg – also der R-Strategie – entschieden. Entscheidet sich die Kollaboration für das Recycling, ist dieser Prozess zu komplex, um in der Herstellungsumgebung durchgeführt zu werden, und das Produkt wird extern zu Sekundärrohstoffen verwertet. Bei der Wiederverwendung werden Produkte, die für ein weiteres Leben geeignet sind, erneut dem Wirtschaftszyklus zugeführt und Kunden direkt bereitgestellt. Die weiteren Entscheidungsstufen für die Wiederaufbereitung und Reparatur sind komplexer und erfordern eine intensivere Zusammenarbeit. Der Entscheidungsprozess für die Wiederaufbereitung umfasst drei Hauptphasen: die Auswahl des Wiederaufbereitungswegs, die Entscheidung über die Demontagetiefe auf Grundlage von Produktinformationen / Arbeitsplänen und der Strukturanalyse durch den Cobot sowie die Bewertung der demontierten Unterbaugruppen mit Hilfe der Sensoren des Cobots und des Fachwissens des Menschen. Jedes Bauteil wird bewertet, um es aufzuarbeiten oder zu ersetzen, damit das Endprodukt dem Standard „so gut wie neu“ entspricht. Teile, die nicht wiederverwendet werden, gehen in ihren eigenen Entscheidungsprozess für den Ressourcenkreislauf ein und unterstützen so eine zirkuläre Wertschöpfung. Im Bereich der Reparatur ist die Entscheidungsfindung ein kollaborativer Prozess, der menschliches Fachwissen und Robotertechnologie kombiniert, um ein Produkt wieder in einen funktionsfähigen Zustand zu versetzen. Dazu gehört die Demontage, der Austausch von Bauteilen und die Wiederherstellung. In der ersten Phase geht es um die Wahl des Reparaturweges. In der zweiten Phase werden die Produktinformationen genutzt, um die erforderliche Demontagetiefe zu bestimmen. Dabei werden sowohl die Strukturanalyse des Roboters mithilfe von Sensoren als auch die Erkenntnisse des menschlichen Bedieners aus der Stückliste, den Standard Operation Procederes und der persönlichen Erfahrung berücksichtigt. Die dritte Phase konzentriert sich auf die Bewertung der demontierten Unterbaugruppen, wobei die Sensoren des Roboters und das Fachwissen des Menschen genutzt werden. Eine weitere Demontage kann erforderlich sein, um defekte Teile zu bewerten und zu reparieren. Während dieses Prozesses werden in verschiedenen Phasen Entscheidungen getroffen, um sicherzustellen, dass jede Komponente zur funktionalen Gesamtqualität des reparierten Produkts beiträgt.

5 Kritische Reflexion

Die Erforschung der Integration von MRK in die Entscheidungsfindung zur zirkulären Wertschöpfung für End-of-Use-Produkte stellt einen zukunftsweisenden Ansatz dar. Eine kritische

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-28 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Reflexion zeigt jedoch mehrere Bereiche auf, die im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten tiefer analysiert werden sollten:

1. Anpassungsfähigkeit des Entwicklungsahmens: Es steht zur weiteren Diskussion, wie das MRK-Rahmenwerk an verschiedene Branchen und Maßstäbe angepasst werden kann, insbesondere unter Berücksichtigung, dass Produkte für zirkuläre Wertschöpfungssystemen konzipiert und eingesetzt sind.
2. Wirtschaftliche Analyse: Eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, einschließlich der Investitionsanforderungen und -erträge, sollte ausgearbeitet werden, um die Integration von MRK zu rechtfertigen.
3. Menschliche Faktoren: Die Erforschung der psychologischen und ergonomischen Herausforderungen bei MRK kann Einblicke in die Dynamik der Mensch-Roboter-Interaktion geben. Dieser Aspekt gewinnt zunehmend an Bedeutung, da Produkte, die für zirkuläre Wertschöpfungssysteme konzipiert sind, unterschiedliche Interaktionsmuster zwischen Menschen und Robotern erfordern können.
4. Ethische und gesellschaftliche Implikationen: Die Arbeit sollte die weitergehenden ethischen und gesellschaftlichen Konsequenzen einer weit verbreiteten Einführung von MRK in der Kreislaufwirtschaft berücksichtigen.

Die Berücksichtigung dieser Punkte wird die Tiefe der Arbeit erhöhen und eine umfassendere Sicht auf die Rolle von MRK in der Kreislaufwirtschaft ermöglichen.

6 Schlussfolgerung und Implikationen für die weitere Forschung

Dieser Beitrag untermauert die Integration von MRK in die Entscheidungsfindung in einer zirkulären Wertschöpfung von End-of-Use-Produkten. Die Erkenntnisse unterstreichen die Synergieen zwischen menschlichem Fachwissen und robotergestützter Präzision, um die Entscheidungsprozesse bei der Produktrückgewinnung zu verbessern und so zu wirtschaftlicher Rentabilität, ökologischer Nachhaltigkeit und sozialem Wohlstand beizutragen. Die Ergebnisse der Arbeit eröffnet neue Wege für die Forschung und regt dazu an, branchenspezifische Anwendungen und die sich entwickelnde Landschaft der Robotertechnologie und künstlichen Intelligenz zu erforschen. Sie fordert eine tiefergehende wirtschaftliche Analyse, um die Kosteneffizienz von MRK-Implementierungen zu verstehen und eine weitere Konzentration auf die Optimierung der Mensch-Roboter-Interaktionsdynamik. Darüber hinaus sind die Bewertung der Umweltauswirkungen und die Auseinandersetzung mit den weitergehenden ethischen und gesellschaftlichen Auswirkungen einer weit verbreiteten Einführung von MRK unerlässlich, um einen ganzheitlichen Ansatz für eine nachhaltige Fertigung und die zirkuläre Wertschöpfung zu gewährleisten. Abschließend wird in diesem Beitrag eine Grundlage für künftige Bemühungen geschaffen, um zu unterstreichen, dass das Potenzial von MRK zur Verbesserung der Kreislaufwirtschaft tiefgreifend ist und weitere wissenschaftliche und praktische angewendete Aufmerksamkeit verdient.

Literatur

[1] Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M.: Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions 127, p. 227, 2017
[2] Rizos, V.; Tuokko, K.; Behrens, A.: The Circular Economy: A review of definitions, processes and impacts, 2017.
[3] Ellen MacArthur Foundation: Circular Consumer Electronics: An initial exploration, p. 286, 2018
[4] Goodall, P.; Graham, I.; Harding, J.; Conway, P. et al.: Cost estimation for remanufacture with limited and uncertain information using case based reasoning 5, 2015
[5] Dobbs, R.; Oppenheim, J.; Thompson, F.; Brinkman, M. et al.: Resource Revolution: Meeting the world's energy, materials, food, and water needs, 2011
[6] Rada, M.: INDUSTRY 5.0 definition – Michael Rada – Medium. https://michael-rada.medium.com/industry-5–0-definition-6a2f9922dc48. Accessed 20 January 2023.
[7] Liu, Y.; Zhang, Y.; Ren, S.; Yang, M. et al.: How can smart technologies contribute to sustainable product lifecycle management? 249, p. 119423, 2020
[8] Tao, Y.; Meng, K.; Lou, P.; Peng, X. et al.: Joint decision-making on automated disassembly system scheme selection and recovery route assignment using multi-objective meta-heuristic algorithm 57, p. 124, 2019
[9] Vongbunyong, S.; Chen, W.H.: Disassembly Automation: Automated Systems with Cognitive Abilities. Springer International Publishing, Cham, 2015
[10] Vongbunyong, S.; Kara, S.; Pagnucco, M.: Application of cognitive robotics in disassembly of products 62, p. 31, 2013
[11] Selvaggio, M.; Cognetti, M.; Nikolaidis, S.; Ivaldi, S. et al.: Autonomy in Physical Human-Robot Interaction: A Brief Survey 6, p. 7989, 2021
[12] Kitchenham, B.; Charters, S.; Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering 2, 2007
[13] Slama, R.; Ben-Ammar, O.; Tlahig, H.; Slama, I. et al.: Human-centred assembly and disassembly systems: a survey on technologies, ergonomic, productivity and optimisation 55, p. 1722, 2022
[14] Phuluwa, H.S.; Mpofu, K.; Human-Robot Collaboration In a Small Scale Rail Industry: Demanufacturing Operations 17, p. 230, 2018
[15] Liu, Y.; Jiang, Z.; Ke, C.: A Task Allocation Method in Human-Robot Collaboration (HRC) for the Disassembly of Automotive Traction Batteries, in 2022 International Conference on Cyber-Physical Social Intelligence (ICCSI), IEEE, p. 332, 2022
[16] Huang, J.; Pham, D.T.; Li, R.; Qu, M. et al.: 2021. An experimental human-robot collaborative disassembly cell 155, p. 1
[17] Hjorth, S.; Chrysostomou, D.: Human–robot collaboration in industrial environments: A literature review on non-destructive disassembly 73, p. 102208, 2022
[18] Hartono, N.; Ramírez, F. J.; Pham, D. T.: A sustainability-based model for robotic disassembly sequence planning in remanufacturing using the Bees Algorithm 55, p. 1013, 2022
[19] Ding, Y.; Xu, W.; Liu, Z.; Zhou, Z. et al.: Robotic Task Oriented Knowledge Graph for Human-Robot Collaboration in Disassembly 83, p. 105, 2019
[20] Pulikottil, T. B.; Pellegrinelli, S.; Pedrocchi, N.: A software tool for human-robot shared-workspace collaboration with task precedence constraints 67, p. 102051, 2021
[21] Lyu, D.; Yang, F.; Kwon, H.; Dong, W. et al.: TDM: Trustworthy Decision-Making Via Interpretability Enhancement 6, p. 450, 2022
[22] Filip, F. G.: Collaborative Decision-Making: Concepts and Supporting Information and Communication Technology Tools and Systems 17, 2022
[23] Zhang, R.; Li, X.; Zheng, Y.; Lv, J. et al.: Cognition-driven Robot Decision Making Method in Human-robot Collaboration Environment, in 2022 IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), IEEE, p. 54, 2022
[24] Pérula-Martínez, R.; Castro-González, Á.; Malfaz, M.; Alonso-Martín, F. et al.: Bioinspired decision-making for a socially interactive robot 54, p. 287, 2019
[25] Chien, S.-Y.; Lin, Y.-L.; Lee, P.-J.; Han, S. et al.: Attention allocation for human multi-robot control: Cognitive analysis based on behavior data and hidden states 117, p. 30, 2018
[26] Müller, R.; Vette, M.; Geenen, A.: Skill-based dynamic task allocation in human-robot-cooperation with the example of welding application 11, p. 13, 2017
[27] KODE®. Der KODE® KompetenzAtlas – KODE®. Internet: https://www.kodekonzept.com/wissensressourcen/kode-kompetenzatlas/. Accessed 24 October 2023
[28] Guerin, K.; Lea, C.; Paxton, C.; Hager, G.: A framework for end-user instruction of a robot assistant for manufacturing, 2015
[29] Goodall, P.; Rosamond, E.; Harding, J.: A review of the state of the art in tools and techniques used to evaluate remanufacturing feasibility 81, p. 1, 2014
[30] Ferguson, M .E.; Fleischmann, M.; Souza, G.C.: A Profit-Maximizing Approach to Disposition Decisions for Product Returns* 42, p. 773, 2011

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-28 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

[31] Chen, W. H.; Wegener, K.; Dietrich, F.: A robot assistant for unscrewing in hybrid human-robot disassembly, in 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014), IEEE, p. 536, 2014
[32] DIN EN ISO 10218–1:2012–01, Industrieroboter_- Sicherheitsanforderungen_- Teil_1: Roboter (ISO_10218–1:2011); Deutsche Fassung EN_ISO_10218–1:2011. Berlin: Beuth Verlag GmbH
[33] ISO/TS 15066:2016, Roboter und Robotikgeräte – Kollaborierende Roboter. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016
[34] Filip, F. G.: Decision support and control for large-scale complex systems 32, p. 61, 2018
[35] Gerbers, R.; Mücke, M.; Dietrich, F.; Dröder, K.: Simplifying Robot Tools by Taking Advantage of Sensor Integration in Human Collaboration Robots 44, p. 287, 2016

Prof. Dr.-Ing. Anja Braun
Tel. +49 7121 271-3120
anja.braun@reutlingen-university.de
Foto: Autorin

Stefanie Loeffler
Foto: Autorin

Hochschule Reutlingen
ESB Business School
Alteburgstr. 150, 72762 Reutlingen
www.esb-business-school.de

LIZENZ

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

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-28 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY