



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Demontagesystem für das Remanufacturing von Fernbedienungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Mensch-Maschine-Interaktion)

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Stefanie Eisl B.Sc.

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung,
Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Felix Stürzl B.Sc.

01526965

Fasangasse 18/13

1030 Wien

Wien, im Juni 2024

Felix Stürzl



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Juni 2024

A handwritten signature in blue ink that reads 'F. Stürzl'.

Felix Stürzl

Danksagung

Mit der Abgabe und Verteidigung dieser Diplomarbeit endet mein Studium an der Technischen Universität Wien. In den vergangenen Jahren habe ich viele wertvolle Erfahrungen gesammelt und zahlreiche Menschen kennengelernt, die mich auf meinem Weg begleitet und unterstützt haben. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken.

Zunächst gilt mein besonderer Dank meiner Betreuerin Dipl. -Ing.in Stefanie Eisl, die mir ermöglicht hat ein spannendes Diplomarbeitsthema im Bereich der Kreislaufwirtschaft zu bearbeiten. Mit ihrer fachlichen Expertise und Unterstützung hat sie maßgeblich zur Verfassung dieser Diplomarbeit beigetragen. Meine Erwartungen an die Betreuung einer Diplomarbeit wurden bei weitem übertroffen.

Ebenfalls möchte ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund danken, dessen Tür trotz vollen Terminkalenders immer für wertvolle Ratschläge und konstruktive Kritik offen ist. Abseits der Unterstützung zur Verfassung dieser Diplomarbeit möchte ich mich auch für die Beschäftigung als studentischer Mitarbeiter am Institut für Managementwissenschaften bedanken. Die Anstellung hat mir spannende Aspekte nähergebracht und Perspektiven für meine berufliche Karriere aufgezeigt, die mir sonst verwehrt geblieben werden. Ein Dank gilt hier auch meinen Kolleginnen und Kollegen, die ebenso zur tollen und offenen Atmosphäre am Institut beitragen.

Außerdem bedanke ich mich bei den Teilnehmer:innen des Expert:innen-Interviews dieser Diplomarbeit für die spannenden Einblicke.

Ich möchte all meinen Freundinnen und Freunden ein Dank aussprechen. Ihr habt mir während der gesamten Studienzeit Rückhalt gegeben und seid der Ausgleich in meinem Leben, um Kraft und Energie für bevorstehende Herausforderungen zu tanken. Ihr habt mit mir bestandene Aufgaben gefeiert und mich nach der ein oder anderen versammelten Mechanik-Prüfung getröstet und aufgepäppelt.

Ein Riesendankeschön gilt meiner Partnerin Agatha Lücker, die ich unverhofft in einer der schwierigsten Übungen des Studiums kennengelernt habe. Zusammen haben wir die schönsten und traurigsten Erlebnisse geteilt und werden noch viele weitere durchleben. Danke, dass du immer für mich da bist und mit mir gemeinsam wächst.

Ich danke meiner Familie und insbesondere meinen Eltern, Gabriele und Andreas Stürzl. Ihr habt mich seit Tag Eins auf meinem Weg begleitet und geprägt. Danke, dass ihr immer ein offenes Ohr und eine Schulter zum Anlehnen für mich habt und mich in jeglicher Lebenslage unterstützt. Ohne euch wäre ich heute nicht, wer ich bin, und dafür bin ich unendlich dankbar!

Kurzfassung

Elektroaltgeräte machen den weltweit am rasantesten wachsenden Anteil am Haushaltsmüll aus. Diese Entwicklung ist auf den steigenden Verbrauch von Elektroaltgeräten, deren kurze Lebenszyklen sowie unzureichende Reparaturmöglichkeiten zurückzuführen. In Kombination mit niedrigen Sammel- und Wiederverwertungsraten stellt die Menschheit somit eine ernsthafte Belastung für die Umwelt und sich selbst dar. Selbst eine 100-prozentige Recyclingrate würde unser verschwenderisches Umgehen mit Ressourcen nicht kompensieren. Die Ursache hierfür ist das vorherrschende lineare Wirtschaftsmodell, bei dem Rohstoffe für die Produktion entnommen, verbraucht und nach Verwendung weggeworfen werden.

Demgegenüber steht die Kreislaufwirtschaft mit ihren Strategien, die darauf abzielen, den höchstmöglichen eingebetteten Wert möglichst lang zu erhalten. Produkte, Komponenten und Materialien werden nicht als Abfall klassifiziert, sondern kontinuierlich in den Kreislauf eingespeist. Remanufacturing stellt eine der Kreislaufwirtschaftsstrategien dar, welche die Verlängerung der Lebensdauer durch die Wiederaufarbeitung von Geräten zum Ziel hat. Im Rahmen des Remanufacturing von Elektroaltgeräten ist eine Demontage der Geräte erforderlich. Die hohe Produktvielfalt sowie die unterschiedlichen Zustände der Geräte stellen eine Herausforderung für die Umsetzung einer automatischen Demontage dar, während die manuelle Demontage ineffizient und unökonomisch ist.

Die vorliegende Diplomarbeit hat zum Ziel, ein produktives Demontagesystem zur Demontage von Elektrokleingeräten und seiner Komponenten zur Wiederverwendung im Sinne des Remanufacturing zu konzipieren. Im Rahmen einer systematischen Literaturrecherche werden bestehende Ansätze und Technologien zur Demontage von Elektrokleingeräten ermittelt. Im Anschluss erfolgt eine theoretische Diskussion der identifizierten Ansätze und Technologien anhand ihrer Eignung, Fernbedienungen zu demontieren. Die theoretischen Erkenntnisse werden anschließend in Form eines Demontage-Demonstrators in der Pilotfabrik der TU Wien praktisch umgesetzt. Das Demontagesystem wird im Anschluss daran anhand von Expert:innen-Interviews evaluiert und zur Beantwortung der Fragestellung, wie ein produktives Demontagesystem für die Demontage von Produkten und ihren Komponenten zur Wiederverwendung im Sinne des Remanufacturing gestaltet wird, herangezogen.

Im Anschluss werden die Ergebnisse diskutiert und ein Ausblick über die Weiterentwicklung des Demontage-Demonstrators sowie über das Remanufacturing gegeben.

Abstract

Waste electrical and electronic equipment (WEEE) represents the fastest-growing segment of household waste globally. This trend is driven by increasing consumption of electronic devices, their short life cycles, and insufficient repair options. Combined with low collection and recycling rates, this poses a significant burden on both the environment and humanity. Even a 100 percent recycling rate would not compensate for our wasteful resource management. The root cause is the prevailing linear economic model, where raw materials are extracted for production, consumed, and then discarded after use.

In contrast, the circular economy employs strategies aimed at preserving the highest possible embedded value for as long as possible. Products, components, and materials are not classified as waste but are continuously reintegrated into the cycle. Remanufacturing is one such circular economy strategy, aiming to extend the lifespan of devices through their reprocessing. Remanufacturing WEEE necessitates the disassembly of these devices. The high diversity of products and their varying conditions present a challenge for the implementation of automated disassembly, while manual disassembly is inefficient and uneconomical.

This thesis aims to design a productive disassembly system for the disassembly of small electronic devices and their components for reuse in the context of remanufacturing. Through a systematic literature review, existing approaches and technologies for disassembling small electronic devices are identified. Subsequently, a theoretical discussion of the identified approaches and technologies is conducted based on their suitability for disassembling remote controls. The theoretical findings are then practically implemented in the form of a disassembly demonstrator at the Pilot Factory of TU Wien. The disassembly system is subsequently evaluated through expert interviews and used to address the question of how to design a productive disassembly system for the disassembly of products and their components for reuse in the context of remanufacturing.

Finally, the results are discussed, and an outlook on the further development of the disassembly demonstrator and remanufacturing is provided.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation: Problemstellung und Problemdefinition	1
1.2	Ziel der Arbeit und Forschungsfragen	3
1.3	Methodik und Vorgehensweise	4
1.4	Erwartete Ergebnisse und Relevanz	8
2	Theoretische Grundlagen.....	9
2.1	Elektro- und Elektronikschrott (WEEE).....	9
2.1.1	Definition Elektro- und Elektronikschrott	10
2.1.2	Schlüsselstatistiken und Hintergründe zur globalen Elektro- und Elektronikschrottproblematik	11
2.1.3	Auswirkungen auf Umwelt und Menschen	12
2.2	Kreislaufwirtschaft	14
2.2.1	Definition Kreislaufwirtschaft.....	14
2.2.2	R-Rahmenwerke und Abfallhierarchie	17
2.2.3	Potentiale der Kreislaufwirtschaft.....	20
2.3	Remanufacturing	20
2.3.1	Definition	20
2.3.2	Remanufacturing-Prozessschritte	22
2.4	Forschungslücken und Implikationen	23
3	Aktueller Stand der Forschung.....	26
3.1	Systematische Literaturrecherche	26
3.1.1	Methode der systematischen Literaturrecherche	26
3.1.2	Planung und Durchführung der systematischen Literaturrecherche	28
3.2	Ergebnisse der deskriptiven Analyse.....	31
3.3	Ergebnisse der thematischen Analyse	33
3.3.1	K1 Rückgewinnung von PCB-Komponenten:	33
3.3.2	K2 Intelligente Demontageanlagen	37
3.3.3	K3 Cobots und Roboter	47
3.3.4	K4 Zerstörende und zerstörungsfreie Demontage	52
3.3.5	K5 Remanufacturing- und Demontageprozesse	55
3.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse	57

4	Theoretische Demontage von Fernbedienungen	62
4.1	Produktgruppe Fernbedienungen	62
4.2	Demontage-Prozessfluss von Fernbedienungen.....	62
4.2.1	Selektion:	63
4.2.2	Demontage gewöhnlicher Fernbedienungen:	65
4.2.3	Demontage hochwertiger Fernbedienungen	67
5	Praktische Umsetzung eines Demontage-Demonstrators.....	70
5.1	Aufbau des Demontage-Demonstrators	70
5.1.1	Selektion	71
5.1.2	Zerstörender Demontage-Arbeitsbereich	73
5.1.3	Komponentenrückgewinnungssystem	75
5.1.4	Zerstörungsfreier Demontage-Arbeitsbereich	76
5.1.5	Automatische optische Inspektion.....	78
5.2	Evaluierung des Demontage-Demonstrators.....	79
5.2.1	Methode & Planung der Evaluierung	79
5.2.2	Analyse & Diskussion der Expert:innen-Interviews	81
6	Diskussion und Ausblick	87
6.1	Diskussion der Ergebnisse	87
6.2	Limitationen und Ausblick.....	90
7	Literaturverzeichnis	94
8	Abbildungsverzeichnis	107
9	Tabellenverzeichnis	109
10	Abkürzungsverzeichnis.....	110

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation: Problemstellung und Problemdefinition

Das lineare Wirtschaftsmodell, das seinen Ursprung in der industriellen Revolution hat, besteht aus Produktions- und Verbrauchsmechanismen, bei denen Ressourcen nach einmaliger Nutzung zu Abfall werden. Aufgrund des unidirektionalen Flusses und der Erschöpfung der Ressourcen wird dieses Modell als linear bezeichnet (Baporikar, 2020). Die Grundprinzipien des linearen Wirtschaftsmodells lassen sich als Take-Make-Dispose (Nehmen-Herstellen-Entsorgen) zusammenfassen. Ressourcen werden entnommen, um gewinnbringende Produkte herzustellen, welche anschließend ohne weiteren Nutzen entsorgt werden (Sariatli, 2017). Dies führt dazu, dass die Menschheit derzeit 1,7-mal mehr Ressourcen verbraucht, als die Erde regenerieren kann. Würden alle Menschen der Welt so leben wie die Einwohner:innen Österreichs, bräuchte die Menschheit sogar 3,7 Erden (Footprint Data Foundation et al., 2023).

Eine ressourcen- und umweltschonendere Alternative zum linearen Wirtschaftsmodell stellt die Kreislaufwirtschaft dar. Die Kreislaufwirtschaft ist ein Wirtschaftssystem, das auf der Wiederverwendbarkeit von Produkten und Produktbestandteilen, dem Recycling von Materialien und der Schonung natürlicher Ressourcen basiert und gleichzeitig die Schaffung von Mehrwert in jedem Glied des Systems anstrebt (Potting et al., 2017). Die Kreislaufwirtschaft kann durch verschiedene Rahmenkonzepte beschrieben werden, eines davon ist das 9R-Rahmenkonzept. Das 9R-Rahmenkonzept wird aus zehn Kreislaufwirtschaftsstrategien gebildet, welche in drei Bereiche unterteilt sind: intelligentere Verwendung und Herstellung von Produkten, Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und Komponenten, Wiederverwendung von Materialien. Remanufacturing ist eine der zehn Kreislaufwirtschaftsstrategien und ordnet sich in den Bereich zur Verlängerung der Lebensdauer ein (Kirchherr et al., 2017). Beim Remanufacturing werden gebrauchte Produkte in einen neuwertigen Funktionszustand mit entsprechender Garantie versetzt. Remanufacturing gilt als nachhaltige Alternative zur konventionellen Herstellung, da sie rentabel und umweltschonender ist. Das Verfahren eignet sich besonders für komplexe elektromechanische und mechanische Produkte deren Hauptkomponenten nach der Wiederaufarbeitung eine hohe Wertsteigerung aufweisen (MatsumotoDr. & IjomahDr., 2013).

Ein wichtiges Anwendungsgebiet für Remanufacturing liegt im Bereich der Elektro- und Elektronikgeräte. Dem UN Global E-Waste Monitor 2020 zufolge wurden 2019 53,6 Millionen Tonnen Elektro- und Elektronikschrott erzeugt, was einen Anstieg von 21%

im Zeitraum der letzten 5 Jahre entspricht. Bis 2030 wird mit einem Anstieg auf 74 Millionen Tonnen gerechnet, womit Elektro- und Elektronikschrott den weltweit am schnellsten wachsenden Anteil am Haushaltsabfall ausmacht, was vor allem auf den steigenden Verbrauch von Elektro- und Elektronikgeräten, kurze Lebenszyklen und geringe Reparaturmöglichkeiten zurückzuführen ist. 2019 wurden lediglich 17,4% des Elektro- und Elektronikschrotts gesammelt und recycelt. Das bedeutet, dass Gold, Silber, Kupfer und andere hochwertige wiederverwendbare Materialien im Wert von 57 Milliarden US-Dollar weggeworfen oder verbrannt wurden, anstatt diese wiederaufzuarbeiten und wiederzuverwenden. Zudem stellt Elektro- und Elektronikschrott ein Risiko für die Gesundheit und Umwelt dar, da er giftige Zusatzstoffe oder gefährliche Substanzen enthält. Europa liegt mit 16,2 kg Elektro- und Elektronikschrott pro Kopf weltweit an erster Stelle, vor Ozeanien (16,1 kg), Amerika (13,3kg), Asien (5,6kg) und Afrika (2,5kg) (Forti et al., 2020). Platinen, zu Englisch Printed Circuit Boards (PCBs), sind der wertvollste Bestandteil von Elektro- und Elektronikschrott. Platinen enthalten viele wiederverwendbare Teile, wertvolle Metalle, aber auch gefährliche und schädliche Bestandteile (Bogue, 2019).

Nach Li et al. (2020) ist die Demontage ein zentraler Prozess beim Remanufacturing von Produkten am Ende ihres Lebenszyklus. Derzeit wird die Demontage in den meisten Fällen manuell von Menschen durchgeführt. Die Automatisierung der Demontage ist wichtig, um den menschlichen Arbeitsaufwand bei der Demontage zu reduzieren und damit Remanufacturing wirtschaftlich attraktiver zu gestalten (Li et al., 2020). Parsa und Saadat (2021) bestätigen, dass die manuelle Demontage ineffizient und wirtschaftlich nicht rentabel ist. Vollautomatisierte Systeme hingegen sind aufgrund des hohen Maßes an Ungewissheit und der Komplexität des Demontageprozesses nicht robust und zuverlässig. Kollaborative Mensch-Roboter-Systeme weisen vielversprechende Eigenschaften auf, um den Demontageprozess weiterzuentwickeln. Ein kollaboratives Mensch-Roboter System vereint die Flexibilität und Fähigkeit von Menschen komplexe Aufgaben zu bewältigen, mit der Wiederholbarkeit und Genauigkeit eines Roboters. Die bedeutendsten Fortschritte und Konzepte für kollaborative Mensch-Roboter-Systeme sind derzeit in der Fertigung und insbesondere in der Montage zu verzeichnen, während es an Grundlagenforschung und Methodenvorschlägen im Bereich von Remanufacturing- und Demontagesystemen fehlt. Angesichts dieser Herausforderungen gibt es derzeit keine standardisierte Vorgehensweise zur Entwicklung von kollaborativen Mensch-Roboter-Systemen für spezifische Produkte im Bereich des Remanufacturing und der Demontage (Parsa & Saadat, 2021).

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Bearbeitung dieser Forschungslücke. Bestehende Ansätze und Technologien zur Demontage von Elektrokleingeräten werden identifiziert und analysiert. Anhand einer zu demontierenden Produktgruppe innerhalb des Elektro- und Elektronikschrotts sollen die Ansätze und Technologien

praktisch in Form eines Demontage-Demonstrators umgesetzt, vorgeführt und evaluiert werden. Als Produktgruppe werden hierfür Fernbedienungen herangezogen, bei denen die Demontage und Rückgewinnung der PCB oder ihrer Komponenten im Sinne des Remanufacturing im Fokus steht. Mit Hilfe der identifizierten Ansätze und Technologien und den praktischen Erfahrungswerten aus der Gestaltung des Demontage-Demonstrator, wird erörtert, welche Ansätze und Technologien verwendet, und welche Adaptierungen notwendig sind, um weitere Elektrokleingeräte im Sinne des Remanufacturing zu demontieren.

1.2 Ziel der Arbeit und Forschungsfragen

Ziel dieser Diplomarbeit ist die Ausarbeitung relevanter Ansätze und Technologien für die Demontage einer spezifischen Produktgruppe innerhalb der Elektrokleingeräte zu erarbeiten, um die Gestaltung eines solchen Demontagesystems zu ermöglichen. Der Fokus liegt dabei auf der zerstörungsfreien Rückgewinnung von Produkten oder Komponenten im Sinne des Remanufacturing. Das technologieunterstützte Demontagesystem soll so gestaltet werden, dass unterschiedliche, aber ähnliche Produkte der Produktgruppe demontiert werden können. Als Produktgruppe werden Fernbedienungen herangezogen, die gemäß dem UN Global E-Waste Monitor 2020 der Kategorie Haushaltskleingeräte zugeordnet werden (Forti et al., 2020). Das erarbeitete theoretische Grundwissen soll anschließend für den Aufbau eines technologieunterstützten Demontage-Demonstrators genutzt werden.

Ziel der Arbeit ist die Beantwortung der Hauptforschungsfrage **H1**:

H1 Wie muss ein produktives Arbeitssystem für die Demontage von Elektrokleingeräten aufgebaut werden, damit dieses im Bereich des Remanufacturing eingesetzt werden kann?

Zur Beantwortung der Hauptforschungsfrage werden die folgenden Subforschungsfragen **S1-S3** herangezogen:

S1 Welche Ansätze und Technologien für die Demontage von Elektro- und Elektronikschrott im Bereich des Remanufacturing von Elektrokleingeräten gibt es bereits?

Durch eine systematische Literaturrecherche wird ermittelt, welche Ansätze und Technologien zum Remanufacturing von Elektrokleingeräten bereits existieren und umgesetzt werden. Es wird recherchiert wie diese Ansätze und Technologien implementiert werden, um produktive Demontagesysteme zu gestalten, bei denen die

Demontage sowohl effizienter als auch unter verringerter kognitiver Belastung und verringerten Arbeitsaufwand der Arbeiter:innen erfolgt.

S2 Wie kann ein produktives Demontagesystem für das Remanufacturing von Fernbedienungen gestaltet werden?

Die in Subforschungsfrage **S1** recherchierten Ansätze und Technologien werden anhand eines Praxisbeispiels demonstriert. Dazu wird zunächst die Relevanz der verschiedenen Ansätze und Technologien für die Gestaltung eines Arbeitssystems zur Demontage von Fernbedienungen diskutiert. Anschließend wird ein Demontage-Demonstrator entwickelt, der einen Arbeitsplatz zur Demontage von Fernbedienungen darstellt. Ziel ist es, ein Demontagesystem zu schaffen, das die kognitive Belastung des Menschen reduziert und gleichzeitig den menschlichen Arbeitsaufwand verringert, um den Demontageprozess effizienter und wirtschaftlicher zu gestalten. Im Anschluss an die Entwicklung des Demontagesystems erfolgt eine Evaluierung anhand qualitativer, semi-strukturierter Expert:innen-Interviews. Im Rahmen dessen wird Feedback zum entwickelten Demontagesystem eingeholt und potenzielle Weiterentwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt und diskutiert. Des Weiteren werden die Vor- und Nachteile eines technologieunterstützten Demontagesystems gegenüber einem rein manuellen Demontagesystem erörtert.

S3 Welche Ansätze und Technologien können verwendet werden und welche Adaptierungen braucht es, um andere Produktgruppen aus dem Bereich der Elektrokleingeräte zu demontieren? Für welche anderen Produktgruppen aus dem Bereich der Elektrokleingeräte eignet sich ein solches Demontagesystem?

Mit Hilfe von Subforschungsfrage **S3** wird der Kreis zur Beantwortung der Hauptforschungsfrage geschlossen. Es wird erörtert, wie ein Arbeitssystem zur Demontage anderer Produktgruppen aus dem Bereich der Elektrokleingeräte gestaltet werden kann. In diesem Zusammenhang wird die Analyse von **Frage V** des qualitativen, semistrukturierten Expert:innen-Interviews aus Subforschungsfrage **S2** herangezogen und diskutiert. In die Diskussion fließen die bei der Gestaltung des Demontage-Demonstrators gesammelten Erfahrungswerte aus Subforschungsfrage **S2** sowie die Erkenntnisse aus der systematischen Literaturrecherche aus Subforschungsfrage **S1** ein.

1.3 Methodik und Vorgehensweise

Design Science Research (DSR) ist im Wesentlichen ein Problemlösungsparadigma. Absicht der DSR ist die Erweiterung des menschlichen Wissens, durch die Kreierung innovativer Artefakte und Generierung von Designwissen, anhand Problemen der realen Welt (Hevner et al., 2004). Dieses Designwissen kann und soll im Weiteren festgehalten werden, um das zukünftige Designwissen zu erweitern.

Design Science Research ist ein zentrales Forschungsparadigma, das in vielen Forschungsbereichen, inklusive Ingenieurs-, Wirtschafts- und Unternehmenswissenschaften, angewandt wird (Vom Brocke et al., 2020).

Abbildung 1 zeigt einen konzeptuellen Rahmen der DSR-Methodologie, um diese auf seinem Forschungsgebiet richtig zu verstehen, anzuwenden und zu evaluieren (Hevner et al., 2004).

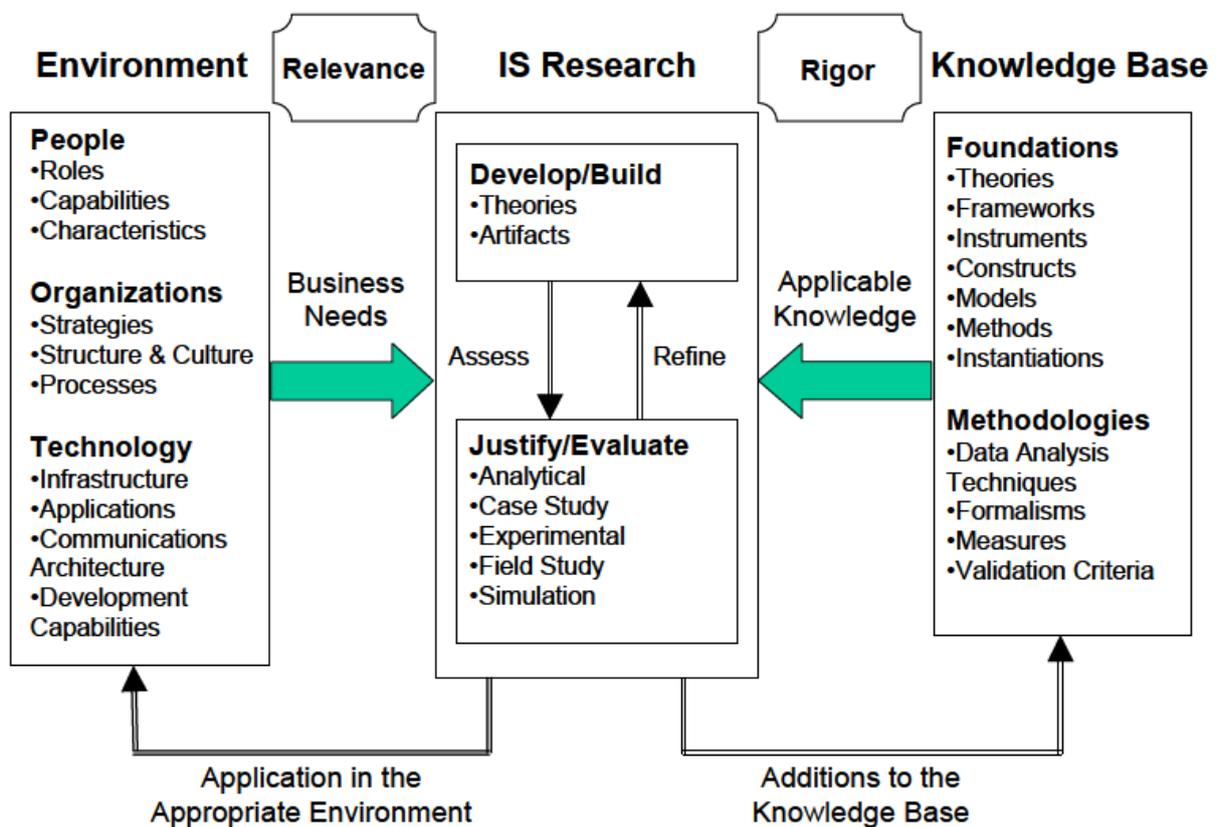


Abbildung 1: Design Science Research Framework (Hevner et al., 2004)

Design Science Research kann durch einige Prozessmodelle angewandt werden. Eines der meist verwendeten ist die Design Science Research Methodologie nach Peffers et al. (2007). Dabei wird der Prozess in sechs Aktivitäten gegliedert:

Aktivität 1: Problemidentifikation und -motivation

Hier wird eine spezifische Problemstellung definiert und der Wert, den eine Lösung bringen soll, wird erörtert. Den Wert der Lösung im Vorhinein zu bestimmen, erzielt zwei Effekte: Einerseits wird der Forscher dazu motiviert die Lösung zu finden, andererseits hilft es der Zuhörerschaft die Lösung des Forschers zu verstehen (Peffers et al., 2007).

Die Problemstellung und Motivation dieser Arbeit wurde bereits in Kapitel 1.1 detailliert ausgeführt.

Aktivität 2: Definieren der Ziele für eine Lösung

Aus der Problemstellung lassen sich mögliche Ziele einer Lösung ableiten. Die Ziele können sowohl qualitativer, als auch quantitativer Natur sein. Ziele können ein neues Artefakt zur Lösung eines Problems sein oder die Findung einer neuen Lösung die Vorteile im Vergleich zur alten bietet. Zum Definieren der Ziele wird bereits grundlegendes theoretisches Wissen über das Problem und aktuelle Lösungsansätze benötigt (Peffer et al., 2007).

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, Ansätze und Technologien zur Gestaltung eines Arbeitssystems zur Demontage zu identifizieren, damit Elektrokleingeräte oder ihre Komponenten im Sinne des Remanufacturing zerstörungsfrei demontiert werden können. Durch den Einsatz verschiedener Technologien soll ein Demontagesystem entstehen, welches den Demontageprozess effizienter gestaltet als eine rein manuelle Demontage. Das erarbeitete Grundlagenwissen soll anschließend durch den Aufbau eines Demontage-Demonstrators in die Praxis umgesetzt werden. Eine detaillierte Erläuterung der Zielsetzung der Arbeit findet sich in Kapitel 1.2.

Aktivität 3: Design und Entwicklung

Das Artefakt zur Lösung wird erstellt und weiterentwickelt. Artefakte können alle Konstrukte, Modelle, Methoden oder sonstige designte Ressourcen sein, in welchen ein Forschungsbeitrag eingebettet ist. In dieser Aktivität wird der gewünschte Aufbau und die gewünschte Funktion determiniert und das tatsächliche Artefakt erstellt. Hierzu ist grundlegendes theoretisches Wissen nötig, um ein für die Problemstellung geeignetes Artefakt zu schaffen (Peffer et al., 2007).

Das theoretische Wissen wird in dieser Arbeit anhand von Fachliteratur, aktuellen Publikationen und Praxisbeispielen erarbeitet. Es werden aktuelle Ansätze für Demontagesysteme identifiziert und untersucht, wie diese für die Demontage von Elektrokleingeräten umgesetzt werden können. Zudem wird diskutiert, welche der identifizierten Ansätze und Technologien für die Gestaltung eines Demontage-Demonstrator zur Demontage von Fernbedienungen sinnvoll implementiert werden können. Dabei orientiert sich diese Arbeit an der Hauptforschungsfrage **H1** und den Subforschungsfragen **S1-S3** aus Kapitel 1.2.

Aktivität 4: Demonstration

Das Artefakt wird zur Lösung eines oder mehrerer Probleme verwendet. Mögliche Anwendungsbereiche sind Simulationen, Case Studies oder andere angemessene Aktivitäten. Das Wissen wie das Artefakt angewendet wird, ist für die Demonstration notwendig (Peffer et al., 2007).

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden die in Aktivität 3 als sinnvoll und umsetzbar deklarierten Technologien anhand eines technologieunterstützten Demontage-Demonstrators umgesetzt. Der Demontage-Demonstrator stellt einen Demontage-Arbeitsplatz zur zerstörungsfreien Demontage von Fernbedienungen oder ihrer Komponenten dar. Der Demontage-Demonstrator soll es einer Person ermöglichen, mit Hilfe des Demontagesystems verschiedene Fernbedienungen zu zerlegen. Die Demontage der Fernbedienungen soll effizienter als bei einer rein manuellen Demontage erfolgen.

Aktivität 5: Evaluierung

In der Evaluierung wird durch Beobachtung und Messung festgestellt ob und inwiefern das Artefakt zur Lösung des Problems beiträgt. Geeignete Analysemethoden werden ausgewählt und angewandt. Die Evaluierung kann entsprechend der Natur des Problems unterschiedliche Formen annehmen. Das Spektrum reicht vom Vergleich verschiedener Leistungsparameter, über Nutzer:innen-Feedback bis hin zum logischen Beweis. Nach Abschluss dieser Aktivität kann entschieden werden, ob die Lösung zufriedenstellend ist oder zurück zu Aktivität 3 gesprungen werden muss, um die Design Science Research Methode iterativ fortzusetzen (Peffer et al., 2007).

Der in Aktivität 4 aufgebaute Demontage-Demonstrator wird anhand qualitativer, semistrukturierter Expert:innen-Interviews evaluiert. Hierzu werden sieben Expert:innen aus der Forschung und Industrie interviewt, wobei ein semistrukturierter Interviewleitfaden als Grundlage der Befragung entwickelt wird. Anhand der Befragung wird Feedback zum entwickelten Demontage-Demonstrator eingeholt, Verbesserungspotentiale aufgedeckt sowie Weiterentwicklungsmöglichkeiten identifiziert. Zudem werden Vor- und Nachteile eines technologieunterstützten Demontagesystems gegenüber einem rein manuellen Demontagesystem diskutiert. Außerdem wird erfragt welche technischen Innovationen, Maßnahmen der Gesetzgeber:innen, wirtschaftlichen Anreize und organisatorischen Veränderungen notwendig sind, um die Kreislaufwirtschaft zu unterstützen, damit Elektrokleingeräte und ihre Komponenten nachhaltig demontiert werden, so dass sie im Sinne des Remanufacturing wiederverwendet werden können.

Aktivität 6: Kommunikation

Das Problem und die Wichtigkeit der Lösung dieses Problems, sowie der Neuheitswert und Nutzwert für Forscher und praktizierende Akteure des Artefakts, werden nach außen kommuniziert (Peffer et al., 2007).

Die Kommunikation der gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse erfolgt durch die Veröffentlichung dieser Diplomarbeit. Im folgenden Kapitel 1.4 werden die bereits erwarteten Ergebnisse diskutiert. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Ergebnisse der Evaluierung aus Aktivität 5 analysiert und diskutiert. Ein Ausblick in

Bezug auf das Thema „Demontagesystem für das Remanufacturing von Fernbedienungen und ihrer Komponenten“ und die Weiterentwicklung des Demontage-Demonstrators werden diskutiert und kommuniziert.

1.4 Erwartete Ergebnisse und Relevanz

Im Rahmen des Design Science Research Forschungsansatzes werden Technologien, die für ein technologieunterstütztes Demontagesystem eingesetzt werden können, identifiziert. Durch die Erarbeitung des theoretischen Grundlagenwissens wird ermittelt welche Ansätze und Technologien zur Verfügung stehen, um Elektrokleingeräte effizient und im Sinne des Remanufacturing zu demontieren. Der Aufbau des Demontage-Demonstrators zeigt, wie die untersuchten Technologien praktisch umgesetzt werden können, um Produkte einer bestimmten Produktgruppe der Elektrokleingeräte zu demontieren. Durch die Evaluierung des gestalteten Demontage-Demonstrators werden die Vor- und Nachteile des Demontagesystems aufgezeigt und dokumentiert, sowie Hinweise für eine mögliche Weiterentwicklung des Systems gegeben. Die Vorteile eines technologieunterstützten Demontagesystems können eine gesteigerte Effizienz sowie eine Reduktion des menschlichen Arbeitsaufwandes sein, was zu einer Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Remanufacturing von Fernbedienungen führen würde.

Die Relevanz der Diplomarbeit ist durch die steigende Masse an Elektro- und Elektronikschrott, welcher den Menschen und die Umwelt gefährdet und schädigt (Forti et al., 2020). Remanufacturing bietet einen Lösungsansatz zu dieser Problematik, indem weniger Produkte, die am Ende ihres Lebenszyklus stehen entsorgt werden. Stattdessen werden die gebrauchten Produkte in einen neuwertigen Funktionszustand versetzt. Das Verfahren ist besonders für komplexe elektromechanische und mechanische Produkte lohnenswert, da diese nach der Wiederaufarbeitung eine hohe Wertsteigerung aufweisen (MatsumotoDr. & IjomahDr., 2013). Ein wichtiger Schritt im Remanufacturing ist die Demontage der Produkte. Derzeit erfolgt die Demontage zumeist durch manuellen Arbeitsaufwand von Menschen, was den Remanufacturing-Prozess ineffizient und unrentabel macht (Li et al., 2020). Eine vollständige Automatisierung ist aufgrund der Komplexität der Demontageprozesse jedoch nicht stabil und robust genug. Deswegen werden kollaborative Mensch-Roboter-Demontagesysteme vorgeschlagen, welche die Flexibilität und Fähigkeit von Menschen komplexe Aufgaben zu bewältigen, mit der Wiederholbarkeit und Genauigkeit eines Roboters vereint. Da es an Grundlagenforschung für kollaborative Demontagesystem fehlt, ist die Zielsetzung dieser Diplomarbeit besonders relevant (Parsa & Saadat, 2021).

2 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel behandelt die theoretischen Grundlagen von Elektro- und Elektronikschrott, Kreislaufwirtschaft und Remanufacturing.

Im ersten Abschnitt wird die Problematik von Elektro- und Elektronikschrott näher erläutert und definiert. Außerdem werden Schlüsselstatistiken besprochen und Hintergründe zur Problematik von Elektro- und Elektronikschrott aufgezeigt. Abschließend werden die Auswirkungen von Elektro- und Elektronikschrott auf Menschen und Umwelt diskutiert.

Der zweite Abschnitt beschäftigt sich mit der Kreislaufwirtschaft. Zunächst wird das derzeit vorherrschende lineare Wirtschaftsmodell vorgestellt und kritisch diskutiert. Anschließend wird die Kreislaufwirtschaft definiert. Des Weiteren werden die verschiedenen R-Rahmenwerke vorgestellt und die Verbindung zur Abfallhierarchie hergestellt. Zuletzt werden die Potentiale der Kreislaufwirtschaft besprochen.

Der dritte Abschnitt befasst sich mit der Kreislaufstrategie Remanufacturing. Remanufacturing wird definiert und von anderen Kreislaufstrategien abgegrenzt. Im weiteren Verlauf wird der Teilprozessschritt 'Demontage' definiert. Es wird erläutert, wie sich die Demontage weiterentwickeln muss, um wirtschaftlich rentabel zu werden. Anschließend werden die Potentiale des Remanufacturing in Hinblick auf Elektro- und Elektronikschrott beschrieben.

Der vierte Abschnitt beschäftigt sich mit den durch die theoretischen Grundlagen aufgedeckten Forschungslücken und den Implikationen, die diese auf diese Diplomarbeit haben.

2.1 Elektro- und Elektronikschrott (WEEE)

Das gegenwärtig vorherrschende lineare Wirtschaftsmodell, das seinen Ursprung in der industriellen Revolution hat, besteht aus Produktions- und Verbrauchsmechanismen, bei denen Ressourcen nach einmaliger Nutzung zu Abfall werden (Baporikar, 2020). Die Grundprinzipien des linearen Wirtschaftsmodells lassen sich als Take-Make-Dispose (Nehmen-Herstellen-Entsorgen) zusammenfassen. Die entnommenen Ressourcen, dienen zur Herstellung gewinnbringender Produkte, welche anschließend ohne weiteren Nutzen als Müll entsorgt werden (Sariatli, 2017). Der weltweit steigende Ressourcenverbrauch und das verschwenderische "Take-Make-Dispose"-Konzept tragen dazu bei, dass das lineare Wirtschaftsmodell nicht nachhaltig ist. Ein zentrales Problem der linearen Wirtschaft ist die Erzeugung großer Abfallmengen, welche irreversible negative Konsequenzen für die Umwelt mit sich bringen (Sapmaz Veral, 2019). Eine bedeutende Abfallkategorie stellt der Elektro- und Elektronikschrott dar (Forti et al., 2020).

2.1.1 Definition Elektro- und Elektronikschrott

Nach Ziegler ist Elektro- und Elektronikschrott oder aus dem Englischen Waste of Electrical and Electronic Equipment (WEEE) die Bezeichnung für alte, ausgediente oder ausrangierte Geräte am Ende ihres Lebenszyklus, die mit Strom betrieben werden (2013). Die StEP-Initiative (Solving the E-waste Problem) definiert elektrische und elektronische Geräte, zu Englisch Electrical and Electronic Equipment (EEE), als Haushalts- oder Geschäftsgegenstände mit Schaltkreisen oder elektrischen Komponenten mit Batterie- oder Stromversorgung. Elektro- und Elektronikschrott, zu Englisch Electronic Waste (E-Waste), bezeichnet somit alle EEE-Geräte und Komponenten, die von Besitzer:innen als Abfall entsorgt wurden, ohne die Absicht der Wiederverwendung (Step Initiative, 2014). E-Waste und WEEE werden als Synonym für Elektro- und Elektronikschrott verwendet (Schluep, 2014).

Nahezu jeder Haushalt und jedes Geschäft verwendet elektrische und elektronische Geräte, wie z.B. Küchengeräte, Spielzeug, Mobiltelefone, Laptops etc. Darüber hinaus werden elektrische und elektronische Geräte zunehmend im Verkehr, in der Gesundheits- und Sicherheitstechnik sowie zur Energieerzeugung, z.B. in Photovoltaikanlagen, eingesetzt. Auch traditionelle Produkte wie Kleidung und Möbel sind häufig mit elektrischen Komponenten ausgestattet. Immer mehr elektrische und elektronische Geräte werden auch im wachsenden Bereich des Internet of Things (IoT) eingesetzt, wie z.B. Sensoren oder Geräte, die Teil des Konzepts "Smart Home" oder "Smart Cities" sind (Forti et al., 2020). EEE und folglich WEEE umfassen eine Vielzahl von Produkten, die für statistische Zwecke auf der Grundlage ähnlicher Funktionen, vergleichbarer Materialzusammensetzung, durchschnittlichem Gewicht und ähnlichen Eigenschaften am Ende der Lebensdauer kategorisiert werden. Die E-Waste Statistics Guidelines on Classification Reporting and Indicators - Second Edition kategorisieren EEE und WEEE in 54 verschiedene Produktkategorien, die als UNU-Keys bezeichnet werden. Die 54 Produktkategorien werden entsprechend ihrer abfallwirtschaftlichen Eigenschaften in sechs übergeordnete Kategorien eingeteilt (Forti et al., 2018). Auf Wiener Mistplätzen erfolgt die Sammlung und Entsorgung von Elektro-Altgeräten anhand der folgenden Kategorien (Stadt Wien: Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark, 2024):

- Elektro-Großgeräte (Kantenlänge über 50 Zentimeter)
(z.B. Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspüler)
- Elektro-Kleingeräte (Kantenlänge unter 50 Zentimeter)
(z.B. Fernbedienungen, Bohrmaschinen, Computerzubehör, Konsolen)
- Kühl- und Gefriergeräte
(z.B. Kühlschränke, Tiefkühltruhen, Klimageräte)
- Bildschirmgeräte
(z.B. TV-Geräte, Computerbildschirme, Laptops, Monitore)

- Gasentladungslampen
(z.B. Energiesparlampen, Leuchtstoffröhren, Quecksilber- und Natriumdampflampen)

2.1.2 Schlüsselstatistiken und Hintergründe zur globalen Elektro- und Elektronikschrottnproblematik

Durch den vielfältigen Einsatz und Verbrauch von elektrischen und elektronischen Geräten steigt die Menge an WEEE. Dem Global E-Waste Monitor zufolge wurden 2019 53,6 Millionen Tonnen Elektro- und Elektronikschrott erzeugt. Dies entspricht einem Anstieg von 21% in den letzten fünf Jahren. Bis 2030 wird ein Anstieg auf 74 Millionen Tonnen prognostiziert, womit WEEE den weltweit am schnellsten wachsenden Anteil am Abfall ausmacht, was vor allem auf den steigenden Verbrauch von Elektro- und Elektronikgeräten, kurze Lebenszyklen und unzureichenden Reparaturmöglichkeiten zurückzuführen ist. Europa liegt mit 16,2 kg Elektro- und Elektronikschrott pro Kopf weltweit an erster Stelle, vor Ozeanien (16,1 kg), Amerika (13,3kg), Asien (5,6kg) und Afrika (2,5kg) (Forti et al., 2020).

Der rasante Anstieg von Elektro- und Elektronikschrott hat zur Folge, dass Recyclingaktivitäten nicht Schritt halten können. Europa war 2019 mit 42,5 Prozent der Kontinent mit der höchsten Sammel- und Recyclingrate, gefolgt von Asien (11,7 Prozent), Amerika (9,4 Prozent) und Ozeanien (8,8 Prozent). Afrika liegt mit einer Sammel- und Recyclingrate von 0,9 Prozent weit hinterher. 2019 wurden weltweit lediglich 17,4% des Elektro- und Elektronikschrotts gesammelt und recycelt. Dementsprechend ist der Verbleib von 82,6 Prozent des 2019 angefallenen WEEE ungewiss, mit unterschiedlichen Umweltauswirkungen auf die verschiedenen Regionen. Länder mit hohem Einkommen verfügen üblicherweise über eine ausgebaute Infrastruktur zum Recycling von WEEE. Trotz der vorhandenen Infrastruktur sind große Defizite zu vermerken (Forti et al., 2020):

- Ca. acht Prozent des WEEEs werden über den Haushaltsmüll entsorgt und anschließend deponiert oder verbrannt. Dabei handelt es sich meist um Kleingeräte und kleine IT-Geräte.
- Der Großteil des nicht erfassten WEEE aus Haushalten und Gewerbebetrieben wird mit anderen Abfallströmen, wie Kunststoff- und Metallabfällen, vermischt.
- Ausrangierte Elektro- und Elektronikprodukte können manchmal aufgearbeitet (refurbished) oder wiederverwendet (reused) werden. Diese gebrauchten Produkte werden in der Regel in Länder mit niedrigem oder mittlerem Einkommen verschifft. Ein wesentlicher Anteil der verschifften Produkte, besteht jedoch aus Elektro- und Elektronikschrott, der unter dem Deckmantel der Wiederverwendbarkeit oder als wiederverwendbares Altmetall illegal exportiert wird. Es wird angenommen, dass zwischen sieben und 20 Prozent

des anfallenden WEEE als gebrauchte Elektro- und Elektronikprodukte oder WEEE grenzüberschreitend transportiert werden.

In Ländern mit mittlerem und niedrigem Einkommen ist die Infrastruktur für die Sammlung und das Recycling von WEEE unterentwickelt oder in einigen Fällen nicht existent. Die Entsorgung oder Sammlung erfolgt daher meist abseits von staatlichen Regulierungen und Gesetzen über den informellen Sektor. Dabei wird der WEEE oft unter unzureichenden Arbeitsbedingungen für Arbeiter:innen entsorgt und verwertet. Die Konsequenz sind schwere gesundheitliche Belastungen und Beeinträchtigungen für die Arbeiter:innen und Kinder, die oft in der Nähe der Entsorgungsanlagen leben, spielen oder selbst arbeiten (Forti et al., 2020).

2.1.3 Auswirkungen auf Umwelt und Menschen

Elektro- und Elektronikschrott enthält verschiedene toxische und gefährliche Substanzen, darunter Schwermetalle wie Quecksilber, Cadmium und Blei sowie Chemikalien wie bromierte Flammschutzmittel ((brominated flame retardants - BFR), Chlorfluorkohlenwasserstoffe ((chlorofluorocarbons - CFCs) oder Hydrochlorofluorkohlenwasserstoffe (hydrochlorofluorocarbons - HCFCs). Der Anstieg an WEEE, die niedrige Sammlungsquote und die nicht umweltgerechte Entsorgung stellen erhebliche Risiken für die Umwelt und die menschliche Gesundheit dar. Jährlich werden 50 Tonnen Quecksilber und 71 Kilotonnen BFR über undokumentierte Abfallströme entsorgt, die zu einem großen Teil in die Umwelt gelangen. Der unsachgemäße Umgang mit E-Waste trägt zur globalen Erwärmung bei. Die im E-Waste enthaltenen Rohstoffe können nicht recycelt und als Ersatz für Primärrohstoffe dienen, bei deren Herstellung und Veredelung Treibhausgasemissionen freigesetzt werden (Forti et al., 2020). Quecksilber befindet sich unter anderem in Schaltern, Relais, Displays für Desktops, Laptops, Mobiltelefone und Flachbildschirme sowie in Kompaktleuchtstofflampen und Leuchtstofflampen. Werden diese Geräte nicht ordnungsgemäß entsorgt, kann Quecksilber in die Nahrungskette gelangen und sich in Lebewesen anreichern. Die Folgen sind Schäden am zentralen Nervensystem, der Schilddrüse, den Nieren, der Lunge und dem Immunsystem (Baldé et al., 2018). BFR werden verwendet, um die Entflammbarkeiten von Geräten zu verringern. Sie befinden sich beispielsweise in Außengehäusen von Computern, Platinen, Relais, Drähten und Kabeln (Herat, 2008). Das Recycling von Kunststoffen, die die BFR-Chemikalien PBDE oder PBB enthalten, ist aufwendig und kostspielig. Recycelte Kunststoffe dürfen einen Wert von 0,1% PBDE bzw. PBB nicht überschreiten. Aus diesem Grund werden die Kunststoffe von zugelassenen Entsorgungsunternehmen unter kontrollierten Bedingungen verbrannt, um die Freisetzung von Dioxinen und Furanen zu verhindern. Wenn die Verbrennung jedoch nicht ordnungsgemäß erfolgt, können freigesetzte Stoffe eine Gefahr für die Gesundheit oder die Umwelt darstellen. Einige dieser Schadstoffe sind persistent, toxisch und reichern sich in Lebewesen an.

Sie können Nierenschäden, verschiedene Hautkrankheiten sowie Auswirkungen auf das Nerven- und Immunsystem verursachen (Forti et al., 2020). CFCs und HCFCs sind Kühlmittel, die den Treibhausgasen zuzuordnen sind und befinden sich in den Kühlkreisläufen älterer Wärmeaustauschgeräte. Durch die nicht umweltgerechte Entsorgung von Kühlschränken und Klimaanlage wurde 2019 das Äquivalent von 98 Millionen Tonnen CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt. Dies entspricht in etwa 0,3 % der weltweiten energiebezogenen Emissionen im Jahr 2019 (Forti et al., 2020).

Für ein sicheres und umweltgerechtes Recycling von WEEE ist es wichtig, auf gefährliche Stoffe zu achten. Durch ordnungsgemäßes Recycling kann die Freisetzung dieser Stoffe in die Umwelt vermieden werden. Obwohl einige Vorschriften die Verwendung bestimmter Stoffe verbieten, müssen Altgeräte, die diese Stoffe noch enthalten, ordnungsgemäß gesammelt und verwertet werden, um die Gefahren für Umwelt und Gesundheit zu minimieren. Darüber hinaus können auch neue Geräte geringe Mengen dieser Schadstoffe enthalten, da sie technisch noch nicht ersetzt werden konnten (Forti et al., 2020).

Besonders in Ländern mit niedrigem Einkommen ist die Infrastruktur für die Sammlung und das Recycling unterentwickelt oder nicht existent. Die Entsorgung oder Sammlung von WEEE erfolgt meist abseits von staatlichen Regulierungen und Gesetzen unter unzureichenden Arbeitsbedingungen für die Arbeiter:innen. Die Folge sind schwere gesundheitliche Belastungen und Beeinträchtigungen (Forti et al., 2020). Erwachsene und Kinder können durch das Einatmen von giftigen Dämpfen und Partikeln, durch Hautkontakt mit ätzenden Stoffen und Chemikalien, sowie durch die Aufnahme von kontaminierten Lebensmitteln und Wasser gefährdet werden. Kinder sind dabei oft besonders gefährdet, da sie die Giftstoffe über mehrere Wege aufnehmen. Gefährliche Schadstoffe können bereits während der Schwangerschaft oder des Stillens übertragen werden. Kleine Kinder nehmen beim Spielen häufig ihre Hände, verseuchte Gegenstände oder Erde in den Mund (Landrigan & Goldman, 2011). Die Folgen sind diverse gesundheitliche Auswirkungen. Dazu gehören ungünstige Geburtsergebnisse (Y. Zhang et al., 2018), Beeinträchtigungen der neurologischen Entwicklung (Huo et al., 2019), verminderte Lernfähigkeit (Soetrisno & Delgado-Saborit, 2020), DNA-Schäden (Alabi et al., 2012), nachteilige Auswirkungen auf das Herz-Kreislauf-System (Cong et al., 2018), die Atemwege (Amoabeng Nti et al., 2020) und das Immunsystem (Huo et al., 2019) sowie Hautkrankheiten (Decharat & Kiddee, 2020; Seith et al., 2019), Hörverlust (Xu et al., 2020) und Krebs (Davis & Garb, 2019). Außerdem berichten E-Waste-Arbeiter:innen, die unter unzureichenden Arbeitsbedingungen arbeiten müssen, über Stress, Kopfschmerzen, Kurzatmigkeit, Brustschmerzen, Schwäche und Schwindel (Grant et al., 2013).

Eine ordnungsgemäße Entsorgung, Sammlung und Recycling von WEEE ist unabdingbar, um Gefahren für die Umwelt und die Gesundheit zu reduzieren.

Recycling als alleinstehende Strategie ist jedoch nicht ausreichend, um den Bedürfnissen der EEE-Produktion gerecht zu werden. Selbst in einem idealisierten Szenario bei dem 100% der Rohstoffe aus WEEE zurückgewonnen werden können, kann der Bedarf für die Produktion von EEE nicht gedeckt werden. So hätten 2019 theoretisch 25 Millionen Tonnen Eisen, Aluminium und Kupfer durch Recycling wiedergewonnen werden können, verbraucht wurden jedoch 39 Millionen Tonnen (Forti et al., 2020).

2.2 Kreislaufwirtschaft

Der Übergang von einem linearen Wirtschaftsmodell hin zu einer Kreislaufwirtschaft wird als wesentlich für die Bewältigung der Herausforderungen der Abfallwirtschaft und der Ressourcennutzung angesehen (Drljača, 2016). Die beim linearen Wirtschaftsmodell vorherrschenden Grundprinzipien lassen sich als Take-Make-Dispose (Nehmen-Herstellen-Entsorgen) beschreiben. Ressourcen werden entnommen, um gewinnbringende Produkte herzustellen, die anschließend entsorgt werden, ohne weiteren Nutzen zu bringen (Sariatli, 2017). Dieser unidirektionale Fluss führt dazu, dass Ressourcen nach einmaliger Nutzung zu Abfall werden und zunehmend erschöpfen (Baporikar, 2020). Derzeit verbraucht die Menschheit 1,7-mal so viele Ressourcen, wie die Erde regenerieren kann. Würden alle Menschen der Welt so leben wie die Einwohner:innen Europas, bräuchte die Menschheit sogar 3,1 Erden (Footprint Data Foundation et al., 2023). Die Umwelt wird zudem durch Emissionen belastet, die bei der Gewinnung von Rohmaterial und Weiterverarbeitung zu Produkten entstehen, sowie durch den entstehenden Abfall. Die Folge ist eine Verkleinerung des globalen Ökosystems mit drastischen Auswirkungen wie die Erhöhung des Meeresspiegels, Ausbreitung von Wüstengebieten und der konsequenten Verringerung des bewohnbaren Landes und der Biodiversität (Korhonen et al., 2018). Weitere Bedrohungen für Menschen und Umwelt, die speziell durch den Elektronik- und Elektroschrott hervorgerufen werden, wurden zudem bereits in Kapitel 2.1.3 besprochen. Stahel versinnbildlicht das lineare Wirtschaftsmodell als einen Fluss, der natürlich Ressourcen über eine Reihe von Wertschöpfungsschritten in Rohstoffe und Produkte verwandelt, die weiterführend zum Konsumenten weitergeleitet werden und schlussendlich als Abfall entsorgt werden (Stahel, 2016).

2.2.1 Definition Kreislaufwirtschaft

Eine ressourcen- und umweltschonendere Alternative zum linearen Wirtschaftsmodell stellt die Kreislaufwirtschaft dar. Die Kreislaufwirtschaft ist ein Wirtschaftssystem, das auf der Wiederverwendbarkeit von Produkten und Produktbestandteilen, dem Recycling von Materialien und der Schonung natürlicher Ressourcen basiert und gleichzeitig die Schaffung von Mehrwert in jedem Glied des Systems anstrebt (Potting et al., 2017). Es wird versucht Materialien und Produkte in einem kontinuierlichen

Umlauf zu halten und so der Umwelt Zeit zur Regeneration zu schaffen. Würden alle wirtschaftlichen Prozesse idealisiert kreislaufwirtschaftlich ablaufen, würden Rohstoffe nie zu Abfall werden, sondern der Kreislaufwirtschaft erhalten bleiben (Ellen MacArthur Foundation, 2024). Dadurch soll das Wirtschaftswachstum vom materiellen Ressourcenverbrauch entkoppelt werden und ein nachhaltigeres und widerstandfähigeres Wirtschaftsmodell entwickelt werden (Ellen MacArthur Foundation, 2012). Stahel veranschaulicht deshalb die Kreislaufwirtschaft als einen See, der durch Wiederverwendung und Recycling von Produkten und Materialien Energie spart und gleichzeitig den Ressourcenverbrauch und Abfall reduziert (Stahel, 2016).

Obwohl das Konzept der Kreislaufwirtschaft an Popularität gewinnt, gibt es noch keine einheitliche Definition. Kirchherr et al. analysierten 114 Definitionen und fanden nur wenige explizite Verbindungen zwischen dem Konzept der Kreislaufwirtschaft und nachhaltiger Entwicklung. Vielmehr wurden Wirtschaftswachstum und Umweltqualität genannt, während soziale Gerechtigkeit und zukünftige Generationen kaum Erwähnung fanden. Darüber hinaus werden weder Geschäftsmodelle noch Verbraucher:innen häufig als Förderinnen oder Förderer der Kreislaufwirtschaft dargestellt (Kirchherr et al., 2017).

Die Definition des Europäischen Parlaments lautet:

„Die Kreislaufwirtschaft ist ein Modell der Produktion und des Verbrauchs, bei dem bestehende Materialien und Produkte so lange wie möglich geteilt, geleast, wiederverwendet, repariert, aufgearbeitet und recycelt werden. Auf diese Weise wird der Lebenszyklus der Produkte verlängert.“ (Europäisches Parlament, 2023)

Die nach Fornasari und Neri am meisten verwendete Definition stammt von der Ellen MacArthur Foundation (Fornasari & Neri, 2022):

„The circular economy is one that is restorative and regenerative by design and aims to keep products, components, and materials at their highest utility and value at all times, distinguishing between technical and biological cycles. This new economic model seeks to ultimately decouple global economic development from finite resource consumption. It enables key policy objectives such as generating economic growth, creating jobs, and reducing environmental impacts, including carbon emissions.“ (Ellen MacArthur Foundation, 2012)

Dennoch heben die Definitionen eine Reihe von Kernelementen hervor, die die Kreislaufwirtschaft charakterisieren (De Jesus et al., 2018):

- Minimierung des Inputs und effiziente Nutzung erneuerbarer Ressourcen (Material- und Energieeffizienz sowie Beschaffung und bevorzugter Einsatz erneuerbarer und ungefährlicher Materialien)
- Verlängerung des Lebenszyklus und Neukonzeption von Systemen (Reparatur, Wiederaufarbeitung- und Wiederherstellungsoptionen, neue Geschäftsmodelle wie Sharing und Reuse, Eco-Design)
- Verringerung des Produktionsvolumens und des Abfalls (Recycling, Rückgewinnungsnetzwerke, Verwertung von Nebenprodukten und Abfall)

Die Ellen MacArthur Foundation veranschaulicht den kontinuierlichen Materialfluss einer Kreislaufwirtschaft im sogenannten Schmetterlingsdiagramm (siehe Abbildung 2). Es gibt zwei Hauptkreisläufe - den technischen Kreislauf und den biologischen Kreislauf. Im technischen Kreislauf werden die Produkte und Materialien durch Prozesse wie Reuse, Reparatur, Remanufacturing, und Recycling zurückgeführt. Im biologischen Kreislauf werden Nährstoffe aus biologisch abbaubaren Materialien in die Erde zurückgeführt, um die Natur zu regenerieren (Ellen MacArthur Foundation, 2019). Das Schmetterlingsdiagramm zeigt, dass die kleineren inneren Kreisläufe von den größeren äußeren Kreisläufen umgeben sind. Innere Kreisläufe, wie die technischen Kreisläufe für Sharing, Maintaining und Reuse, sind gegenüber den äußeren Kreisläufen zu bevorzugen, da sie mehr vom eingebetteten Wert des Produktes erhalten. Betrachtet man beispielsweise ein Smartphone, so ist ein funktionierendes Smartphone wertvoller als die Summe der Einzelteile, aus denen das Smartphone besteht. Demnach ist der äußerste Kreislauf, das Recycling, als letztmöglicher Kreislauf zu betrachten, da es bedeutet, dass der eingebettete Wert des Produkts verloren geht und es auf seine Rohstoffe reduziert wird (Ellen MacArthur Foundation, 2022).

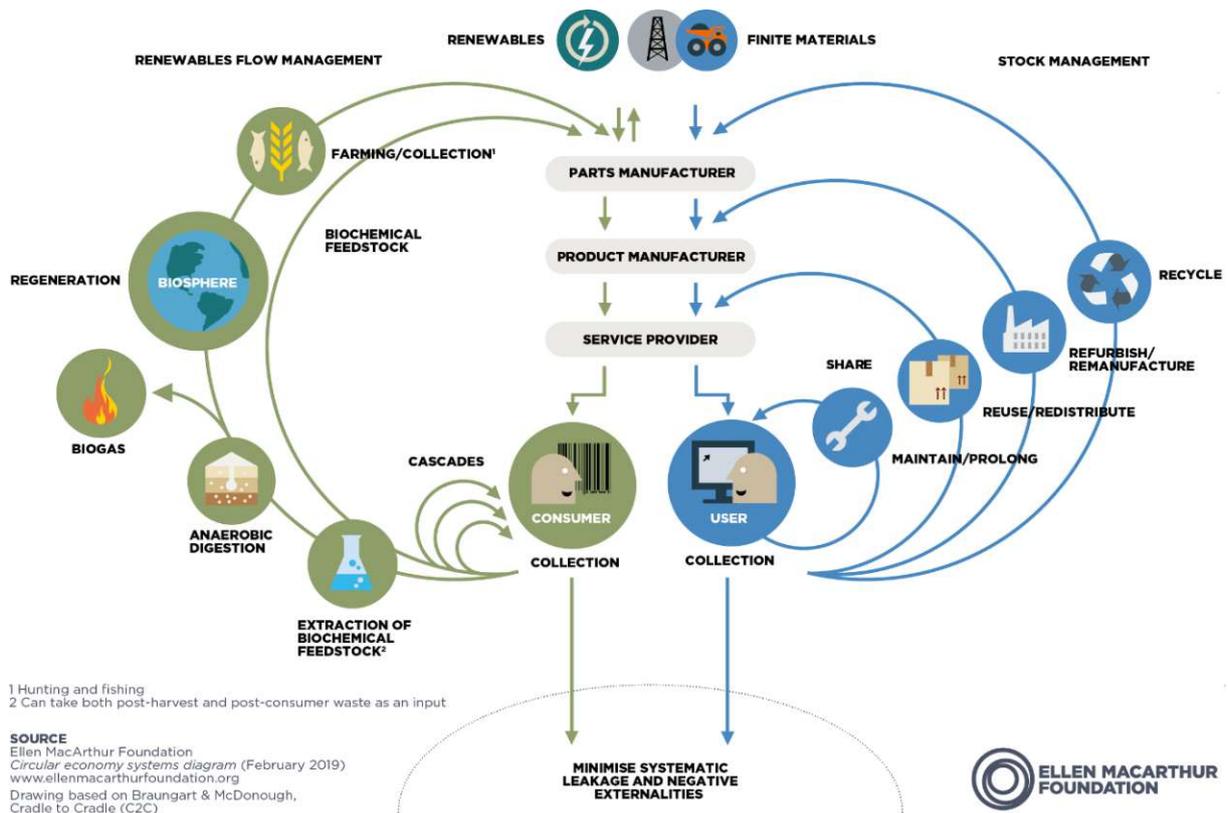


Abbildung 2: Schmetterlingsdiagramm (Ellen MacArthur Foundation, 2019)

2.2.2 R-Rahmenwerke und Abfallhierarchie

Die Kreislaufwirtschaft kann durch verschiedene sogenannte R-Rahmenwerke, zu Englisch R-Frameworks, beschrieben werden, wobei die Zahl vor dem R für die Anzahl der verfügbaren Strategien steht (Kirchherr et al., 2017). Die Grundprinzipien der verschiedenen R-Rahmenwerke sind eng mit der Abfallhierarchie und derer historischen Entwicklung verbunden (C. Zhang et al., 2022).

Die erste Abfallhierarchie stammt aus dem Jahr 1979, als der niederländische Politiker Ad Lansink dem niederländischen Parlament das Konzept der Lansink-Leiter vorstellte. Die Lansink-Leiter stellt eine Rangfolge der verfügbaren Strategien zur Abfallbewirtschaftung und Ressourcenschonung dar. Diese sind von der am meisten bevorzugten bis zur am wenigsten bevorzugten Strategie geordnet: Reduce, Reuse, Recycling, Energierückgewinnung, Verbrennung, Mülldeponierung (Recycling.com, 2019). Das Prinzip der Lansink-Leiter hat sich schrittweise zu dem entwickelt, was heute als Abfallhierarchie bekannt ist, und ist ein unverzichtbarer Bestandteil der Abfallgesetzgebung sowohl in der EU als auch weltweit. Erst 2008 wurde mit der WFD (Waste Framework Directive) 2008/98/EG die EU-Abfallhierarchie eingeführt und eine vollständige Prioritätenfolge für Abfallvermeidungs- und Abfallbewirtschaftungsmaßnahmen festgelegt (siehe Abbildung 3b) (EC, 2018).

In der Literatur wird die Kreislaufwirtschaft hauptsächlich durch das 3R-Rahmenwerk beschrieben. Dieses beinhaltet die drei Strategien Reduce, Reuse und Recycle

(Ghisellini et al., 2016). Die WFD führte mit der Implementierung der Recover-Strategie das 4R-Rahmenwerk als die EU-Abfallhierarchie ein (Kirchherr et al., 2017). Weitere R-Rahmenwerke sind das 5R-Rahmenwerk (Gharfalkar et al., 2015), 6R-Rahmenwerk (Yan & Feng, 2014), 9Ri-Rahmenwerk (Sihvonen & Ritola, 2015) und 9Rii-Rahmenwerk (Potting et al., 2017). Abbildung 3a gibt einen Überblick über die verschiedenen R-Rahmenwerke und die darin enthaltenen Strategien.

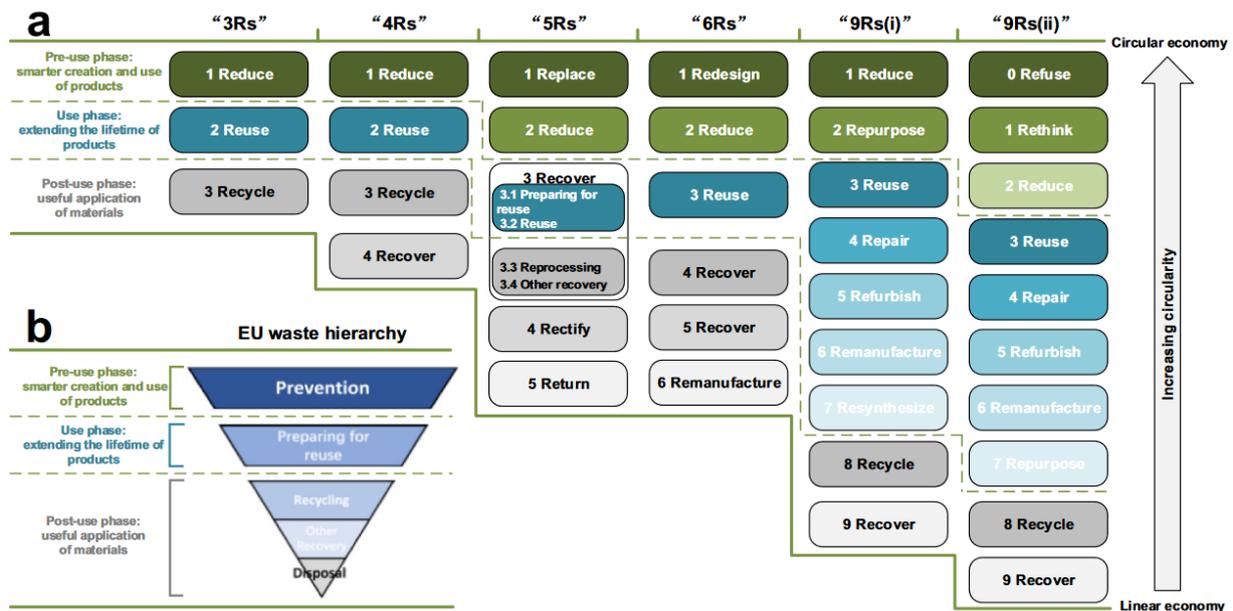


Abbildung 3: Vergleich zwischen Kreislaufwirtschaftsrahmenwerken (a) und EU-Abfallhierarchie (C. Zhang et al., 2022)

Wie in Abbildung 3 dargestellt, sind die R-Rahmenwerke der Kreislaufwirtschaft eng mit der Abfallhierarchie verbunden. Sowohl die Kreislaufwirtschaft als auch die Abfallhierarchie berücksichtigen den gesamten Lebenszyklus eines Produkts, bestehend aus Pre-Use-Phase, Use-Phase und Post-Use-Phase (C. Zhang et al., 2022). Kirchherr et al. benennen die drei Bereiche: Intelligentere Verwendung und Herstellung von Produkten, Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und Komponenten, Wiederverwendung von Materialien (Kirchherr et al., 2017). Es ist also zu sehen, dass die Kreislaufwirtschaft und die Abfallhierarchie eine gemeinsame Philosophie haben, die darauf abzielt, Abfall durch Umdenken, Neugestaltung und Wiederverwendung zu managen, um die Ressourceneffizienz eines Produkts zu verbessern und die Entstehung und die negativen Auswirkungen von Abfall zu verringern. Ein kleiner Unterschied besteht darin, dass die Abfallhierarchie Abfälle bzw. Ausscheidungen zulässt, während die Kreislaufwirtschafts-Rahmenwerke dies nicht vorsehen (C. Zhang et al., 2022).

2.2.2.1 9Rii-Rahmenwerk

Das in Österreich umzusetzende R-Rahmenwerk orientiert sich am 9Rii-Rahmenwerk von Potting et al. (Potting et al., 2017). Abbildung 4 zeigt das R-Rahmenkonzept, das aus zehn Kreislaufwirtschaftsstrategien gebildet wird, die in drei Bereiche unterteilt

sind: (1) Intelligente Nutzung und Herstellung von Produkten und Infrastruktur, (2) Verlängerte Lebensdauer von Produkten, Komponenten und Infrastruktur, (3) Wiederverwerten von Materialien. Die zehn Strategien sind nach ihrer Bedeutung für die Kreislaufwirtschaft und ihrer Zirkularität geordnet. Strategie 1 „Refuse“ entspricht dabei der höchsten Bedeutung, Strategie 10 „Recover“ der geringsten Bedeutung. Die Strategien aus Bereich 1 (Refuse, Rethink, Reduce) erfordern Veränderungen in den Produktions- und Verbrauchsmustern. Strategien aus Bereich 2 (Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose) verlängern die Nutzungsdauer auf einem möglichst hohen Wertniveau. Strategien aus Bereich 3 (Recycle, Recover) zielen darauf ab, Materialien soweit wie möglich als Sekundärrohstoffe in den Stoffkreislauf zurückzuführen (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2022).



Abbildung 4: R-Rahmenwerk für die Kreislaufwirtschaft in Österreich (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2022)

2.2.3 Potentiale der Kreislaufwirtschaft

Laut Kirchherr et al. operiert die Kreislaufwirtschaft auf mehreren Ebenen (2017):

- Mikro-Ebenen (Produkte, Unternehmen, Konsumenten)
- Meso-Ebenen (Lokale Eco-Systeme und industrielle Netzwerke)
- Makro-Ebenen (Städte, Regionen, Nationen und darüber hinaus)

Die Kreislaufwirtschaft arbeitet dabei auf allen Ebenen und setzt sich als Ziel, eine nachhaltige Entwicklung zu ermöglichen und damit gleichzeitig Umweltqualität, wirtschaftlichen Wohlstand und soziale Gerechtigkeit für heutige und künftige Generationen zu sichern (Kirchherr et al., 2017).

Aus ökologischer Sicht werden durch die effizientere Nutzung der vorhandenen Ressourcen weniger Primärrohstoffe benötigt und weniger Abfälle produziert (Ellen MacArthur Foundation, 2012). Laut Stahel können dadurch die Treibhausgasemissionen um bis zu 70% reduziert werden (2016). Dies hat einen positiven, bremsenden Effekt auf den Klimawandel, da die Emissionslast reduziert wird. Zudem trägt die Kreislaufwirtschaft durch die Regeneration von Grünflächen zum Erhalt der Biodiversität bei. Ein weiterer positiver Aspekt ist die Erleichterung eines nachhaltigeren Konsumverhaltens durch die Umgestaltung von Produkten (Ellen MacArthur Foundation, 2012).

Die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft bringt auch wirtschaftliche Vorteile mit sich. Laut Korhonen et al. schätzt die Europäische Kommission, dass der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft allein für die europäische Industrie einen zusätzlichen Gewinn von 600 Milliarden Euro pro Jahr bringt (Korhonen et al., 2018). Des Weiteren steigt die Anzahl der Arbeitsplätze um 4 Prozent (Stahel, 2016).

2.3 Remanufacturing

2.3.1 Definition

Remanufacturing ist eine der zehn Kreislaufwirtschaftsstrategien und ordnet sich in den Bereich zur Verlängerung der Lebensdauer ein (Kirchherr et al., 2017).

Die DIN Norm definiert den Prozess „Remanufacturing“ folgendermaßen (DIN SPEC 91472, 2023):

„Werterhaltender standardisierter Prozess, bei dem aus aufgearbeiteten Bestandteilen eines oder mehrerer Gebrauchtteile sowie Neukomponenten ein Remanufacturing Produkt mit mindestens der Funktionalität und Leistungsfähigkeit des ursprünglichen Produktes erzeugt wird.“

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Remanufacturing Produkt gilt als neues Produkt und wird mit einer gewerblichen Garantie versehen, siehe Entwurf zur Ökodesign Verordnung aus dem März 2022.

Anmerkung 2 zum Begriff: Mittels Upgrades und Updates besteht die Option, über den bei Inverkehrbringen des Remanufacturing Produkts geltenden technischen Standard hinaus zu gehen.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die üblichen Remanufacturing-Prozessschritte umfassen die Identifikation, Sortierung, Demontage, Reinigung, Aufarbeitung, Montage und Qualitätsprüfung der Produkte.“ (DIN SPEC 91472, 2023)

Des Weiteren definiert die DIN-Norm auch „Remanufacturing Produkte“ (DIN SPEC 91472, 2023):

„Produkt, das mittels Remanufacturing aus Gebrauchtteilen und ggf. Neuteilen hergestellt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Remanufacturing Produkt nach dieser DIN SPEC beinhaltet eine für das Neuprodukt marktübliche Gewährleistung, unter Nennung des Remanufacturers und unter Ausweisung der Produktzirkularität (siehe Abschnitt 8).

Anmerkung 2 zum Begriff: Remanufacturing Produkte werden unter Berücksichtigung aller möglicherweise bestehender Rechte Dritter an den Gebrauchtteilen vertrieben.

Anmerkung 3 zum Begriff: Remanufacturing Produkte können mit einer zusätzlichen Garantie versehen werden“ (DIN SPEC 91472, 2023)

Mangels branchenübergreifender und gleichzeitig branchenspezifischer Industriestandards kann Remanufacturing in der Praxis bisher nicht eindeutig von Begriffen wie Refurbishment, (industrielle) Aufarbeitung, (industrielle) Instandsetzung und Generalüberholung abgegrenzt werden. Die „DIN SPEC 91472:2023-06 Remanufacturing (Reman) - Qualitätsklassifizierung für zirkuläre Prozesse“ soll Abhilfe schaffen. Demnach differenziert sich Remanufacturing durch die folgenden Punkte (DIN SPEC 91472, 2023):

- *„Das Produkt eines Remanufacturing Prozesses ist ein Neuprodukt.“ (DIN SPEC 91472, 2023)*
- *„Ein Remanufacturing Produkt erreicht mindestens die Funktionalität und Leistungsfähigkeit des ursprünglichen Produktes.“ (DIN SPEC 91472, 2023)*
- *„Ein Remanufacturing Produkt wird immer mit einer marktüblichen Gewährleistung versehen.“ (DIN SPEC 91472, 2023)*

- „Ein Remanufacturing Produkt kann aus aufgearbeiteten Bestandteilen mehrerer Used Parts sowie Neukomponenten zusammengesetzt sein.“ (DIN SPEC 91472, 2023)
- „Ein Remanufacturing Produkt kann mittels Upgrades der Hardware und Updates der Software auf einen technischen Stand gebracht werden, der über den bei in Verkehr bringen des Remanufacturing Produkts geltenden technischen Standard hinaus geht.“ (DIN SPEC 91472, 2023)

2.3.2 Remanufacturing-Prozessschritte

Die Ausprägung, der Umfang und die Reihenfolge einzelner Prozessschritte eines Remanufacturing-Prozesses variieren je nach Produkt, Branche und Einsatzgebiet stark. Abbildung 5 zeigt die generische Prozesskette eines Remanufacturing-Prozesses (DIN SPEC 91472, 2023).

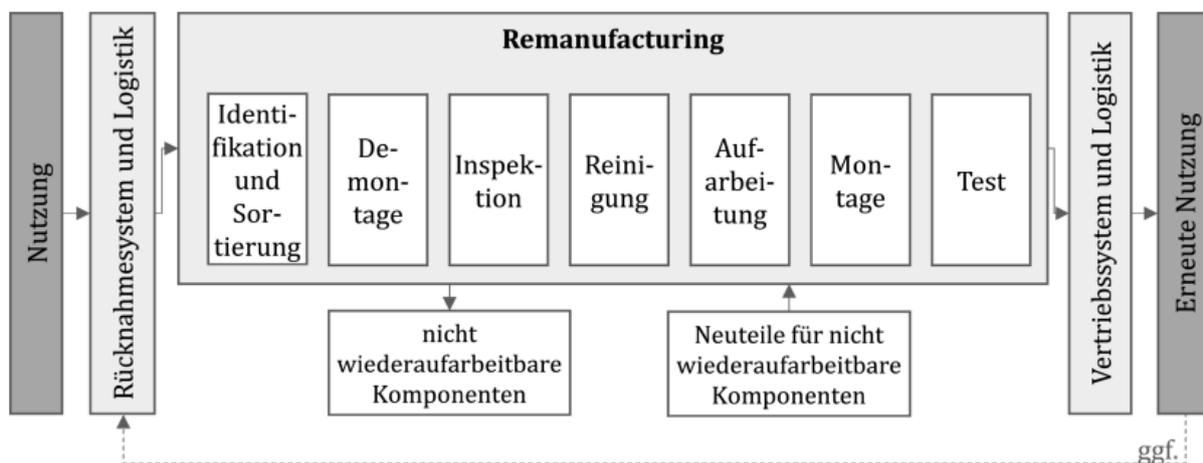


Abbildung 5: Generische Prozesskette eines Remanufacturing-Prozesses (DIN SPEC 91472, 2023)

Bei der Identifikation und Sortierung werden die zurückgeführten Gebrauchtteile erfasst und ihre Produktidentität bestimmt. Anschließend oder gleichzeitig erfolgt eine Sortierung der Gebrauchtteile hinsichtlich der Produktidentität, Wiederaufarbeitbarkeit bzw. dem Aufwand für die Wiederaufarbeitung (DIN SPEC 91472, 2023).

Die Demontage beschreibt den Prozessschritt eines Remanufacturing-Prozesses bei dem die Gebrauchtteile vollständig oder bis zu einem definierten, dem Remanufacturing genügenden Maße in ihre Komponenten zerlegt werden. Nicht wiederaufarbeitbare Komponenten können bei der Demontage sortenrein für ein Recycling gesammelt werden (DIN SPEC 91472, 2023).

Bei der Inspektion werden die demontierten Komponenten begutachtet und hinsichtlich ihrer Wiederaufarbeitbarkeit geprüft. Die Inspektion erfolgt je nach Produkthanforderung visuell und/oder unter Zuhilfenahme geeigneter Messverfahren (DIN SPEC 91472, 2023).

Bei der Reinigung werden demontierte Komponenten oder auch ganze Gebrauchtteile von (Fremd-)Stoffen befreit, welche bei einem Neuteil nicht vorhanden sind. Die zu entfernenden Stoffklassen und die Gründlichkeit der Reinigung sind branchen- und produktspezifisch durchzuführen (DIN SPEC 91472, 2023).

Die Aufarbeitung beschreibt den Prozessschritt bei dem die Komponenten und gegebenenfalls deren Software mittels geeigneter Prozesstechnologien wieder auf die gleiche Funktionalität und Leistungsfähigkeit wie das ursprüngliche Neuprodukt gebracht werden. Dabei kann auch ein höherer technischer Standard als der beim Inverkehrbringen des ursprünglichen Produkts geltende erreicht werden. Bei elektronischen Speichermedien werden alle Nutzerdaten vollständig gelöscht (DIN SPEC 91472, 2023).

Bei der Montage werden die aufgearbeiteten, gereinigten sowie sofort wiederbenutzbaren Komponenten und etwaige Neuteile zu einem Remanufacturing-Produkt zusammengesetzt. Durch den Einsatz von Neuteilen, die nicht im ursprünglichen Gebrauchprodukt verwendet wurden, kann gegebenenfalls ein Upgrade gegenüber dem technischen Standard bei Inverkehrbringen des ursprünglichen Produkts erreicht werden (DIN SPEC 91472, 2023).

Der Test dient der Sicherstellung der Qualität, der Funktionalität und Leistungsfähigkeit des Remanufacturing-Produkts, durch entsprechende Test- und Prüfverfahren oder durch die Kontrolle aller Prozessparameter, sodass nachfolgend die marktübliche Gewährleistung für Neuprodukte vergeben werden kann (DIN SPEC 91472, 2023).

2.4 Forschungslücken und Implikationen

Nach Li et al. (2020) ist die Demontage ein zentraler Prozess beim Remanufacturing von Produkten am Ende ihres Lebenszyklus. Derzeit wird die Demontage in den meisten Fällen manuell von Menschen durchgeführt. Die Automatisierung der Demontage ist wichtig, um den menschlichen Arbeitsaufwand bei der Demontage zu reduzieren und damit Remanufacturing wirtschaftlich attraktiver zu gestalten (Li et al., 2020). Parsa und Saadat (2021) bestätigen, dass die manuelle Demontage ineffizient und wirtschaftlich nicht rentabel ist. Vollautomatisierte Systeme hingegen sind aufgrund des hohen Maßes an Ungewissheit und der Komplexität des Demontageprozesses nicht robust und zuverlässig. Kollaborative Mensch-Roboter-Systeme weisen vielversprechende Eigenschaften auf, um den Demontageprozess weiterzuentwickeln. Ein kollaboratives Mensch-Roboter System vereint die Flexibilität und Fähigkeit von Menschen komplexe Aufgaben zu bewältigen, mit der Wiederholbarkeit und Genauigkeit eines Roboters. Die bedeutendsten Fortschritte und Konzepte für kollaborative Mensch-Roboter-Systeme sind derzeit in der Fertigung und insbesondere in der Montage zu verzeichnen, während es an Grundlagenforschung und Methodenvorschlägen im Bereich von Remanufacturing- und

Demontagesystemen fehlt. Angesichts dieser Herausforderungen gibt es derzeit keine standardisierte Vorgehensweise zur Entwicklung von kollaborativen Mensch-Roboter-Systemen für spezifische Produkte im Bereich des Remanufacturing und der Demontage (Parsa & Saadat, 2021). Um diese Forschungslücke zu bearbeiten, beschäftigt sich diese Diplomarbeit mit der Gestaltung eines durch Technologien unterstützen Demontagesystems zum Remanufacturing von Elektrokleingeräten. Zur Eingrenzung des Umfangs der Arbeit wird der Fokus auf die Demontage gelegt, da Li et al (2020) die Demontage als zentralen Prozess beim Remanufacturing identifizieren. Außerdem werden Teilaspekte der Identifikation und Sortierung, sowie der Inspektion mitbehandelt, da laut der DIN SPEC 91472 (2023) die Ausprägung, der Umfang und die Reihenfolge der Prozessschritte beim Remanufacturing je nach Produkt und Einsatzgebiet stark variieren. Daher wird in dieser Arbeit die Annahme getroffen, dass die Berücksichtigung dieser Teilaspekte in der Gestaltung des Demontagesystems zu einem verbesserten Prozessablauf führen. Die theoretische als auch praktische Demonstration des Remanufacturing von Elektrokleingeräten erfolgt in dieser Arbeit anhand von Fernbedienungen. Die Produktgruppe der Fernbedienungen fällt unter den UNU-Key „0401 Small Consumer Electronics“ und ist in die übergeordnete Kategorie Kleingeräte einzuordnen. Eine genauere Spezifikation von Fernbedienungen und deren Komponenten erfolgt in Kapitel 4.1.

In Hinblick auf Elektro- und Elektronikschrott zeigt der Global E-Waste Monitor 2020, dass 2019 der Verbleib von 82,6% des WEEE nicht dokumentiert wurde. Das bedeutet, dass Gold, Silber, Kupfer und andere hochwertige wiederverwendbare Materialien im Wert von 57 Milliarden US-Dollar weggeworfen oder verbrannt wurden, anstatt diese zu recyceln und als Sekundärrohstoff wiederzuverwenden. Eine ordnungsgemäße Entsorgung, Sammlung und Recycling von WEEE ist jedoch unabdingbar, um Gefahren für die Umwelt und die Gesundheit zu reduzieren (Forti et al., 2020). Auffällig am UN Global E-Waste Monitor ist, dass die Kreislaufwirtschaftsstrategien Recycling und Recovery und deren Statistiken im Hinblick auf Sammlung und Recycling von WEEE und deren Rohstoffen im Fokus sind. Die R-Strategien Reuse, Repair und Refurbishment werden zwar genannt, jedoch nicht als solche deklariert und als derzeit limitiert für die Reduktion des E-Waste bewertet. Andere Kreislaufwirtschaftsstrategien wie das Remanufacturing werden nicht erwähnt (Forti et al., 2020). Es lässt sich schlussfolgern, dass die Kreislaufwirtschaft und insbesondere das Remanufacturing noch nicht ausreichend umgesetzt werden. Dabei ist der Ellen MacArthur Foundation zufolge die Kreislaufstrategie Recycling, die als letztmöglich zu betrachtende Strategie, da beim Recycling der eingebettete Wert des Produktes verloren geht und das Produkt so auf seine Rohstoffe reduziert wird. Kleinere Kreisläufe sollen durch Strategien wie Repair, Reuse und Remanufacturing geschaffen werden, damit Produkte nicht allein auf ihre Rohstoffe reduziert werden, sondern ihr eingebetteter Wert als Produkt oder Komponenten des Produkts erhalten bleiben (Ellen MacArthur Foundation, 2022). Um diese Forschungslücke zu behandeln, beschäftigt sich diese

Diplomarbeit mit dem Remanufacturing und der Gestaltung von Demontagesystemen für das Remanufacturing von Elektrokleingeräten.

3 Aktueller Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Forschung zur Demontage von Elektrokleingeräten im Bereich des Remanufacturing erörtert. Hierzu wird zunächst die Methode der systematischen Literaturrecherche (SLR) erläutert. Daraufhin wird eine SLR zur Identifizierung bereits bestehender Ansätze und Technologien geplant und durchgeführt. Im Anschluss erfolgt eine Dokumentation der Ergebnisse der deskriptiven und thematischen Analyse, sowie eine Zusammenfassung der Erkenntnisse.

3.1 Systematische Literaturrecherche

3.1.1 Methode der systematischen Literaturrecherche

Eine systematische Literaturrecherche ist unerlässlich, um eine umfassende Übersicht zu einer bestimmten Thematik zu erhalten. Dabei werden relevante wissenschaftliche Literaturquellen identifiziert. Die systematische, transparente und reproduzierbare Vorgehensweise führt zu objektiveren und zuverlässigeren Schlussfolgerungen. Dadurch wird evidenzbasierte Entscheidungsfindung unterstützt und ein fundierter Wissenstand entwickelt (Tranfield et al., 2003).

Fink definiert die SLR wie folgt (2010):

“A research literature review is a systematic, explicit, and reproducible method for identifying, evaluation, and synthesizing the existing body of completed and recorded work produced by researchers, scholars, and practitioners.” (Fink, 2010)

Nach Tranfield et al. besteht der Aufbau einer systematischen Literaturrecherche aus drei Stufen, die in mehrere Phasen unterteilt sind (2003). Einen Überblick über die verschiedenen Stufen und Phasen zeigt Tabelle 1.

Stufe 1 - Planung der Recherche	
Phase 0	Ermittlung des Bedarfs einer Recherche
Phase 1	Ausarbeitung eines Vorschlags für eine Recherche
Phase 2	Entwicklung eines Recherche-Protokolls
Stufe 2 - Durchführung der Recherche	
Phase 3	Identifikation der Forschungsarbeiten
Phase 4	Auswahl der Studien
Phase 5	Beurteilung der Studienqualität
Phase 6	Datenextraktion und Überwachung des Fortschritts
Phase 7	Synthese der Daten
Stufe 3 - Dokumentation und Dissemination	
Phase 8	Bericht und Empfehlungen
Phase 9	Erkenntnisse in die Praxis umsetzen

Tabelle 1: Stufen einer systematischen Literaturrecherche (Tranfield et al., 2003)

Stufe 1 – Planung der Recherche:

Die Planung einer systematischen Literaturrecherche beginnt mit der Ermittlung des Bedarfs. Rahmenstudien helfen dabei, die Relevanz und den Umfang der Literatur zu bestimmen, um das Themengebiet bzw. die Fragestellung einzugrenzen oder zu konkretisieren. Anschließend kann die Recherchefrage formuliert werden. Diese ist von zentraler Bedeutung, da sich andere Aspekte des Prozesses aus ihr ergeben. Um die Objektivität einer SLR zu wahren wird ein Recherche-Protokoll entwickelt, das die durchgeführten Schritte und getroffenen Entscheidungen festhält (Tranfield et al., 2003).

In dieser Diplomarbeit wird anstelle der Entwicklung eines eigenen Recherche-Protokolls, das von Paul et al. entwickelte „Scientific Procedures and Rationales for Systematic Literature Reviews“-Protokoll, kurz SPAR-4-SLR, verwendet. Der grundsätzliche Aufbau des SPAR-4-SLR-Protokolls besteht aus drei Stufen, die aus je zwei Unterstufen bestehen (siehe Abbildung 6). Die Verwendung des SPAR-4-SLR-Protokolls ermöglicht den aktuellen Stand der Forschung und interessante Initiativen und Vorhaben des Themengebiets bereitzustellen. Die Bereitstellung erfolgt auf der Grundlage logisch und pragmatisch fundierter Argumente und wird auf Grundlage der Stufen und Unterstufen transparent dargestellt (Paul et al., 2021).



Abbildung 6: Stufen des SPAR-4-SLR-Protokolls (vgl. Paul et al., 2021)

Stufe 2 – Durchführung der Recherche:

Die zweite Stufe einer systematischen Literaturrecherche nach Tranfield beschäftigt sich mit der Durchführung der Recherche (2003). Die Suchstrategie und Entscheidungsfindung müssen so dokumentiert werden, dass eine Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Studie gewährleistet werden kann. Wichtige Schritte umfassen die Identifikation von Schlüsselwörtern und den daraus entstehenden Suchbegriff, die Auswahl einer geeigneten Datenbank, sowie das Aufstellen geeigneter Ein- und Ausschlusskriterien. Das Ziel der Literaturrecherche ist die Ermittlung relevanter wissenschaftlicher Arbeiten, die alle Einschlusskriterien und keine Ausschlusskriterien erfüllen, und auf deren Grundlage die inhaltliche Zusammenfassung erfolgt (Tranfield et al., 2003). Zur Ermittlung der relevanten Arbeiten wird das Ergebnis der Literatursuche einem Screening unterzogen. Nach Grenz-Farenholtz kann dieses in drei Schritten erfolgen (2013):

1. Titel-Screening
2. Abstract-Screening
3. Volltext-Screening

Zunächst erfolgt das Titel- und Abstract-Screening, bei dem Arbeiten aufgrund nicht gegebener Relevanz anhand des Titels bzw. Abstracts ausgeschlossen werden. Anschließend wird der Volltext der übrigen Arbeiten gelesen und beurteilt. Der Ausschluss der Literatur wird in einem Protokoll festgehalten und inkludiert den Grund des Ausschlusses (Grenz-Farenholtz, 2013; Tranfield et al., 2003).

Stufe 3 – Dokumentation und Dissemination:

Eine gute, systematische Literaturrecherche erleichtert das Verständnis der wissenschaftlichen Erkenntnisse, indem sie die wichtigsten Forschungsergebnisse der Primärquellen zusammenfasst. Die Zusammenfassung besteht aus einer deskriptiven Analyse und einer thematischen Analyse. In der deskriptiven Analyse wird auf Schlüsselstatistiken der betrachteten Fachliteratur, wie z.B. Veröffentlichungsjahr, Autor, Quelle, eingegangen. Die thematische Analyse beschäftigt sich mit dem Inhalt der betrachteten Fachliteratur und wird herangezogen, um die Recherchefrage zu beantworten (Tranfield et al., 2003).

3.1.2 Planung und Durchführung der systematischen Literaturrecherche

In diesem Kapitel wird die systematische Literaturrecherche konkret geplant und durchgeführt. Dabei orientiert sich diese Arbeit an der in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Methode.

Stufe 1 – Planung des Reviews:

Der Bedarf an einer Recherche (**Phase 0**) lässt sich aus der in Kapitel 1.1 beschriebenen Problemstellung und Problemdefinition sowie dem daraus abgeleiteten Ziel und den Forschungsfragen aus Kapitel 1.2 ableiten und konkretisiert sich durch die Formulierung von Subforschungsfrage **S1**:

„Welche Ansätze und Technologien für die Demontage von Elektro- und Elektronikschrott im Bereich des Remanufacturing von Elektrokleingeräten gibt es bereits?“

Die Ausarbeitung eines Vorschlags für eine Recherche (**Phase 1**) und die Entwicklung eines Recherche-Protokolls (**Phase 2**) wurden ebenfalls in Kapitel 3.1.1 thematisiert und werden an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt. Demzufolge ist Stufe 1 der SLR bereits abgeschlossen.

Stufe 2 – Durchführung der Recherche:

Ausgehend von Subforschungsfrage **S1** wurden die Schlüsselwörter identifiziert und mittels Booleschen Operatoren zu folgendem Suchbegriff kombiniert:

("Remanufacturing" AND ("Disassemble" OR "Disassembly" OR "Dismantle") AND ("WEEE" OR "E-waste" OR "electronic waste" OR "electrical waste" OR "EEE"))

Das Schlüsselwort „Remanufacturing“ bildet die Basis des Suchbegriffs und schränkt die Recherche auf Fachliteratur ein, die sich mit der Kreislaufstrategie Remanufacturing beschäftigt. Zudem muss die angezeigte Fachliteratur entweder den Begriff „Disassemble“, „Disassembly“ oder „Dismantle“ enthalten. Gemäß dem Online-Deutsch-Englisch-Wörterbuch dict.cc lassen sich „Disassemble“ und „Dismantle“ wie folgt übersetzen: zerlegen, auseinandernehmen, demontieren, abbauen. Die Übersetzung von „Dismantle“ enthält jedoch zusätzlich die Übersetzung „niederreißen“ (dict.cc, 2024a, 2024b). Diese Erkenntnis deckt sich mit der von Penev und De Rons vorgenommenen Definition von „Disassemble“ und „Dismantle“. Gemäß Penev und De Ron beschreibt Disassembly den Prozess der Zerlegung, bei dem der Wert des zerlegten Produkts erhalten bleibt. Disassembly ist allerdings nicht immer das exakte Gegenteil von Assembly (Zusammenbau), da manche Prozessschritte wie Schweißen und Löten nicht reversibel sind bzw. deren Umkehrung nicht rentabel wäre. In diesem Fall werden zerstörende Methoden angewandt, die es erlauben, schneller an die gewünschten Bauteile zu gelangen. Diese zerstörenden Methoden werden als Dismantling zusammengefasst (Penev & De Ron, 1996). Die hier vorgestellte SLR inkludiert sowohl „Disassemble“ als auch „Dismantle“, da beide Demontage-Strategien interessante Ansätze für das Remanufacturing von Elektro- und Elektronikschrott darstellen können. Zudem werden die Begriffe oft fälschlicherweise synonym in der Fachliteratur verwendet. Außerdem muss die Fachliteratur einen der folgenden

Begriffe enthalten: WEEE, E-Waste, electronic waste, electrical waste, EEE. Diese Begriffe werden am häufigsten im Zusammenhang mit Elektro- und Elektronikschrott verwendet (**Phase 3**).

Die Literatursuche erfolgte mittels der Datenbank ScienceDirect, welche als weltweit führende Datenbank für peer-reviewed wissenschaftliche und technische Volltext-Literatur gilt (Elsevier, 2024). Betrachtet wurde Literatur, die bis zum 17.04.2024 in der Datenbank veröffentlicht wurde (**EK1**) und dem Dokumententyp „Research Articles“ entspricht (**EK2**). Außerdem muss die Literatur über freien Zugang verfügen (**EK3**), auf Englisch verfasst worden sein (**EK4**) und in der finalen Publikationsphase vorliegen (**EK6**). Unter Berücksichtigung der Einschlusskriterien konnte die Anzahl an Fachliteratur, die der Suchbegriff lieferte, von 1180 auf 217 reduziert werden (**Phase 4**). Eine Zusammenfassung der Einschlusskriterien ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Bezeichnung	Einschlusskriterium
EK1	Zeitraum: bis 17.04.2024
EK2	Dokumenttyp: Research Articles
EK3	Zugriff: Freier Zugang
EK4	Sprache: Englisch
EK5	Publikationsphase: Final

Tabelle 2: Systematische Literaturrecherche Einschlusskriterien

Anschließend erfolgte eine Beurteilung der Studienqualität durch Abgleich der Literatur mit den Ausschlusskriterien aus Tabelle 3 (**Phase 5**). Die Beurteilung erfolgte durch ein dreistufiges Screening nach der Methode von Grenz-Farenholtz, die in Kapitel 3.1.1 näher beschrieben wird (2013).

Bezeichnung	Ausschlusskriterium
AK1	Allgemeine Strategien/Policies und ihre Auswirkungen
AK2	Produktentwicklung & -design
AK3	Linienplanung & Optimierung
AK4	Irrelevante Produktkategorie
AK5	Lebenszyklusanalyse & Umwelteinflüsse
AK6	Reverse Logistics ohne konkrete Technologieimplementation & Reverse Logistics Networks & Supply Chain
AK7	Zirkularitätsgrad zu niedrig & Irrelevante R-Strategie

Tabelle 3: Systematische Literaturrecherche Ausschlusskriterien

Durch das dreistufige Screening wurde die Anzahl an Fachliteratur auf 20 relevante Literaturquellen reduziert. Durch Backward Reference Searching, einer Vorgehensweise bei der auf zitierte Quellen in der gefundenen Fachliteratur zugegriffen wird, wurde die Anzahl relevanter Paper auf schlussendlich 21 Paper erhöht (**Phase 6 & 7**) (Padron, 2010).

Abbildung 7 veranschaulicht zusammenfassend den Prozess von Stufe 2 „Durchführung der Recherche“.

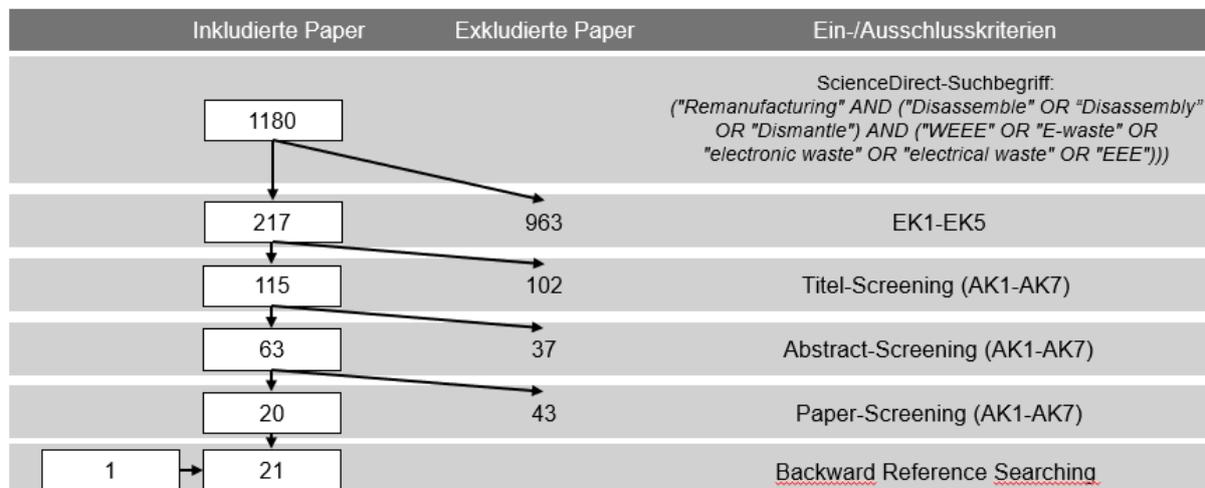


Abbildung 7: Stufe 2 - Durchführung der Literaturrecherche

Stufe 3 – Dokumentation und Dissemination

Die Berichterstattung erfolgt anhand einer deskriptiven und thematischen Analyse der 21 relevanten Literaturquellen in den folgenden Kapiteln 3.2 und 3.3.

3.2 Ergebnisse der deskriptiven Analyse

Die Ergebnisse der deskriptiven Analyse basieren auf der Planung und Durchführung der systematischen Literaturrecherche, wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben. In Tabelle 4 werden die als relevant identifizierten Literaturquellen angeführt und nummeriert. Die Nummerierung erfolgt von L1 bis L21. Die Literaturquellen wurden in Kategorien (K1–K5) sortiert und in einer Weise aneinandergereiht, die einen bestmöglichen Lesefluss für die Leserschaft gewährleistet. Abbildung 8 zeigt zudem die weltweite Verteilung der Literaturquellen.

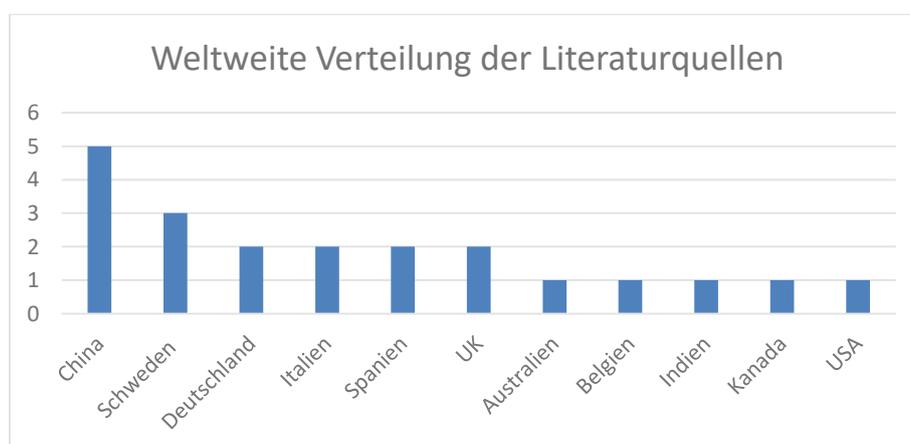


Abbildung 8: Weltweite Verteilung der Literaturquellen

Nr.	Referenz	Titel	Jahr	Citations
K1 Rückgewinnung von PCB-Komponenten				
L1	(Zeng et al. 2012)	Current Status and Future Perspective of Waste Printed Circuit Boards Recycling	2012	57
L2	(Xiang et al. 2013)	The Disassembly Process and Apparatus of Waste Printed Circuit Board Assembly for Reusing the Components	2013	6
L3	(Debnath et al. 2016)	Electronic Components (EC) Reuse and Recycling – A New Approach towards WEEE Management	2016	6
L4a	(Charles et al. 2020)	Towards Increased Recovery of Critical Raw Materials from WEEE– evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes	2020	47
L5	(Lu et al. 2014)	Reusability based on Life Cycle Sustainability Assessment: Case Study on WEEE	2014	45
K2 Intelligente Demontageanlagen				
L6	(Fornasiero et al. 2016)	Sustainable Networks for WEEE Treatment: A Case Study	2016	2
L7	(Colledani et al. 2014)	De-manufacturing Systems	2014	25
L8	(X. V. Wang & Wang 2015)	WRCloud: A Novel WEEE Remanufacturing Cloud System	2015	13
L9	(Barletta et al. 2015)	Prerequisites for a High-level Framework to Design Sustainable Plants in the E-waste Supply Chain	2015	4
L10	(Sharpe et al. 2018)	Cyber-Physical Systems in the re-use, refurbishment and recycling of used Electrical and Electronic Equipment	2018	28
L11	(Schlüter et al. 2021)	AI-enhanced Identification, Inspection and Sorting for Reverse Logistics in Remanufacturing	2021	28
L12	(Peiró et al. 2021)	Digitalization as an enabler of the Circular Economy of electronics	2021	3
K3 Cobots & Roboter				
L13	(Alvarez-de-los-Mozos & Renteria 2017)	Collaborative Robots in e-waste Management	2017	40
L14	(Cheng et al. 2017)	Manufacturing Capability Assessment for Human-Robot Collaborative Disassembly Based on Multi-Data Fusion	2017	20
L15	(H. Zhang et al. 2022)	A CNN-Based Fast Picking Method for WEEE Recycling	2022	4
L16	(Mangold et al. 2022)	Vision-Based Screw Head Detection for Automated Disassembly for Remanufacturing	2022	12
L17	(Simon et al. 2018)	A Semi-automatic System for Efficient Recovery of Rare Earth Permanent Magnets from Hard Disk Drives	2018	9
K4 Zerstörende und zerstörungsfreie Demontage				
L18	(H. Wang et al. 2017)	Selective Disassembly Planning for the End-of-life Product	2017	28
L4b	(Charles et al. 2020)	Towards Increased Recovery of Critical Raw Materials from WEEE– evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes	2020	47
L19	(Elo & Sundin 2014)	Process Concepts for Semi-automatic Dismantling of LCD Televisions	2014	13
L20	(Foo et al. 2021)	Screw detection for disassembly of electronic waste using reasoning and re-training of a deep learning model	2021	28
K5 Remanufacturing- und Demontageprozesse				
L4b	(Charles et al. 2020)	Towards Increased Recovery of Critical Raw Materials from WEEE– evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes	2020	47
L21	(Liu et al. 2022)	An efficient disassembly process generation method for large quantities of waste smartphones	2022	0

Tabelle 4: Relevante Literaturquellen

3.3 Ergebnisse der thematischen Analyse

In diesem Kapitel erfolgt eine individuelle Zusammenfassung der 21 relevanten Literaturquellen im Hinblick auf die Demontage von Elektro- und Elektronikschrott im Bereich des Remanufacturing von Elektrokleingeräten. Dabei werden nur Methoden, Ansätze und Technologien berücksichtigt, die direkt der Beantwortung von Subforschungsfrage **S1** dienen oder einen Mehrwert für die Beantwortung der Frage liefern. Anschließend erfolgt in Kapitel 3.4 eine Zusammenfassung der Erkenntnisse.

3.3.1 K1 Rückgewinnung von PCB-Komponenten:

Literaturquelle 1: (Zeng et al., 2012)

Gegenwärtig lässt sich ein Trend vom Dismantling (zerstörende Demontage) zum Disassembly (zerstörungsfreie Demontage) von PCBs beobachten. Dadurch können Produkte und Komponenten reused werden oder für das Remanufacturing auseinandergelöst werden. PCBs, die keinen eingebetteten Wert mehr aufweisen, werden zerstörend demontiert und recycelt, um ihre Rohstoffe zurückzugewinnen. Dies führt dazu, dass (1) der Reuse einzelner Komponenten Priorität hat, (2) die Demontage schadstoffhaltiger Komponenten unerlässlich ist, und (3) die anschließende zerstörende Demontage hochwertiger Bauteile zur erleichterten Materialrückgewinnung üblich ist. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die selektive Demontage unabdingbar ist (Zeng et al., 2012).

Die Demontage erfolgt zumeist manuell. Dabei werden eine Vielzahl an Werkzeugen verwendet, um gefährliche Komponenten zu entfernen und wiederverwendbare wertvolle Komponenten und Materialien zurückzugewinnen. Durch Erhitzung der Platinen auf z.B. elektrischen Heizplatten löst sich das Lötmittel und die Komponenten können entfernt werden. Nach Zeng et al. sind Studien zur Verwendung von Robotern für semi-automatisches und vollautomatisches Demontieren von PCBs am vielversprechendsten, jedoch mit einem hohen Maß an Frustration aufgrund der Komplexität verbunden (Zeng et al., 2012).

Zeng et al. beschreiben zwei vollautomatische Ansätze für die selektive Demontage von PCBs (2012):

- Die Platine wird auf einem Rahmen befestigt und in die automatische Demontagezelle eingeführt. Anschließend identifiziert ein bildverarbeitendes Vision-System wiederverwendbare Teile und schadstoffhaltige Komponenten, indem es die Form und Beschriftung der Teile mit einer Datenbank abgleicht. Die Datenbank wird durch Informationen der Hersteller:innen und des Komponenten-Reuse-Markts gespeist. Die Demontagezelle entfernt anschließend wiederverwendbare und schadstoffhaltige Komponenten von der

Platine und generiert dadurch weniger umweltschädliche PCBs und wiederverwendbare Komponenten (Zeng et al., 2012).

- Die Erzeugung von dreidimensionalen Bildern ermöglicht die Identifizierung von Informationen über die Platine und deren Zusammenbau. Ein Bildverarbeitungs-Algorithmus erkennt dabei interessante Komponenten und extrahiert Daten für die Demontage, wie beispielsweise Koordinaten und Rotationswinkel. Im Anschluss werden Lötverbindungen und Sockel getrennt. Dazu werden leichte Kraftanwendung, Hitze durch Heißluft, Vakuumgreifer und Parallelgreifer eingesetzt (Zeng et al., 2012).

Des Weiteren wird ein vollautomatisiertes System zur Demontage ohne Bilderkennung beschrieben (Zeng et al., 2012):

- Das System besteht aus zwei Hitzeeinheiten und zwei Entfernungseinheiten. Auf eine Hitzeeinheit folgt jeweils eine Entfernungseinheit. Nach Erhitzung der Leiterplatte werden die Komponenten anhand horizontaler und vertikaler Propeller abgetrennt. Diese Art der Demontage soll aufgrund der Komplexität und des teuren Equipments kaum Anwendung finden (Zeng et al., 2012).

Außerdem erwähnt das Paper die Möglichkeit semi-automatischer Demontagesysteme. Diese sind im Vergleich zu vollautomatisierten Systemen flexibler und versprechen dadurch eine erhöhte praktische Anwendung. Die Demontage erfolgt durch Erhitzung der PCBs und anschließender Anwendung externer Stoß-, Scher- und Vibrationskräfte. Ein solches System besteht aus: sequentiellen Heizeinheiten, Einheiten zum Entfernen von Teilen, Transportsystemen für die PCB, Einheiten zum Lösen von Lötverbindungen sowie einer Einheit zum Sammeln von Komponenten (Zeng et al., 2012). Eine detaillierte Erläuterung zur Einteilung der manuellen und automatisierten Prozesse ist nicht gegeben.

Literaturquelle 2: (Xiang et al., 2013)

Xiang et al. befassen sich ebenfalls mit der Demontage von PCBs, um wertvolle Komponenten für die Reparatur oder den Reuse zurückzugewinnen. Um die Qualität der demontierten Komponenten zu gewährleisten, wird ein auf den Reuse von Komponenten ausgerichteter Demontageprozess vorgeschlagen (Xiang et al., 2013).

Die PCBs bzw. die PCBAs (Printed Circuit Board Assembly) werden zunächst in 2 Kategorien klassifiziert (Xiang et al., 2013):

- PCBs die hauptsächlich aus THDs (Through-Hole-Devices), zu Deutsch Durchsteckkomponenten, bestehen und in vielen elektrischen Haushaltsgeräten vorkommen (Xiang et al., 2013)

- PCBs die hauptsächlich aus SMDs (Surface-Mounted-Devices), zu Deutsch oberflächenmontierte Komponenten, bestehen und in Computer- und Kommunikationstechnologie vorkommen (Xiang et al., 2013)

Im Anschluss erfolgt die Lösung der Lötverbindungen mittels Wärmebehandlung. Dabei ist darauf zu achten, die Komponenten nicht zu lange, aber auch nicht zu schnell zu erhitzen. Bei THD-lastigen PCBs wird ein Infrarotstrahler eingesetzt, da die unregelmäßige Verteilung der Komponenten eine Herausforderung darstellt. Bei SMD-lastigen PCBs erfolgt die Erhitzung mittels Heißluft. Im nächsten Schritt erfolgt die Trennung der Komponenten von der PCB durch mechanische Krafteinwirkung. Bei THD-Komponenten ist lediglich eine vertikale Kraftaufbringung durch eine heiße Luftklinge zulässig, da andernfalls die Pins beschädigt werden. Bei SMD-Komponenten sind sowohl vertikale als auch horizontale Kraftaufbringung wie beispielsweise durch Vibrationsplatten und Rotationsbürsten möglich. Im Anschluss werden die Komponenten mit kalter Luft gekühlt und eingesammelt. Offensichtlich optisch beschädigte Komponenten werden aussortiert. Um die Funktion der optisch guten Komponenten zu gewährleisten, werden diese anschließend durch geeignete Prüfverfahren getestet. Nicht weiter verwendbare Materialien der PCB und gefährliche Stoffe werden gesammelt und, sofern möglich, recycelt. (Xiang et al., 2013).

Literaturquelle 3: (Debnath et al., 2016)

Bei der Entsorgung eines elektronischen oder elektrischen Altgeräts bleiben die PCB und ihre elektronischen Komponenten (EC) unverändert. Ein nachhaltiger Ansatz ist die Wiederverwendung von funktionstüchtigen elektronischen Komponenten für Reparaturen und die Remanufacturing-Industrie sowie das fachgerechte Recycling von defekten und nicht wiederverwendbaren elektronischen und nicht-elektronischen Komponenten (Debnath et al., 2016).

Die Rückgewinnung der ECs beginnt mit der Sammlung von WEEE aus verschiedenen Quellen, welche anschließend in Kleingeräte und Großgeräte sortiert werden. Im Anschluss werden die Altgeräte geöffnet, um die ECs freizulegen. Einige wenige ECs sind unabhängig in den Altgeräten montiert, während die meisten sich auf den PCBs befinden. Daraufhin werden die ECs in einem zweistufigen Verfahren von der PCB gelöst: (1) Lösen der Lötverbindungen zwischen PCB und ECs durch z.B. Schleifen, chemische Reagenzien, Aufbringen von Wärme durch Heißluft, Paraffin- und Silikonöl, elektronische Heizröhren, Infrarot-Heizgerät, (2) Trennung der ECs von der PCB durch externe Krafteinwirkung. Im Anschluss erfolgt die Zuordnung der ECs zu ihrer jeweiligen EC-Gruppe:

- Analoge Elektronikkomponenten: Widerstände, Kondensatoren, Induktoren, Dioden, BJTs, FETs, analoge ICs, etc.
- Digitale Elektronikkomponenten: Logik-ICs, digitale ICs, etc.

- Mixed Signal ICs: Analog-Digital-Wandler, Digital-Analog-Wandler
- Fortgeschrittene Digitale ICs: Mikroprozessoren, Mikrocontroller, etc.
- Speicherkomponenten: RAM, ROM, Hard-Drives

Die ECs werden daraufhin mittels geeigneter Prüfverfahren für die jeweilige EC-Gruppe geprüft. Eine EC wird als wiederverwendbar erklärt, sofern sie die Testkriterien des Prüfverfahrens erfüllt. Wiederverwendbare ECs werden auf dem Markt für wiederverwendbare ECs vertrieben. Nicht wiederverwendbare ECs, demontierte PCBs sowie Gehäuse und andere Rückstände werden fachgerecht recycelt (Debnath et al., 2016).

Literaturquelle 4a: (Charles et al., 2020)

Für die thermische Demontage von Komponenten einer PCB ist die Demontage im Lötbad am vielversprechendsten. Dabei werden alle Komponenten gleichzeitig von der Leiterplatte abgelötet. Dies ermöglicht die Rückgewinnung intakter Komponenten mit höherem Wiederverwendungspotential, ohne dass gefährliche gasförmige Emissionen entstehen. Eine anschließende Sortierung der demontierten Komponenten nach ihrem Wiederverwendungspotenzial ist erforderlich. Die Demontage von Durchsteckkomponenten erfordert zudem eine zusätzliche mechanische Kraftaufwendung. Für kleinere PCBs ohne Durchsteckkomponenten und ohne mechanisch fixierte Komponenten ist die Demontage im Lötbad am besten geeignet. Die Demontage von hochwertigen Komponenten kann durch selektive manuelle Demontage erfolgen, obwohl dabei häufig Komponenten beschädigt werden (Charles et al., 2020).

Darüber hinaus ist nach Charles et al. die optische Identifikation von Komponenten und die automatische direkte Demontage ein vielversprechender Ansatz für die Weiterentwicklung von Demontagesystemen (Charles et al., 2020).

Literaturquelle 5: (Lu et al. 2014)

Nach Lu et al. hängt die Wiederverwendbarkeit von Komponenten von der physischen Beschaffenheit als internen Faktor sowie der technologischen Entwicklung als externen Faktor ab. In der Praxis bestimmt der ökonomische Nutzen-Kosten-Faktor die Demontagetiefe von Produkten und damit die Wiederverwendbarkeit von Komponenten. Aus Nachhaltigkeitsgründen sollte die Wiederverwendbarkeit von Komponenten jedoch auch anhand umwelttechnischer und sozialer Faktoren evaluiert werden. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass die Wiederverwendung von Komponenten im Gegensatz zur Wiederverwendung von Produkten einem reinen Business-to-Business-Modell entspricht. Demontage-Operatoren verkaufen die zurückgewonnenen Komponenten an die Hersteller (Lu et al., 2014).

Lu et al. demonstrieren die Reusability von Komponenten am Beispiel eines Mobiltelefons. Aufgrund der raschen technologischen Innovation werden Mobiltelefone von den Konsumenten oft ausgetauscht. Wiederverwendbare Komponenten sind integrierte Schaltkreise, Kameras, Telefon-Transmitter, Receiver und Vibrationsmotoren, die für Reparaturen oder den Re-Assemble-Prozess wiederverwendet werden können (Lu et al., 2014).

Die R-Strategie Remanufacturing findet in diesem Paper nur geringfügige Erwähnung. In Anbetracht der Tatsache, dass die Wiederverwendung von Komponenten für das Remanufacturing relevant und sinnvoll ist und Re-Assemble-Prozesse explizit erwähnt werden, ist der Inhalt des Papers auch für die SLR relevant.

3.3.2 K2 Intelligente Demontageanlagen

Literaturquelle 6: (Fornasiero et al., 2016)

Fornasiero et al. befassen sich in diesem Artikel mit der Weiterverarbeitung von PCBs aus Elektro- und Elektronikgeräten. Als Grundlage für die Weiterverarbeitung von WEEE wird die Einführung von technologisch fortschrittlichen, automatisierten Re- und Demanufacturing-Anlagen gesehen. Insbesondere die Automatisierung der folgenden Prozessschritte ist für das Re-/Demanufacturing (RDM) von Leiterplatten relevant: (1) Demontage durch hochentwickelte Roboter, (2) Inspektion und Rückgewinnung der PCB-Komponenten, (3) Zerkleinerung und Rückführung der Materialien zum Recycling. Laut Fornasiero ist der Betrieb von Re-/Demanufacturing-Anlagen im Vergleich zu klassischen Produktionsanlagen komplizierter. Klassische Produktionsanlagen haben Einfluss auf das Design, die Bereitstellung, die Leistung und die Größe der Produkte, während RDM-Anlagen eine hohe Fluktuation der Menge, des Zustands und der Vielfalt der gesammelten WEEE haben. Daher müssen die Anlagen flexibel gestaltet werden, um den nur begrenzt steuerbaren WEEE-Zufluss zu bewältigen, schadstoffhaltige Bauteile fachgerecht zu entsorgen und weitere Verwertungsprozesse zu koordinieren. Dabei korreliert der Output der RDM eng mit dem WEEE-Zufluss (Fornasiero et al., 2016).

In diesem Paper werden PCBs in verschiedene Zustandskategorien eingeteilt, wobei der Zustand der PCBs beim Eingang in die Anlage geprüft wird und die Zustandskategorie die weiteren Prozessschritte bestimmt (Fornasiero et al., 2016):

- Voll funktionsfähige, wiederverwendbare PCB: Nach Feststellung der vollen Funktionsfähigkeit werden nur noch Diagnose- und Transportprozesse innerhalb der Anlage durchgeführt (Fornasiero et al., 2016).
- Wiederverwendbare PCBs bei denen nur wenige Komponenten defekt sind: In diesem Fall werden die PCBs durch Diagnoseoperationen, Remanufacturing

und Komponentenaustausch wieder funktionsfähig gemacht (Fornasiero et al., 2016).

- Wenn eine signifikante Anzahl von Komponenten auf der PCB defekt ist, so dass sich ein Remanufacturing nicht lohnt, werden die funktionsfähigen Komponenten demontiert und für den Reuse verwendet. Die nicht wiederverwendbaren Komponenten werden dem Recycling zugeführt (Fornasiero et al., 2016).
- Nicht wiederverwendbare PCB und Komponenten: Wenn eine signifikante Anzahl von Komponenten auf der PCB defekt ist, so dass sich ein Remanufacturing nicht lohnt, werden die funktionsfähigen Komponenten demontiert und wiederverwendet. Die nicht wiederverwendbaren Komponenten werden dem Recycling zugeführt (Fornasiero et al., 2016).

Literaturquelle 7: (Colledani et al., 2014)

Unter De-Manufacturing wird die Demontage von Produkten in ihre Einzelteile mit dem Ziel der Wiederverwendung der Einzelteile für Reuse oder Remanufacturing sowie das Recycling der übrigen Teile verstanden. Eine De-Manufacturing-Strategie zielt darauf ab, die richtigen Entscheidungen bezüglich der folgenden Aspekte zu treffen: (1) Produkt-Remanufacturing und -Reuse, (2) Teilgruppen- und Komponenten-Reuse, (3) Materialrecycling und -rückgewinnung, (4) Verbrennung und (5) Deponierung. Dadurch soll der Wert der Produkte maximiert und die Umwelteinflüsse minimiert werden. Ein De-Manufacturing-System umfasst alle menschlichen, technologischen, organisatorischen und geschäftlichen Ressourcen, die ein De-Manufacturing ermöglichen. Ein De-Manufacturing-Prozess besteht typischerweise aus Demontage-, Remanufacturing-, Recycling- und Recovery-Prozessen, wobei die Demontage zuerst durchgeführt wird. Im Rahmen der Demontage werden schadstoffhaltige Komponenten entfernt, wiederverwendbare Teile mit hohem Wert gesammelt und nicht weiter verwendbare Komponenten entsprechend recycelt. Die manuelle Demontage ist aufgrund der niedrigen Produktivität und der hohen Arbeitskosten im Vergleich zum Wert der demontierten Produkte nicht rentabel. Automatische Demontagesysteme sind aufgrund der hohen Variantenvielfalt der Produkte und deren Gebrauchszustand schwer umzusetzen. Die Demontagesysteme müssen folglich in der Lage sein, den Produkttyp und dessen Zustand sowie dessen Form auf Makro- und Mikroebene zu erkennen, um sowohl größere Teile als auch kleine elektronische Komponenten verarbeiten zu können (Colledani et al., 2014). Derzeit werden lediglich wenige, sehr spezifische Produkte wie die Fuji Singleuse Kamera vollautomatisch demontiert. Als vielversprechend können Ansätze der Mensch-Roboter-Interaktion mit kollaborativen Robotern (Cobots) für die Makro-Demontage von Produkten erachtet werden, die nicht durch Industrieroboter demontiert werden können. Darüber hinaus ist eine Rekonfigurierbarkeit von De-

Manufacturing-Systemen erforderlich, um eine Anpassung an unterschiedliche Produkttypen über die Zeit zu ermöglichen (Colledani et al., 2014).

Colledani et al. beschreiben in ihrem Paper die De-Manufacturing-Pilotanlage des Institute of Industrial Technologies and Automation of the National Council for Research in Mailand. Das System besteht aus drei Hauptverarbeitungszellen, die jeweils für eine Phase der De-Manufacturing-Prozesskette verantwortlich sind und in denen der höchstmögliche Restwert eines End-of-Life-Produktes erzielt werden soll (Colledani et al., 2014):

1. Die erste Zelle ist für die roboterunterstützte Makro-Demontage der Produkte vorgesehen und ist mit zwei Cobots und einem Leichtbauroboter bestückt, die die demontierende Person unterstützen. Als Beispiel wird ein elektronisches Steuergerät (ECU) genannt, bei der die Aufgabe darin besteht, die Platine aus dem Metallgehäuse zu lösen. Durch die Implementierung der Prinzipien der Mensch-Roboter-Kooperation unterstützt der flexible Leichtbauroboter die arbeitende Person bei anspruchsvollen Demontageaufgaben, während die Cobots für flexible Transport- und Ladevorgänge zuständig sind. Am Ende der Makro-Demontage wird die Platine auf eine flexible Palette fixiert und über ein modulares Transportsystem zur zweiten Zelle transportiert (Colledani et al., 2014).
2. Die zweite Zelle dient der Ausführung von Test-, Reparatur- und Remanufacturing-Prozessen. Nach Durchführung eines Funktionstests der PCB wird diese entsprechend ihrer Funktionsfähigkeit weiterverarbeitet. Die Demontage und der Austausch einzelner Komponenten kann automatisiert erfolgen. Falls die PCB repariert werden kann, wird sie nach der Reparatur zum Re-Assembly transportiert. Ist eine Reparatur nicht möglich, können durch selektives Demontieren wertvolle Komponenten mit hohem Wert für den Reuse gesammelt oder schadstoffhaltige Komponenten entfernt werden. Ist die PCB nicht für weitere Repair-, Remanufacturing- oder Reuse-Prozesse geeignet, wird sie automatisch zur dritten Zelle weitergeleitet. (Colledani et al., 2014).
3. Die dritte Zelle befasst sich mit dem Recycling der Rohstoffe durch einen zweistufigen Zerkleinerungsprozess. In einem ersten Schritt werden die Reste geschreddert, in einem zweiten Schritt werden sie pulverisiert. Im Anschluss werden die metallischen Fragmente von den nichtmetallischen Fragmenten mittels elektrostatischer Separation getrennt. (Colledani et al., 2014). Auf weitere Prozesse des Recyclings wird hier nicht weiter eingegangen, da diese für die Verfassung dieser Diplomarbeit keine weitere Relevanz aufweisen.

Literaturquelle 8: (X. V. Wang & Wang, 2015)

Das Remanufacturing von elektrischem und elektronischem Equipment ist mit Schwierigkeiten bei der Systemintegration, dem Datenaustausch und dem Ressourcenmanagement konfrontiert, insbesondere wenn die Produkte das Ende ihres Lebenszyklus erreichen. Die Organisation von Rückgewinnungsprozessen im Sinne des Remanufacturing kann durch das Management von WEEE-Strömen auf Komponentenebene effizienter gestaltet werden. Die Entwicklung und Einführung eines cloud-basierten Systems (WRCloud), welches Recycling- und Rückgewinnungskompetenzen sowie unterstützende Mechanismen und Technologien integriert, soll Hindernisse und Bottlenecks in Bezug auf das WEEE-Remanufacturing überwinden (X. V. Wang & Wang, 2015).

Die WRCloud wird als integriertes System entwickelt, um Remanufacturing-Prozesse als Cloud-Dienst zu verwalten und steuern. Als Basis für die Demontage dient hierzu der in Abbildung 9 dargestellte verallgemeinerte Prozessfluss.

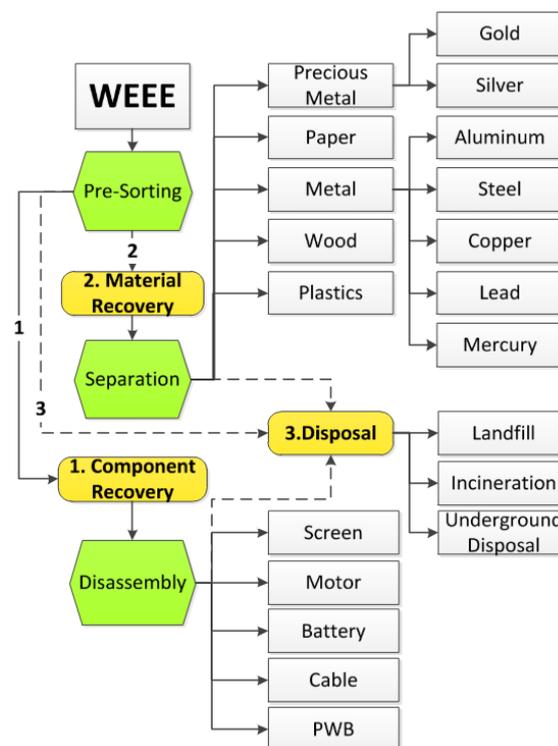


Abbildung 9: Verallgemeinerter WEEE Remanufacturing Prozessfluss (X. V. Wang & Wang, 2015)

Nach der Vorsortierung (Pre-Sorting) kann WEEE sowohl auf Materialebene als auch auf Komponentenebene zurückgewonnen werden (Optionen 1 und 2). Die Komponenten, z.B. Bildschirme, Batterien, Kabel, PCBs und Motoren, werden demontiert und unter neuen Gewährleistungsbedingungen wiederverwendet. Anschließend werden die nicht verwertbaren Stoffe entsorgt. Es ist also notwendig, die Prozesse der Komponentenrückgewinnung (Component Recovery) und des

Materialrecyclings (Material Recovery) zu koordinieren. Die Integration der genannten Prozesse auf globaler Ebene sowie die Schaffung einer kollaborativen Umgebung sind mittels Cloud-Technologie möglich. (X. V. Wang & Wang, 2015).

Die Einbeziehung aller relevanten Stakeholder (Produzent, Verkäufer, Konsument, Remanufacturer) über den gesamten Lebenszyklus eines EEE-Produktes ermöglicht die Generierung und den Abruf von Informationen über ein Produkt. Cloud-basierte Informationen umfassen (X. V. Wang & Wang, 2015):

- Produktionsdaten (Komponenten, Material, Gewicht, Maße etc.)
- Service- und Wartungsanleitungen sowie durchgeführte Services und Wartungen
- Reparaturanleitungen und durchgeführte Reparaturen
- Durchgeführte Upgrades
- Zeit- und kostenkritische Informationen zu den Remanufacturing-Prozessen

Die eindeutige Identifizierung eines Produkts mittels ID ermöglicht den Zugriff auf die Informationen, woraufhin die WRCloud den optimalen Rückgewinnungsprozess für das Produkt bzw. die Komponenten und Materialien ermittelt (X. V. Wang & Wang, 2015).

Literaturquelle 9: (Barletta et al., 2015)

Die Identifikation und Sortierung beschreiben einen Prozess, der vor der Demontage erfolgt. Die Identifikation und Sortierung von E-Waste erfolgt derzeit hauptsächlich manuell durch Menschen, aufgrund ihrer flexiblen und selbstlernenden Eigenschaften. Die Automatisierung und der Einsatz von Informations- und Kommunikationssystemen versprechen eine ökonomischere, umweltfreundlichere und sozialere Nachhaltigkeit. Die Implementierung eines strukturierten Datensystems ermöglicht zudem die Speicherung des Wissens der Arbeiter:innen sowie von Informationen über den sortierten E-Waste. Ein intelligentes Sortiersystem wird durch eine flexible künstliche Intelligenz (KI) gesteuert, welche mithilfe von Sensor- und Scanning-Technologie den E-Waste identifiziert und sortiert. Dies bringt mehrere Vorteile mit sich: (Barletta et al., 2015):

- Effizientere und schnellere Sortierung
- Erhöhte Sammelrate durch schnellere Sortierung
- Erhöhte Anzahl an wiederverwendbaren Komponenten
- Erhöhter finanzieller Ertrag durch automatische Sortierung
- Flexible künstliche Intelligenz ermöglicht die intelligente Aktualisierung der Sortierkriterien, um variable Trennungsanforderungen oder Spezifikationen gerecht zu werden

- Erhebung von Daten & Statistiken durch KI (Prozessleistung, Produkt-Lebenszyklus, WEEE-Lieferkette)
- Automatische Trennung von säure- und gefahrenstoffhaltigen Materialien
- Schutz der Arbeiter:innen vor toxischer Belastung
- Reduktion monotoner Sortierarbeit
- Verringerte Rate an Verletzungen
- Verbesserte Arbeitsbedingungen und erhöhte Mitarbeiter:innen-Zufriedenheit

Abbildung 10 veranschaulicht einen potenziellen Aufbau eines intelligenten Sortiersystems. Die Mitarbeiter:innen sind für das Be- und Entladen des E-Waste sowie für die eventuelle Behebung von Maschinenausfällen oder allgemeine Wartungsarbeiten zuständig. Nach der Identifizierung durch die Sensoren erfolgt die Trennung und Sortierung des E-Waste-Eingangstroms. Die Aktuatoren sortieren den E-Waste in drei „gute“ Fraktionen (Type 1, Type 2, Type 3) mit unterschiedlichen Spezifikationen und separieren gefahrenstoffbelastete Teile in eine weitere Fraktion (Discarded) (Barletta et al., 2015).

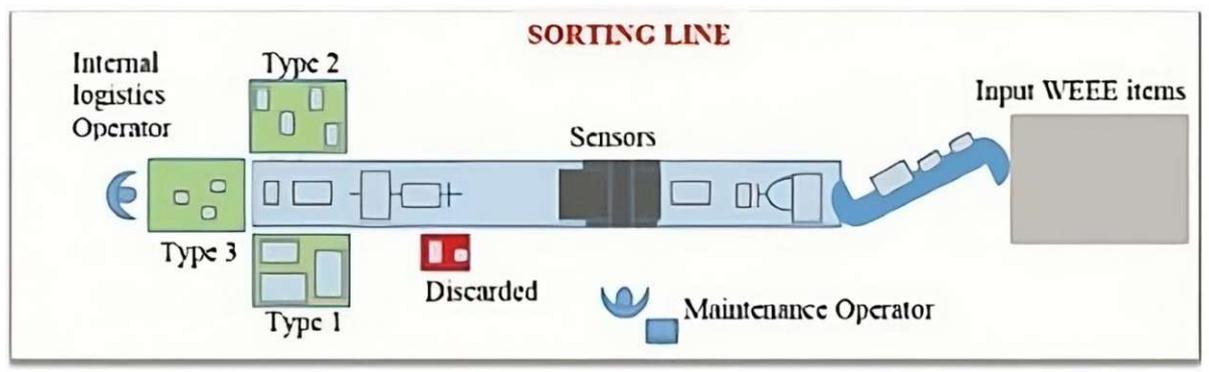


Abbildung 10: Potenzieller Aufbau eines intelligenten Sortiersystems

Literaturquelle 10: (Sharpe et al., 2018)

Dieses Paper befasst sich mit der Implementierung eines Cyber-Physischen Systems (CPS) für die Verarbeitung von Elektro- und Elektronikgeräten am Ende ihres Lebenszyklus. Gegenwärtig wird der größte Teil der Elektro- und Elektronikgeräte deponiert oder recycelt, obwohl verschiedene Produkte repariert, refurbished, reconditioned, remanufactured oder reused werden könnten. Entscheidungen über solche Wiederaufarbeitungsstrategien müssen auf genauen und aktuellen Informationen beruhen, um sicherzustellen, dass die Aktivitäten wirtschaftlich sind. Darüber hinaus ist der Materialfluss für Wiederaufarbeitungsprozesse aufgrund der hohen Produktvielfalt und des Zustands der Produkte komplex und erfordert eine einzigartige Reihe von Aktivitäten, die während der Verarbeitung festgelegt werden. Dies erfordert ein hohes Maß an Informationstransparenz und Kontrolle, um sicherzustellen, dass keine Aktivitäten wiederholt oder ausgelassen werden. CPS ermöglichen eine Verbesserung der Rückverfolgbarkeit, der Entscheidungsfindung

und der Kontrolle, indem sie eine bidirektionale Verbindung zwischen der virtuellen und der physischen Welt herstellen, die eine genaue digitale Darstellung realer Objekte ermöglicht. Sharpe et al. demonstrieren die Einführung eines solchen CPS am Beispiel einer Refurbishment-Anlage. Die Ergebnisse sind jedoch auch auf andere Wiederaufarbeitungsstrategien wie das Remanufacturing übertragbar (Sharpe et al., 2018).

Damit ein CPS-System einzelne Produkte über den gesamten Prozess eindeutig identifizieren kann, ist eine eindeutige Identifikation der Produkte notwendig. EEE haben bereits zu Beginn ihres Lebenszyklus eine eindeutige Form der Identifikation durch die Seriennummer, die jedoch am Ende des Lebenszyklus oft nicht mehr identifizierbar ist. Damit die Produkte jedoch weiterhin eindeutig identifizierbar sind, werden zu Beginn des Wiederaufarbeitungsprozesses passive Ultra-High-Frequency (UHF) Radio Frequency Identification (RFID) Tags an den Produkten angebracht. Diese UHF-RFID-Tags können am Ende des Prozessflusses entfernt und wiederverwendet werden. Die Architektur des CPS muss aus den folgenden fünf Hauptkomponenten bestehen (Sharpe et al., 2018):

- Ein Cyber Physical Gateway, über das das System mit dem Produkt kommunizieren kann (Sharpe et al., 2018)
- Eine Benutzer:innenoberfläche als Schnittstelle für Arbeiter:innen zur Bearbeitung von Produkten, zur Eingabe von Informationen über das Produkt und den Prozess sowie für den Zugriff auf Decision Support Systeme (Sharpe et al., 2018)
- Eine Berichtsoberfläche, über die Stakeholder wie Management und Vertrieb auf Berichte zum Gesamtstatus der Anlage, des Auftrags, der Charge und des einzelnen Produkts zugreifen können (Sharpe et al., 2018)
- Servicefunktionen wie Entscheidungsfindungsfunktionen anhand der Kosten und Sortierung, um Arbeiter:innen durch den Wiederaufarbeitungsprozess zu führen (Sharpe et al., 2018)
- Eine Datenbank, auf die zugegriffen werden kann, um Informationen zu speichern und abzurufen (Sharpe et al., 2018)

Literaturquelle 11: (Schlüter et al., 2021)

Remanufacturing-Prozesse sind durch ein hohes Maß an Variabilität, Unsicherheit und damit Komplexität gekennzeichnet. Unsicherheiten bestehen hinsichtlich des Zeitpunkts und der Anzahl der rückgeführten Altprodukte, der sogenannten Cores, sowie der komplexen Verarbeitung und Selektion anhand deren Zustand und individueller Merkmale. Darüber hinaus ist aufgrund der geringen Gewinnspanne pro Core ein hoher Durchsatz bei der Selektion erforderlich, um das Remanufacturing-Produkt gewinnbringend zu einem niedrigeren Preis als ein Neuprodukt verkaufen zu können (Schlüter et al., 2021).

Die Selektion der Cores erfolgt durch Identifizierung, Inspektion und Sortierung. Während dieser Prozesse wird die Entscheidung über das Remanufacturing des Cores auf technischer und wirtschaftlicher Ebene getroffen. Dies bedeutet, dass zunächst die Frage beantwortet wird, ob das Remanufacturing die geforderte Qualität erreichen kann und ob es wirtschaftlich ist. Derzeit erfolgt die Selektion der Cores aufgrund der Komplexität des Prozesses überwiegend manuell. Die Unterstützung der Arbeiter:innen bei der Selektion durch ein digitales Assistenzsystem, das mit Kameras, künstlicher Intelligenz (KI) und maschinellem Lernen betrieben wird, erweist sich als vielversprechend. Die Einführung eines solchen Systems bringt mehrere Vorteile mit sich (Schlüter et al., 2021):

- Verbesserung der Arbeits- und Gesundheitsbedingungen der Arbeiter:innen durch die Reduktion der Zeit, in der diese mit gefährlichen Substanzen des WEEE direkt in Kontakt kommen (Schlüter et al., 2021)
- Verkürzung der Prozesszeiten auf dem Ersatzteilmarkt durch Identifizierung benötigter Teile (Schlüter et al., 2021)
- Die Unterstützung der Selektion durch KI ermöglicht die Identifikation derjenigen Cores, die sich für das Remanufacturing eignen. Zudem kann auf Basis der prognostizierten Nachfrage des Remanufacturing-Produkts eine Einschätzung darüber getroffen werden, ob sich das Remanufacturing hinsichtlich der Kosten für Verarbeitung, Lagerung usw. lohnt (Schlüter et al., 2021).

Abbildung 11 zeigt den Prozess für die Selektion von Cores sowie den benötigten externen Input, sowie den System-Output. Die Selektion erfolgt anhand des Typs und des Zustands des Cores (Schlüter et al., 2021):

- Bei der derzeitigen manuellen Selektion (Grau) werden Informationen über den Core mit Hilfe einer Benutzeroberfläche manuell erfasst. Die Identifikation (Identification) des Cores ist notwendig, damit dessen Eigenschaften, Funktionen und Komponenten festgestellt werden können. Die Identifizierung erfolgt anhand der Seriennummer, Etiketten, Markennamen, Beschriftungen sowie Metadaten wie Größe, Volumen und Farbe. Eine Datenbank für Cores, die für das Remanufacturing in Frage kommen, unterstützt die Arbeiter:innen bei der Identifizierung geeigneter Produkte. Herausforderungen sind insbesondere die Variantenvielfalt der Produkte, die sich teilweise nur durch marginale Charakteristiken unterscheiden, sowie die Identifizierung von verschmutzten oder beschädigten Cores. Anschließend erfolgt bei der Inspektion die Evaluierung des Zustands des Cores anhand der Vollständigkeit, vorhandener Schäden und der Funktionalität. Die Sortierung (Sorting) verfolgt das Ziel, die wirtschaftlich und ökologisch vorteilhafteste Strategie für einen untersuchten Core zu identifizieren. Zudem wird entschieden, ob ein Core

remanufactured wird oder nicht. Diese Entscheidung basiert auf den Informationen der Inspektion und erfolgt anhand vordefinierter Kriterien-Checklisten. Da die Mitarbeiter:innen die erfüllten und unerfüllten Kriterien schnell interpretieren und eingeben müssen, sind die Kriterien so einfach wie möglich gehalten. Die Entscheidung der Mitarbeiter:innen, die in vielen Fällen subjektiv ausfällt, hat einen direkten Einfluss auf den wirtschaftlichen Ertrag des Unternehmens. Dies kann zu einer Belastung für die Mitarbeiter:innen führen (Schlüter et al., 2021).

- Die Einführung eines KI-basierten digitalen Assistenzsystems erleichtert und verbessert den Selektionsprozess (Gelb). Die Einführung von KI-Technologie, wie beispielsweise die visuelle Erkennung, reduziert manuelle Eingabefehler und macht die Identifizierung zuverlässiger, selbst wenn keine eindeutigen Identifikatoren wie Seriennummern am Core vorhanden sind. Der Inspektionsprozess wird durch die automatische visuelle Bewertung von Mängeln objektiver und standardisiert. Zusätzlich erhalten die Arbeiter:innen Unterstützung bei der Evaluierung des Zustandes des Cores, wodurch eine zweite Entscheidung quasi assistiert wird. Des Weiteren wird die Kriterien-Checkliste durch statistische Kriterien, die mehrere und wechselnde Faktoren in die Sortierentscheidung einbeziehen, vertieft und durch maschinelles Lernen (ML) stetig verbessert. Im Rahmen der Identifizierung und Inspektion werden die Arbeiter:innen nun durch Vorschläge unterstützt, die auf ML-Vorhersagen der wahrscheinlichsten Identifizierungs- und Zustandsmerkmale basieren. Mitarbeiter:innen müssen lediglich bestätigen, ob der Vorschlag korrekt ist, was zu kürzeren Bearbeitungszeiten und weniger Fehlern führt. Die endgültige Sortierentscheidung erfordert keine weitere Interaktion (Schlüter et al., 2021).

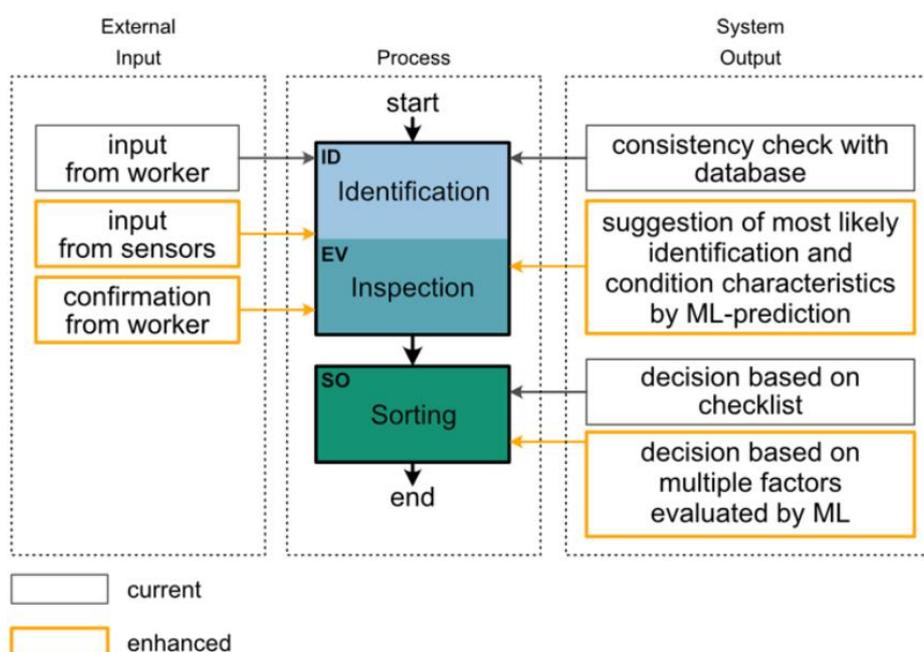


Abbildung 11: Prozessfluss für die Selektion von Cores (Schlüter et al., 2021)

Literaturquelle 12: (Peiró et al., 2021)

Die Entwicklung und Implementierung digitaler Tools ist erforderlich, um Informationen über Produkte und Komponenten zu zentralisieren. Dadurch können umfassende und nützliche Daten zur Rationalisierung von Reparatur-, Remanufacturing- und Reuse-Prozessen bereitgestellt werden (Peiró et al., 2021).

PCBs werden in hohem Maße kundenspezifisch angepasst, weshalb ihre Komplexität, abhängig von den Funktionalitäten des jeweiligen Produkts, stark variiert. Um die Kosten für die Demontage und das Sortieren der noch gut erhaltenen Komponenten zu senken und die Möglichkeit des Reuse selbst kostengünstiger PCBs zu erweitern, ist der Einsatz automatischer Selektions-Tools zur Auswahl von Komponenten sowie die digitale Informationsbereitstellung vielversprechend. Die Identifizierung von PCBs und deren Komponenten stellt eine Herausforderung dar. Eine vielversprechende Methode zur Überwindung dieser Herausforderung ist der Einsatz von Bildverarbeitungstechniken. Wenn Produktdaten, die für das Erschließen innovativer Kreislaufwirtschaftstechnologien über die Lebensdauer des Produkts verloren gehen, besteht somit weiterhin die Möglichkeit der direkten Extraktion aus dem Produkt mithilfe der Bildverarbeitungstechniken. Dadurch kann der Typ der PCB und deren Komponenten identifiziert werden. Des Weiteren existieren Texterkennungstechnologien, welche die Lesbarkeit von Seriennummern und Barcodes ermöglichen, um auf hinterlegte Produktdaten zugreifen zu können. Derzeit sind Datenbanken, die derartige Informationen enthalten, auf Komponentenebene (Kondensatoren, Widerstände, ICs etc.) beschränkt. Es besteht jedoch noch Bedarf an der Entwicklung von Datenbanken, die Informationen über PCBs, deren Komponenten, Funktionen und Zusammenstellung enthalten (Peiró et al., 2021).

Peiró et al. präsentieren eine in POLIMI verwendete Methode zur Klassifizierung von PCB-Daten. Dazu werden folgende Parameter in eine Datenbank eingespeist: Gesamtgewicht, Verhältnis von Gewicht zu Gesamtfläche, Form, maximale Seitenabmessung, Verhältnis von maximaler zu minimaler Abmessung. Anschließend werden die PCBs mittels morphometrischer Deskriptoren korrekt identifiziert (Peiró et al., 2021).

Des Weiteren wird die digitale Datenbank DoSE erwähnt, in der Informationen von über 250 Komponenten abgespeichert sind. Die Datenbank ermöglicht zudem die Speicherung von PCBs und den Abruf von Daten über bereits eingespeicherte PCBs, beispielsweise zu den enthaltenen Komponenten, der Herstellerbezeichnung, dem Herstellungsjahr und den Abmessungen (Peiró & Gabarrell i Durany, 2019; Peiró et al., 2021).

3.3.3 K3 Cobots und Roboter

Literaturquelle 13: (Alvarez-de-los-Mozos & Renteria, 2017)

Die Identifizierung und Demontage von E-Waste gestaltet sich problematisch. Die manuelle Demontage ist zu teuer, während die Implementierung einer vollautomatischen Demontage schwierig umzusetzen ist. Eine automatische Demontageanlage benötigt ein leistungsfähiges Identifikationssystem, das die verschiedenen Komponenten und Materialien erkennt und eine Art von Decision Support System, um die automatische Demontage zu planen und durchzuführen. Aufgrund der großen Produktvielfalt von WEEE und der Komplexität der Umsetzung existieren nur wenige automatische Demontagesysteme. Diese können wie z.B. Apples Liam-Roboter auch nur wenige Produkte demontieren (Alvarez-de-los-Mozos & Renteria, 2017).

Ein möglicher Lösungsansatz ist die Gestaltung von kollaborativen Mensch-Roboter-Arbeitsplätzen, an denen Mensch und Roboter gemeinsam an der Demontage von E-Waste arbeiten. Im Bereich der Demontage ist die herkömmliche Roboterprogrammierung zu unflexibel und zeitaufwändig. Die kollaborierenden Roboter (Cobots) müssen die zu erledigende Aufgabe schnell und unkompliziert von der arbeitenden Person erlernen. Eine intuitive Steuerung ist über Gesten möglich. Arbeiter:innen markieren per Fingerzeig spezifische Referenzpunkte der Komponenten, die der Cobot erkennt, um anschließend Kabel zu trennen, Schrauben zu lösen, Teile abzutrennen etc. Mit Hilfe von Handzeichen und Spracherkennung können zusätzlich Kommandos wie „Stopp“, „Weiter“, „Fahre zu diesem Punkt“ gegeben werden. Für Fälle, bei denen das Referenzobjekt zu klein ist oder im Inneren des WEEE liegt, können Arbeiter:innen den Cobot-Arm per Hand führen. Zur Umsetzung eines solchen Arbeitsplatzes ist ein visuelles Tracking der Arbeiter:innen und deren Gesten nötig. Darüber hinaus ist die Implementierung von Sicherheitstechnologien notwendig, um die Sicherheit der Arbeiter:innen zu gewährleisten. Diese umfassen neben dem visuellen Tracking auch die Kollisionserkennung. Als Umsetzungsbeispiel wird neben der Demontage eines Fernsehgerätes auch die Entnahme von PCBs und deren Komponenten mit Hilfe eines 6-Achs-Roboters an einem Mensch-Roboter-Arbeitsplatz genannt (Alvarez-de-los-Mozos & Renteria, 2017).

Darüber hinaus geben die Autoren Informationen zur Behandlung von Kunststoffabfällen, die bei der Demontage von WEEE zurückbleiben. Die Hauptaufgabe besteht in der Identifizierung und Sortierung der Kunststoffe nach Art, Zusatzstoffen und Verunreinigungen. Automatisierungsmöglichkeiten bieten hier Machine Vision Systeme und vertikale Vibrationssysteme. Im Anschluss an die Sortierung erfolgt eines der drei folgenden Recyclingverfahren (Alvarez-de-los-Mozos & Renteria, 2017):

- Chemisches Recycling von Kunststoffen zur Herstellung von Rohstoffen für petrochemische Prozesse (Alvarez-de-los-Mozos & Renteria, 2017)
- Mechanisches Recycling durch Zerkleinerung und Sortierung zur Herstellung neuer Kunststoffprodukte (Alvarez-de-los-Mozos & Renteria, 2017)
- Thermisches Recycling, bei dem Kunststoff als alternativer Brennstoff verwendet wird (Alvarez-de-los-Mozos & Renteria, 2017)

Literaturquelle 14: (Cheng et al., 2017)

Dieses Paper befasst sich mit der kollaborativen Mensch-Roboter-Demontage von elektronischen und elektrischen Geräten. Die Einführung kollaborativer Demontage-Arbeitsplätze verspricht die Kombination der Flexibilität eines Menschen mit der Wiederholungs- und Positionstreue sowie Unermüdlichkeit eines Roboters. Dadurch erhöht sich die Demontage-Effizienz, Flexibilität sowie die Sicherheit der Arbeiter:innen. Zur Umsetzung eines solchen Arbeitsplatzes entwickeln Cheng et al. ein Indikatorensystem zur Bewertung der Produktionskapazität und Bewertungsmodell für kollaborative Mensch-Roboter-Demontagesysteme basierend auf nachhaltiger Entwicklung. Die Bewertungsindikatoren für den Menschen und die IR werden unter drei Aspekten zusammengefasst: wirtschaftlicher Nutzen, sozialer Nutzen und ökologischer Nutzen (siehe Tabelle 5).

Nutzen	Indikatoren	Sub-Indikatoren Roboter	Sub-Indikatoren Mensch
Ökonomischer Nutzen	Demontagequalität	Demontagetiefe	
		Zustand der Teile	
		Teilebedarf	
	Demontagekosten	Maschinenabschreibung	Löhne
		Wartungskosten	
Demontagedauer	Demontage-Zeit		
	Nebenzeit	Ruhezeiten	
Demontage-Flexibilität		Demontage-Flexibilität	Erfahrung
			Kompetenzniveau
Sozialer Nutzen	Sozialer Nutzen	Sicherheit	
		Innovation	Ermüdungsgrad
Ökologischer Nutzen	Energieverbrauch	Energieverbrauch Bremsen	
		Energieverbrauch BUS	
		Energieverbrauch Motor	
	Umweltschutz	Lärm	
Abfall			

Tabelle 5: Bewertungsindikatoren für Roboter und Mensch (Cheng et al., 2017)

Durch den Einsatz verschiedener Messtechnologien, wie Kameras, Schwermetalldetektoren, Lautstärkemessern sowie unter Zuhilfenahme verschiedener Roboter- und Managementdaten lassen sich die Indikatoren für Mensch, Roboter und Mensch-Roboter quantifizieren. Anschließend wird durch einen Algorithmus

berechnet, inwiefern sich die Produktionskapazität bei bestimmter Tätigkeit verändert bzw. bei welchen Tätigkeiten eine kollaborative Arbeitsteilung sinnvoll ist (Cheng et al., 2017).

Literaturquelle 15: (H. Zhang et al., 2022)

Die Verarbeitung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE) ist aufgrund der großen Vielfalt an Designs und Zusammensetzungen der Produkte eine anspruchsvolle Aufgabe. Daher ist das gezielte Demanufacturing und eine geeignete Produktsortierung von entscheidender Bedeutung, die jedoch häufig noch manuell und damit arbeitsintensiv und kostspielig ist. Obgleich erste Schritte zur Automatisierung dieser Sortierprozesse erkennbar sind, betreffen viele davon die Materialsortierung, jedoch nur sehr wenige die Sortierung auf Produktebene. In dieser Hinsicht stellen die automatisierte Klassifizierung sowie das Greifen und Platzieren von WEEE wichtige Aufgaben dar (H. Zhang et al., 2022).

Die vorgestellte Forschungsarbeit präsentiert eine Methode zur Planung des Greifens im geschlossenen Regelkreis für die zufällige Entnahme von WEEE-Produkten. Die vorgestellte Greifmethode kombiniert eine auf einem Convolutional Neural Network basierende Qualitätsvorhersage und eine Closed-Loop-Steuerung, genannt CNNB-CL, um den optimalen Greifbereich für unbekannte Objekte in einem dichten Durcheinander zu finden. Im Rahmen des CNN-Trainings wurde ein umfangreicher Datensatz generiert und die entsprechenden Griffqualitäten durch Griffsimulationen mit 3D-Modellen bewertet. Das vorgeschlagene CNN schätzt quantitativ die Griffqualität jeder Griffmöglichkeit ein, während das CNNB-CL die Rückmeldung eines Kraft-Drehmoment-Sensors nutzt, um den optimierten Griff zu erkennen und die Greifstrategie anzupassen. Abbildung 12 zeigt den Aufbau des Systems, das aus einem 4-DOF-FANUC-Delta-Roboter, einem 6-DOF-Kraft-Drehmoment-Sensor, einem Vakuumgreifer mit einem Radius von 20 mm, einer Tiefenkamera und einem PC besteht. Der Vakuumgreifer wird über einen Robotercontroller gesteuert, der mit dem PC über Socket Messaging interagiert. Die Tiefenkamera und der 6-DOF Kraft-Momenten-Sensor kommunizieren mit dem PC über das Robot Operating System. Der Algorithmus ist in Python programmiert (H. Zhang et al., 2022).

Die CNNB-CL-Methode identifiziert die optimale Griffmöglichkeit aus 2.000 Griffmöglichkeiten innerhalb von 0,3 Sekunden bei einer durchschnittlichen Erfolgsrate von 92 %. Des Weiteren wurde eine durchschnittliche Kommissioniergeschwindigkeit von 1.400 mm/s für die zufällige Kommissionierung von kleinen WEEE-Produkten (unter 300 g) ermittelt. Die schnelle Kommissionierfähigkeit der vorgestellten Methode demonstriert ihr Anwendungspotenzial für Sortierung von Elektro- und Elektronikaltgeräten. Abbildung 13 zeigt den Prozess eines Greifvorgangs. Das System evaluiert den Bereich eines zu

greifenden Produkts (Evaluated region) und ermittelt die optimale Greifmöglichkeit (Grasp pose) (H. Zhang et al., 2022).

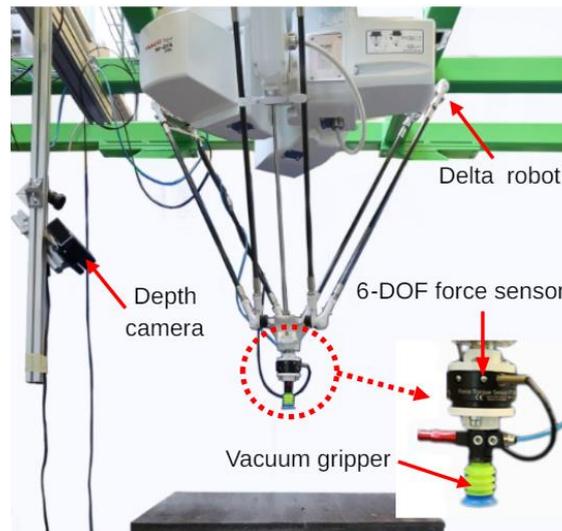


Abbildung 12: Aufbau des Greifsystems (H. Zhang et al., 2022)

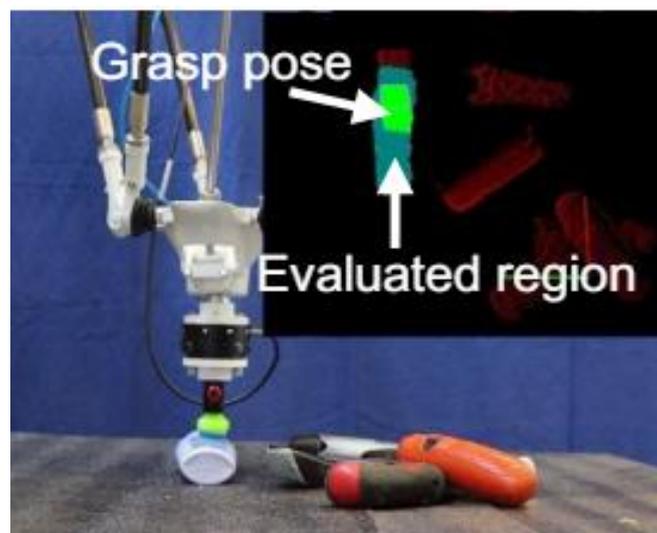


Abbildung 13: Greifvorgang

Literaturquelle 16: (Mangold et al., 2022)

Für einen wirtschaftlichen Betrieb von Remanufacturing-Anlagen ist eine Automatisierung der derzeit manuellen Arbeit zwingend erforderlich. Die Automatisierung spielt somit eine entscheidende Rolle, um hohe Wiederverwendungsraten und damit eine signifikante Abfallreduzierung zu erreichen. Die Automatisierung der Demontage stellt insbesondere einen entscheidenden Faktor dar, da für das Remanufacturing zurückgeführte Produkte unterschiedliche Spezifikationen aufweisen, die sich im Laufe des Lebenszyklus verändern. Dem Stand der Technik entsprechende Lösungen für die automatische Demontage weisen jedoch eine mangelnde Flexibilität zur Anpassung an unterschiedliche Produkte und Produktbedingungen auf (Mangold et al., 2022).

Schraubverbindungen stellen weit verbreitete Verbindungselemente dar, die eine zerstörungsfreie Demontage ermöglichen. In dieser Publikation wird ein hochflexibler Ansatz für die Lokalisierung und Klassifizierung von Schrauben vorgestellt. Das vorgestellte System verwendet einen Universal Robots UR5 e-series Roboter, der mit einem Schraubendreher-Modul und einem integriertem Eye-in-Hand-Vision-System ausgestattet ist, sowie mit einem Computer verbunden ist (siehe Abbildung 14) (Mangold et al., 2022).

Das in der Programmiersprache Python entwickelte System ist in der Lage, sechs verschiedene Typen von Schraubenköpfen unterschiedlicher Größe zu lokalisieren und zu klassifizieren. Dabei wird maschinelles Lernen eingesetzt, um den Endeffektor des Roboters zu adaptieren. Ein Datensatz, der die verschiedenen Schraubenköpfe umfasst, wurde erstellt, um neuronale Netze zur Erkennung von Schrauben unterschiedlicher Art und Beschaffenheit zu trainieren (Mangold et al., 2022).

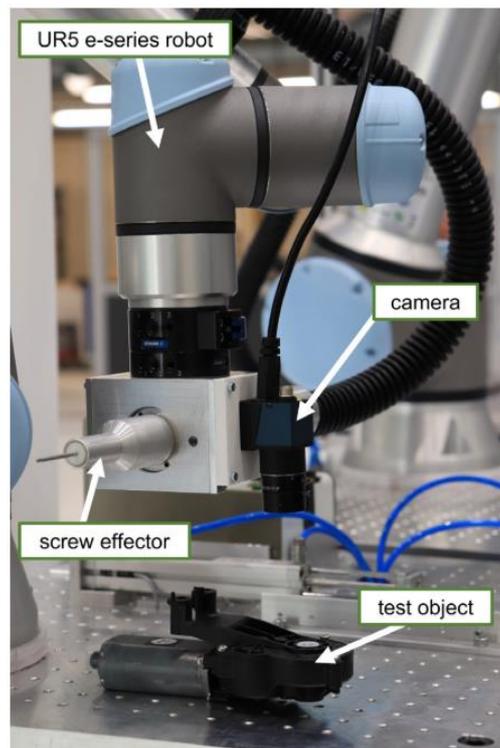


Abbildung 14: Automatisches Demontagesystem für Schrauben (Mangold et al., 2022)

Literaturquelle 17: (Simon et al., 2018)

Bei der Demontage ausgedienter Festplattenlaufwerke (HDDs) werden üblicherweise nur die PCBs gesammelt. Dabei enthalten HDDs auch wertvolle Permanentmagnete aus seltenen Erden (REPMs) die deponiert oder mit herkömmlichen Metallen beim Recycling verschmolzen werden. Grund dafür ist, dass die Demontage von REPMs zeitaufwendig und teuer ist, da die Abdeckung der REPMs mit dem Hauptrahmen

verklebt und durch mehrere kleine Schrauben gesichert ist, die bei der Demontage leicht beschädigt werden können (Simon et al., 2018).

Abbildung 15 zeigt den Prototyp eines semi-automatischen HDD-Demontagesystems. Mit einer Kamera (Camera) wird ein Bild des Festplattendeckels aufgenommen und mittels Bildverarbeitung die Position und Größe der Schrauben bestimmt. Anschließend wird die Festplatte über ein Förderband (Conveyor) zur Bohrstation transportiert. Anstatt die Schrauben zu lösen, werden die Schraubverbindungen aufgebohrt. Das Aufbohren erfolgt schneller als das Herausdrehen der Schrauben. Außerdem wird ein Runddrehen der Schraubköpfe vermieden. Die Demontage am semi-automatischen Demontagesystem ist somit effektiver und effizienter. (Simon et al., 2018).

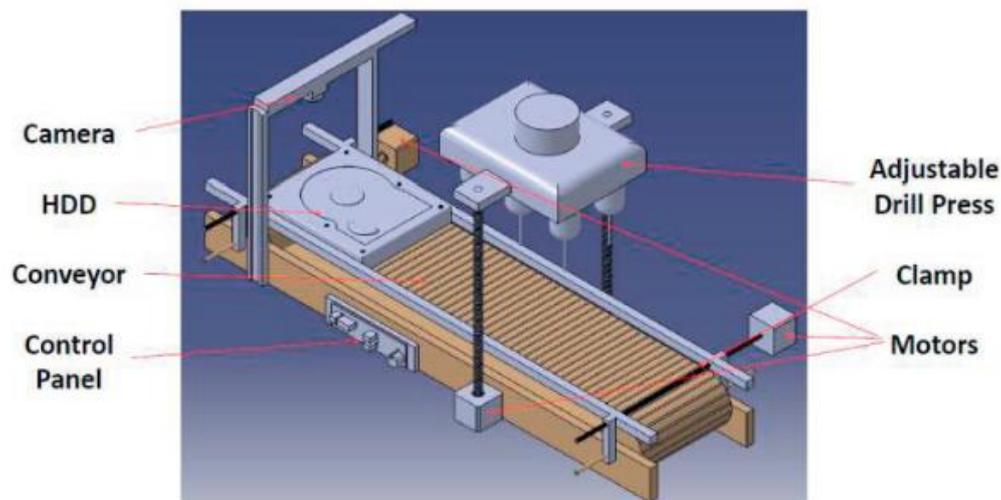


Abbildung 15: Prototyp eines semi-automatischen HDD-Demontagesystems (Simon et al., 2018)

Simon et al. identifizieren darüber hinaus den Einsatz von kognitiven Robotern und maschinellem Lernen als vielversprechende Technologien für die Weiterentwicklung von De- und Remanufacturing-Systemen für die WEEE-Demontage (2018).

3.3.4 K4 Zerstörende und zerstörungsfreie Demontage

Literaturquelle 18: (H. Wang et al., 2017)

Das Ziel der Demontage eines Produkts am Ende seines Lebenszyklus ist die Rückgewinnung wiederverwendbarer Komponenten und/oder wertvoller Materialien. Eine effiziente Demontage ist erforderlich, um die Demontagezeit und die Demontagekosten zu reduzieren. Bei der vollständigen Demontage werden die Produkte entgegen der Montagereihenfolge zerlegt, wobei das gesamte Produkt in seine Einzelteile zerlegt wird. Im Gegensatz dazu steht die unvollständige Demontage, bei der nur einige Komponenten entfernt werden. Eine Form der unvollständigen

Demontage ist die selektive Demontage, die als die Demontage bestimmter ausgewählter Komponenten aus einem Produkt definiert ist. Weiterhin kann die Demontage in zerstörende und zerstörungsfreie Demontage unterteilt werden. Die zerstörungsfreie Demontage findet ihre Anwendung bei der Wartung und dem Remanufacturing ganzer Produkte. Bei der selektiven Demontage werden nicht wiederverwendbare Bauteile teilweise zerstört, um schneller an wertvolle Bauteile und Materialien zu gelangen. Insbesondere bei Verbindungen wie Nieten und Schweißnähten müssen diese bei der zerstörungsfreien Demontage umgangen werden, während sie bei der zerstörenden Demontage entfernt werden können. Beispiele für zerstörende Demontageverfahren sind das Schneiden und Brechen von Produkten oder das Zerstören von Schrauben und Bolzen durch die Aufbringung elastischer Wellen (H. Wang et al., 2017).

Literaturquelle 4b: (Charles et al., 2020)

Die kosteneffiziente Demontage ist eine Voraussetzung für die Wiederverwendung von Produkten, PCBs und Komponenten für interne Wiederverwendungsprozesse sowie für den Verkauf zur Reparatur, Aufrüstung, Refurbishment oder Remanufacturing. Dabei darf die Funktionalität der demontierten Teile nicht eingeschränkt werden, während die Preise im Vergleich zu Neuteilen wettbewerbsfähig bleiben müssen. Charles et al. untersuchen zu diesem Zweck Methoden zur Demontage von PCBs aus ihren Gehäusen sowie zur Demontage von Komponenten aus PCBs. Folgende Methoden sind für eine zeitsparende Demontage von Gehäusen geeignet (Charles et al., 2020):

- Beim Cryocracking werden die Elektroaltgeräte für 20 Sekunden in flüssigen Stickstoff getaucht und auf -172 Grad Celsius abgekühlt. Anschließend werden die Gehäuse z.B. mit einem Hammer aufgeschlagen. Dies ermöglicht eine schnelle Isolierung der PCBs und anderer interner Komponenten. Der Einsatz von Cryocracking empfiehlt sich allerdings nur bei Kunststoffgehäusen, da Metallgehäuse nicht ausreichend zerbrechen. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob die Verwendung von kostengünstigerem CO₂-Gas für die Zerstörung der meisten herkömmlichen WEEE-Kunststoffe ausreicht. Abbildung 16 zeigt das Cryocracking eines Mobiltelefons (Charles et al., 2020).
- Der Einsatz von Leiterplattenschneidern eignet sich für das Aufschneiden von Gehäusen (Charles et al., 2020).

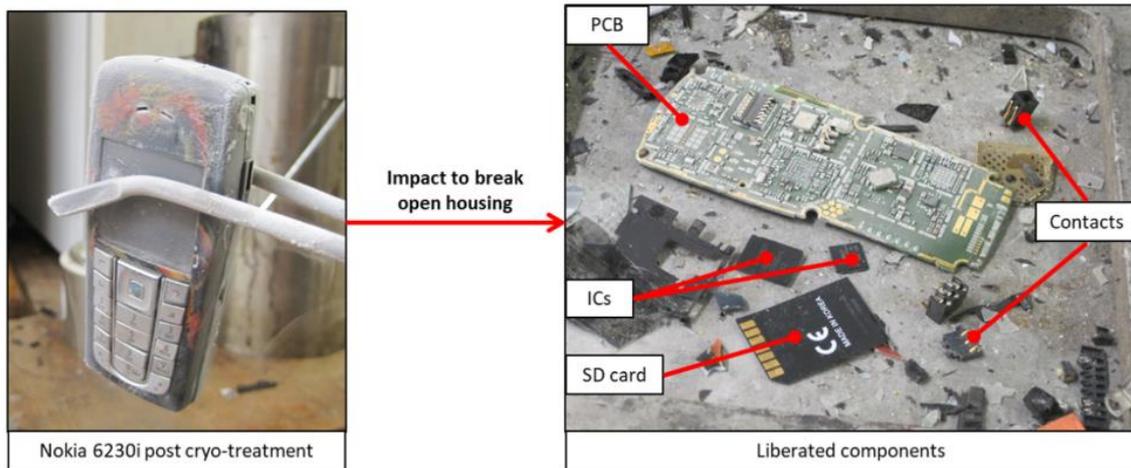


Abbildung 16: Cryocracking eines Mobiltelefons

Literaturquelle 19: (Elo & Sundin, 2014)

Das Paper befasst sich mit der Demontage von LCD-TV's. Aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Schraubendimensionen und Schraubenköpfe sowie der stark variierenden Positionierung von Schrauben und Schnappverschlüssen ist die zerstörungsfreie Demontage der LCD-TV's ineffizient. Um eine schnellere Zugänglichkeit zu wertvollen und schadhafte Komponenten im Inneren zu ermöglichen, wird die Verwendung einer Kreis- und Bandsäge erforscht, mit der das Gehäuse der LCD-TV's zerstörend demontiert wird. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass durch geeignet gesetzte Schnitte am Rand die wesentlichen Komponenten unbeschädigt bleiben (Elo & Sundin, 2014).

In diesem Paper wird die Demontage im Sinne des Remanufacturing bzw. die Demontage von Elektrokleingeräten nicht konkret thematisiert. Da der Ansatz der zerstörenden Demontage von Gehäusen jedoch für die effizientere Demontage von Elektrokleingeräten von Interesse sein könnte, wurde das Paper für die Analyse dennoch berücksichtigt.

Literaturquelle 20: (Foo et al., 2021)

Die automatische Demontage stellt einen wichtigen Faktor für die Optimierung der Verarbeitung von Elektroaltgeräten dar. Die zerstörungsfreie Demontage ist ideal, um den inhärenten Wert der Komponenten zu erhalten. Damit eine zerstörungsfreie Demontage möglich ist, müssen Verbindungselemente wie Schrauben erkannt und entfernt werden (Foo et al., 2021).

Das von Foo et al. entwickelte automatische Schraubenerkennungssystem ermöglicht die Identifikation diverser Schrauben auf der Rückseite von LCD-TV's. Das System besteht aus einer Kamera, die über dem Demontagearbeitsplatz montiert und per USB-Kabel mit einem Computer verbunden ist. Auf dem Computer läuft das in der Programmiersprache Python geschriebene Schraubenerkennungsprogramm. Die

vorgestellte Methode zur Schraubenerkennung umfasst drei Schritte, die vom Programm automatisch ausgeführt werden: Vorverarbeitung, Schraubenerkennung über ein Deep-Learning-Modell und visuelle Schlussfolgerungen. Ein zusätzlicher Schritt wird dem Benutzer vorgeschlagen, um das Deep-Learning-Modell an die Umgebung (Beleuchtung, Kamerawinkel, Kameraauflösung usw.) des Demontagearbeitsplatzes anzupassen. Sollte die Erkennung von Schrauben durch das Programm unzureichend sein, besteht die Möglichkeit, fehlerhafte Analysen zu sammeln und diese zum erneuten Training des Deep-Learning-Modells zu verwenden (Foo et al., 2021).

In der vorliegenden Publikation wird die automatische Schraubenerkennung bei der Demontage von LCD-TVs thematisiert. LCD-TVs sind keine Elektrokleingeräte. Da die automatische Schraubenerkennung aber auch für die Demontage diverser Elektrokleingeräte von Interesse sein könnte, wurde das Paper dennoch berücksichtigt.

3.3.5 K5 Remanufacturing- und Demontageprozesse

Literaturquelle 4c: (Charles et al., 2020)

Die durchschnittliche Lebensdauer einer PCB beträgt 20.000 Stunden, was nur 5 % der erwarteten Lebensdauer der Komponenten entspricht. Dementsprechend sind viele Komponenten von WEEE-PCBs funktionsfähig und können potenziell mehrfach wiederverwendet werden. Um eine nachhaltige Wiederverwendung von Produkten, PCBs und Komponenten zu ermöglichen, muss WEEE besser gesammelt und in die Prozesskette von Kreislaufstrategien integriert werden (Charles et al., 2020).

Abbildung 17 zeigt den Entscheidungsbaum einer zugelassenen britischen WEEE-Behandlungsanlage. Ein mehrstufiger Prozess zielt darauf ab, den inhärenten Wert des WEEE-Produkts, seiner Komponenten und Materialien zu erhalten, um sie durch geeignete R-Strategien wiederzuverwenden bzw. zu verkaufen. Das Pre-Processing, d. h. die Entscheidungen entlang des Entscheidungsbaums, sind von entscheidender Bedeutung, da sie bestimmen, wie viel des inhärenten Werts erhalten werden kann. (Charles et al., 2020).

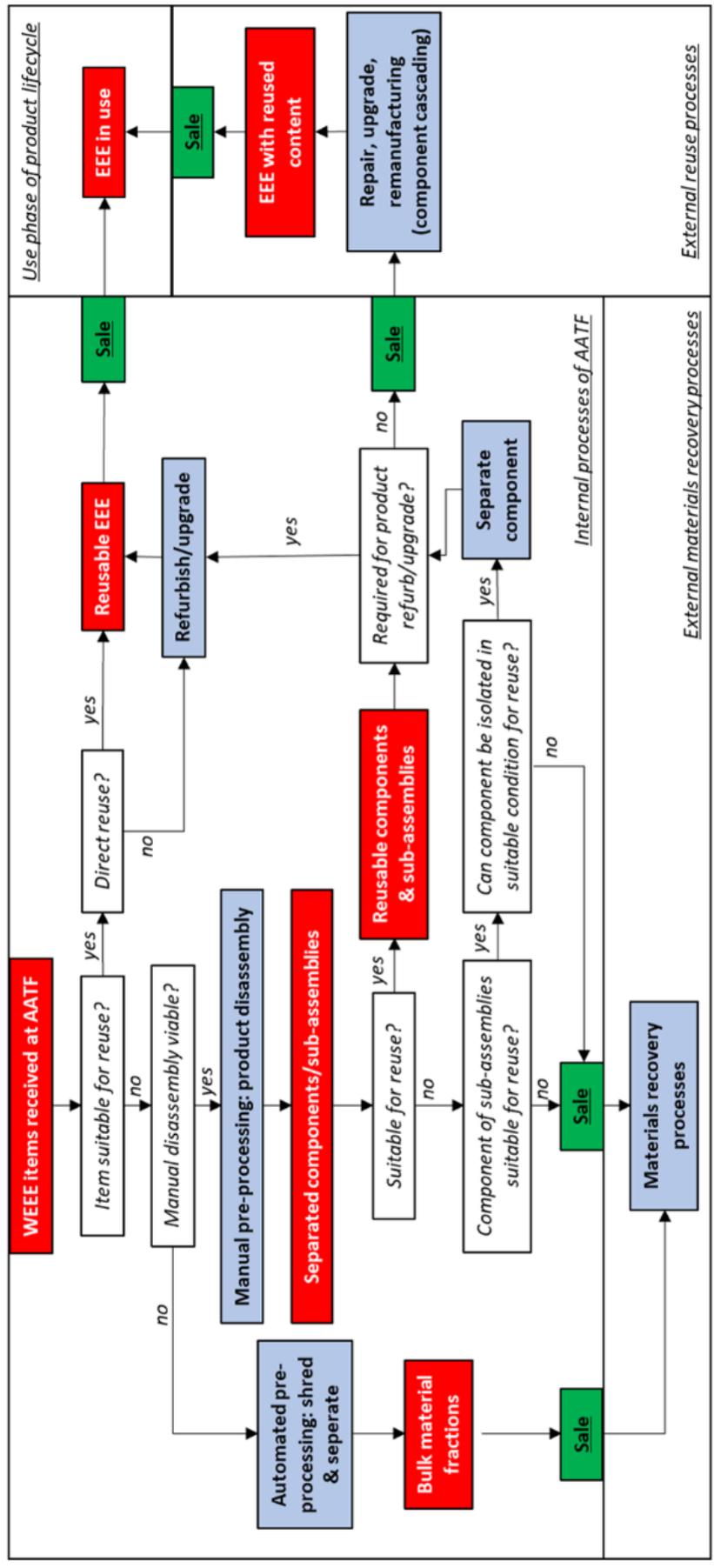


Abbildung 17: Entscheidungsbaum für die Behandlung von WEEE durch eine AATF

Literaturquelle 21: (Liu et al., 2022)

Die Effizienz der Demontage von WEEE kann durch eine Optimierung des Demontageprozesses gesteigert werden. In dieser Publikation wird eine effiziente Methode zur Prozessgenerierung von Demontageprozessen vorgestellt, die eine Lösung zur Verbesserung der Demontageeffizienz von Smartphones bietet. Grundlage hierfür ist ein Smartphone-Konzeptmodell, das alle relevanten Merkmale für die Demontage enthält. Ein Codierungssystem, welches die Merkmale spezifischer Smartphones beschreibt, erlaubt die automatische Generierung des Demontageprozesses eines spezifischen Smartphones. Das Resultat ist ein graphisch dargestellter Prozessverlauf, der von den Arbeiter:innen als Demontage-Anleitung verwendet werden kann (Liu et al., 2022).

3.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse

In diesem Unterkapitel erfolgt eine Zusammenfassung der thematischen Analyse der individuellen Literaturquellen. Dabei werden die gesammelten Vorgehensweisen entsprechend der Subforschungsfrage **S1** in Ansätze und Technologien kategorisiert. Vorgehensweisen, die einen theoretischen Ansatz oder eine Methode verfolgen, ohne eine konkrete Implementierung zu präsentieren, werden als Ansatz kategorisiert. Vorgehensweisen, die die konkrete Implementierung von Technologien beschreiben, werden als Technologie konkretisiert. In Anbetracht der Natur wissenschaftlicher Arbeiten besteht die Möglichkeit, dass ein Paper sowohl Ansätze als auch Technologien präsentiert und dementsprechend in beiden Kategorien Erwähnung findet.

Ansätze

WEEE und dessen PCBs enthalten eine Vielzahl wertvoller elektronischer und nicht-elektronischer Komponenten, die durch die zerstörungsfreie Demontage für den Reuse oder das Remanufacturing wiederverwendet werden können (Charles et al., 2020; Debnath et al., 2016; Lu et al., 2014; H. Wang et al., 2017; X. V. Wang & Wang, 2015; Xiang et al., 2013; Zeng et al., 2012). Produkte, Komponenten und gefährliche Stoffe, die nicht weiter verwendet werden, können müssen gesammelt und sofern möglich recycelt werden (Alvarez-de-los-Mozos & Renteria, 2017; Colledani et al., 2014; Debnath et al., 2016; Fornasiero et al., 2016; Xiang et al., 2013; Zeng et al., 2012). Wiederverwendete Produkte und Komponenten müssen einer ausreichenden Testung unterzogen werden (Colledani et al., 2014; Xiang et al., 2013).

Der Übergang von einer manuellen Demontage hin zu einer (semi-)automatischen Demontage ist erforderlich, um die Demontage effizienter und kostengünstiger zu gestalten (Alvarez-de-los-Mozos & Renteria, 2017; Cheng et al., 2017; Colledani et al., 2014; Zeng et al., 2012; H. Zhang et al., 2022). Vollautomatische Anlagen sind

aufgrund der hohen Variantenvielfalt der Produkte und deren Gebrauchszustand nur schwer umzusetzen (Colledani et al., 2014). Darüber hinaus ist die Implementierung automatischer Anlagen mit einem leistungsfähigen Identifikationssystem verbunden, welches die verschiedenen Komponenten und Materialien erkennt, sowie mit einem Decision-Support-System, welches die automatische Demontage plant und durchführt (Alvarez-de-los-Mozos & Renteria, 2017). Derzeit existieren lediglich wenige vollautomatische Anlagen für die Demontage, die lediglich auf die Demontage eines spezifischen Produkts spezialisiert sind (z.B. iPhones, Single-Use-Kameras) (Colledani et al., 2014). Die Implementierung automatischer Anlagen erfordert eine flexible Gestaltung sowie die Ausstattung mit fortschrittlichen Technologien und digitalen Systemen (Colledani et al., 2014; Fornasiero et al., 2016; Sharpe et al., 2018). Ein weiterer Lösungsansatz ist die Gestaltung von kollaborativen Mensch-Roboter-Arbeitsplätzen, an denen Mensch und Roboter gemeinsam an der Demontage von E-Waste arbeiten (Alvarez-de-los-Mozos & Renteria, 2017; Colledani et al., 2014). Die Realisierung derartiger Arbeitsplätze erfordert jedoch die Implementierung geeigneter Schutzmaßnahmen für die Arbeiter:innen (Alvarez-de-los-Mozos & Renteria, 2017; Cheng et al., 2017). Die Evaluierung der Produktionskapazität von Mensch, Roboter und Mensch-Roboter anhand ökonomischer, sozialer und ökologischer Indikatoren erlaubt die Identifikation jener Tätigkeiten, bei denen eine kollaborative Arbeitsteilung sinnvoll ist (Cheng et al., 2017).

De-Manufacturing bezeichnet die Demontage von Produkten mit dem Ziel der Wiederverwendung der Einzelteile für Reuse und Remanufacturing (Colledani et al., 2014). De-Manufacturing-Strategien zielen darauf ab, die nachhaltigste Entscheidung bezüglich der folgenden Aspekte zu treffen: (1) Produkt-Remanufacturing und -Reuse, (2) Teilgruppen- und Komponenten-Reuse, (3) Materialrecycling und -rückgewinnung, (4) Verbrennung und (5) Deponierung (Colledani et al., 2014). Bei der vollständigen Demontage werden Produkte entgegen ihrer Montagereihenfolge zerlegt, wobei das gesamte Produkt in seine Einzelteile zerlegt wird. Diese Art der Demontage findet ihre Anwendung bei der Wartung oder dem Remanufacturing ganzer Produkte (H. Wang et al., 2017). Alternativ zur vollständigen Demontage von Produkten und PCBs, besteht die Möglichkeit der selektiven Demontage, bei der lediglich wertvolle oder schadstoffhaltige Komponenten identifiziert und demontiert werden (Colledani et al., 2014; H. Wang et al., 2017; Zeng et al., 2012). Im Rahmen der zerstörenden Demontage werden nicht wiederverwendbare Teile zerstört, um eine schnellere Zugänglichkeit zu wertvollen Komponenten zu ermöglichen (Elo & Sundin, 2014). Zu den zerstörenden Demontageverfahren zählen beispielsweise das Schneiden und Brechen von Produkten sowie das Zerstören von Verbindungselementen (H. Wang et al., 2017). Im Rahmen der zerstörungsfreien Demontage erfolgt eine Zerlegung der Produkte derart, dass die Komponenten unbeschädigt bleiben und ihren inhärenten Wert behalten (Foo et al., 2021). Die Selektion stellt einen Prozess vor der Demontage des WEEE dar, bei dem bestimmt wird welche Produkte oder Komponenten für das

Remanufacturing geeignet sind und welche recycelt oder deponiert werden (X. V. Wang & Wang, 2015). Die Selektion erfolgt anhand der Identifizierung, Inspektion und Sortierung (Barletta et al., 2015; Schlüter et al., 2021). PCBs lassen sich anhand ihres Gebrauchszustandes und ihrer Wiederverwendbarkeit bzw. der Wiederverwendbarkeit ihrer Komponenten kategorisieren und sortieren (Fornasiero et al., 2016). Nicht verwendete Materialien werden zerkleinert und recycelt (Fornasiero et al., 2016).

Technologien

Als vielversprechende Technologien für die Automatisierung der Demontage können industrielle Roboter, kollaborative Roboter sowie flexible Leichtbauroboter genannt werden. Diese unterstützen die Arbeiter:innen bei der Demontage und ermöglichen flexible Ladevorgänge (Alvarez-de-los-Mozos & Renteria, 2017; Cheng et al., 2017; Colledani et al., 2014; Zeng et al., 2012). Die Steuerung von Cobots durch Handzeichen sowie Spracherkennung ermöglicht eine intuitive Bedienung. Um die Sicherheit der Arbeiter:innen zu gewährleisten, müssen Sicherheitstechnologien wie visuelles Tracking und Kollisionserkennung implementiert werden (Alvarez-de-los-Mozos & Renteria, 2017). Messtechnologien, wie Kameras, Schwermetalldetektoren und Lautstärkemesser sowie die Zuhilfenahme verschiedener Roboter- und Managementdaten, liefern bei der Gestaltung der Demontagesysteme Daten, um Tätigkeiten dem Menschen, dem Roboter oder einem kollaborativen Mensch-Roboter-Demontagesystem zuzuordnen (Cheng et al., 2017). Roboter sind zudem in der Lage, Schrauben mithilfe von Kameras, Deep-Learning-Modellen und Schraubenerkennungsprogrammen zu identifizieren und automatisch zerstörungsfrei herauszudrehen (Foo et al., 2021; Mangold et al., 2022). Die Implementierung flexibler modularer Transportsysteme unterstützt die Automatisierung (Colledani et al., 2014). Die Entwicklung und Einführung eines cloud-basierten Systems (WRCloud), das Recycling- und Rückgewinnungskompetenzen sowie unterstützende Mechanismen und Technologien integriert, kann Remanufacturing-Prozesse digital unterstützen. Die WRCloud ermöglicht mittels eindeutiger Identifizierung der Produkte Zugriff auf Produktinformationen, woraufhin sie den optimalen Rückgewinnungsprozess für das Produkt bzw. die Komponenten und Materialien ermittelt (X. V. Wang & Wang, 2015). Um Entscheidungen über Wiederaufarbeitungsstrategien auf genauen und aktuellen Informationen zu basieren, können Cyber-Physische Systeme integriert werden, welche die Rückverfolgbarkeit, Entscheidungsfindung und Kontrolle von Prozessen verbessern. Um eine bidirektionale Verbindung von Produkten zwischen der virtuellen und physischen Welt herzustellen, können diese beispielsweise durch RFID-Tags gekennzeichnet werden (Sharpe et al., 2018). Intelligente Sortiersysteme werden durch flexible künstliche Intelligenz (KI) gesteuert, welche mithilfe von Sensor- und Scanning-Technologie den E-Waste identifiziert und automatisch sortiert oder Arbeiter:innen als digitales Assistenzsystem unterstützt (Barletta et al., 2015; Charles et al., 2020; Peiró et al., 2021; H. Zhang et al., 2022). Die Identifizierung kann auch

mittels morphometrischer Deskriptoren erfolgen. Für die Selektion und Kategorisierung von WEEE ist der Einsatz digitaler Datenbanken erforderlich, die Informationen über PCBs und Komponenten führen (Peiró et al., 2021). Die Speicherung spezifischer Produktinformationen ermöglicht die automatische Generierung von Demontageprozessen (Liu et al., 2022).

Für die zerstörende Demontage kann eine Kreis- oder Bandsäge verwendet werden. Zudem kann die Zerstörung von Schrauben und Bolzen durch die Aufbringung elastischer Wellen erfolgen (Elo & Sundin, 2014; H. Wang et al., 2017). Die zerstörende Demontage von Schrauben kann mithilfe eines semi-automatischen Demontagesystems erfolgen, welches Schrauben mittels Kamera, Bildverarbeitung und maschinellem Lernen identifiziert und herausbohrt (Simon et al., 2018). Darüber hinaus können Kunststoffgehäuse durch Cryocracking gebrochen oder mit Leiterplattenschneidern gespaltet werden (Charles et al., 2020).

Für die Wiederverwendung elektronischer Komponenten einer PCB, müssen diese von der PCB getrennt werden. Dazu muss die Lötverbindung der Komponenten mit der PCB mittels Wärmeaufbringung gelöst werden. Für die Wärmeaufbringung können elektrische Heizplatten, elektrische Heizröhren, Infrarotheizer, Heißluft sowie Lötbäder verwendet werden (Debnath et al., 2016; Xiang et al., 2013; Zeng et al., 2012). SMD-lastige PCBs lassen sich besser durch Heißluft, THD-lastige PCBs besser durch Infrarot-Heizgeräte erhitzen (Xiang et al., 2013). Eine Trennung der Lötverbindungen ist auch durch chemische Reagenzien, Schleifen sowie Paraffin- und Silikonöle möglich (Debnath et al., 2016). Anschließend erfolgt die Aufbringung mechanischer Kräfte, um die Komponenten von der PCB zu separieren. Die mechanische Kraftaufbringung kann manuell erfolgen oder automatisch durch den Einsatz diverser Geräte erfolgen, darunter Vakuumgreifer, Parallelgreifer, Vibrationsplatten, Rotationsbürsten, heiße Luftklingen sowie horizontale und vertikale Propeller (Debnath et al., 2016; Xiang et al., 2013; Zeng et al., 2012). Die Trennung von THD-lastigen PCBs erlaubt lediglich vertikale Kraftaufbringung, da ansonsten die Pins der Komponenten beschädigt werden (Xiang et al., 2013). Der Einsatz von Bildverarbeitungsprogrammen und KI ermöglicht die automatische selektive Demontage einzelner wertvoller Komponenten (Zeng et al., 2012). Im Anschluss müssen die Komponenten durch geeignete Prüfverfahren getestet werden (Debnath et al., 2016; Xiang et al., 2013).

Die Möglichkeiten des Recyclings von Kunststoffen umfassen das chemische Recycling für petrochemische Prozesse, das mechanische Recycling durch Zerkleinerung und Sortierung zur Herstellung neuer Kunststoffprodukte sowie das thermische Recycling, bei dem Kunststoff als alternativer Brennstoff verwendet wird (Alvarez-de-los-Mozos & Renteria, 2017). Die Identifizierung und Sortierung von Kunststoffen kann durch den Einsatz von Machine-Vision-Systemen und vertikalen

Vibrationssystemen automatisiert werden. Dabei werden die Eigenschaften des Kunststoffs, etwa Art, Zusatzstoffe und Verunreinigungen, berücksichtigt (Alvarez-de los-Mozos & Renteria, 2017).

4 Theoretische Demontage von Fernbedienungen

In diesem Kapitel erfolgt eine theoretische Planung der Demontage von Fernbedienungen. Im Folgenden wird zunächst die Produktgruppe der Fernbedienungen vorgestellt und in gewöhnliche und hochwertige Fernbedienungen untergliedert. Im Anschluss erfolgt eine Veranschaulichung des Demontageprozesses anhand von Flussdiagrammen zur Selektion sowie Demontage von gewöhnlichen und hochwertigen Fernbedienungen. Zudem erfolgt eine Diskussion, der in der systematischen Literaturrecherche identifizierten Ansätze und Technologien hinsichtlich ihrer Eignung zur Gestaltung eines Arbeitsplatzes für die Demontage von Fernbedienungen im Sinne des Remanufacturing.

4.1 Produktgruppe Fernbedienungen

Die Produktgruppe der Fernbedienungen fällt unter den UNU-Key „0401 Small Consumer Electronics“ und ist in die übergeordnete Kategorie Kleingeräte einzuordnen (Forti et al., 2020). Auf den Wiener Mistplätzen erfolgt die Sammlung von Fernbedienungen unter der Kategorie Elektro-Kleingeräte (Stadt Wien: Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark, 2024).

Infrarot-Fernbedienungen für die Bedienung von beispielsweise Fernsehern und Radios bestehen typischerweise aus dem Gehäuse, einer Silikonschaltmatte, dem Batterieanschluss, den Batterien und der PCB. Die PCB verfügt über Kontaktflächen für das Tastenfeld, eine Infrarot-LED und eine als integrierte Schaltung ausgeführte Steuerschaltung, sowie verschiedene elektronische Komponenten wie Kondensatoren, Widerstände, Transistoren und Keramikwiderstände. Aufgrund der spärlichen Bestückung der PCB und der preiswerten Komponenten wird diese Art der Fernbedienung in dieser Diplomarbeit als gewöhnliche Fernbedienung bezeichnet.

Die PCBs von Fernbedienungen für Spielkonsolen und Computer sind häufig dichter bestückt und enthalten zusätzliche hochwertige elektronische Komponenten wie z.B. komplexe integrierte Schaltungen zur Datenspeicherung, Beschleunigungssensoren, Analog-Digital-Wandler, Bluetooth-Controller sowie integrierte haptische Motoren und Lautsprecher. Aufgrund der wertvolleren Komponenten im Vergleich zu einer gewöhnlichen Fernbedienung wird diese Art von Fernbedienung in dieser Diplomarbeit als hochwertige Fernbedienung bezeichnet.

4.2 Demontage-Prozessfluss von Fernbedienungen

In diesem Unterkapitel erfolgt eine Veranschaulichung des Demontage-Prozessflusses von Fernsteuerungen anhand von Flussdiagrammen, welche durch textliche Erläuterungen ergänzt werden. Die Modellierung des Demontage-

Prozessflusses basiert auf den Erfahrungswerten aus der Besichtigung eines Wiener Demontage- und Recyclingzentrums für Elektroaltgeräte sowie auf den in der systematischen Literaturrecherche identifizierten wissenschaftlichen Arbeiten und deren Ansätzen und Technologien. Eine Legende der verschiedenen Diagrammelemente ist in Abbildung 18 dargestellt.



Abbildung 18: Legende der Diagrammelemente

4.2.1 Selektion:

Abbildung 19 zeigt den Prozess der Selektion, der durch das Eintreffen der Elektrokleingeräte im Demontagezentrum ausgelöst wird.

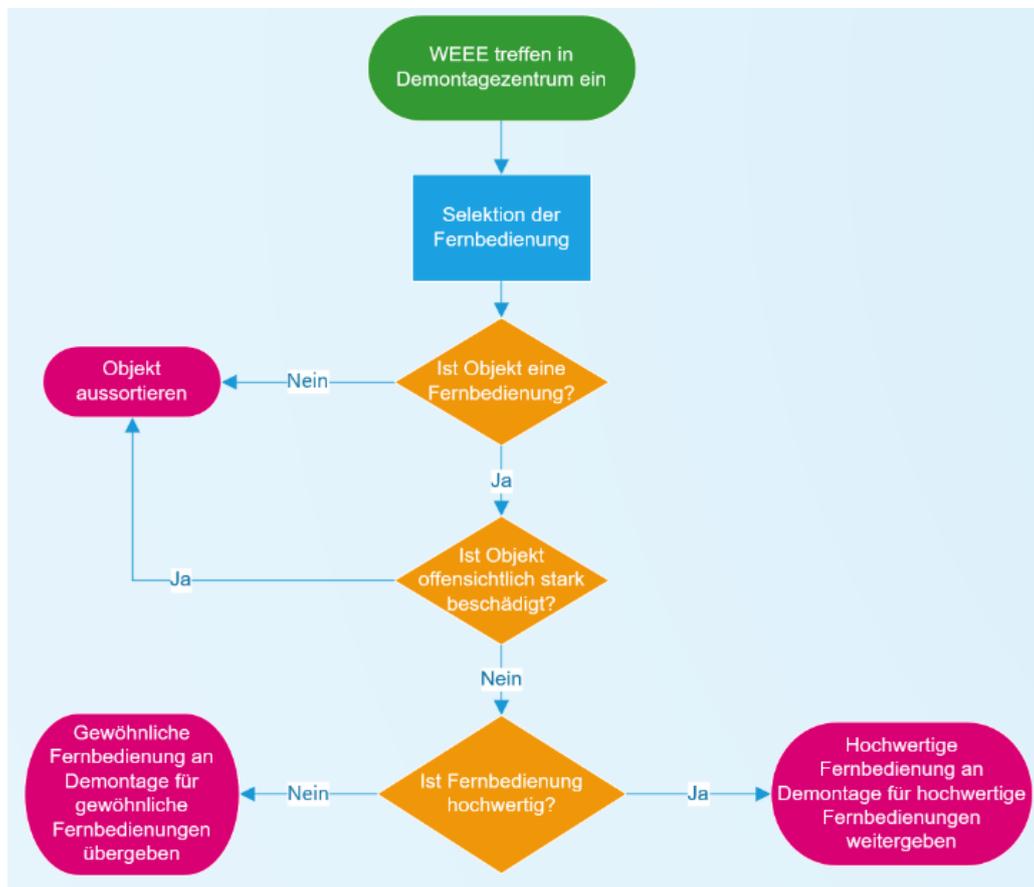


Abbildung 19: Flussdiagramm zur Selektion

Die Selektion erfolgt anhand der Identifizierung, Inspektion und Sortierung der Elektro-Altgeräte (**L11**). Dabei können verschiedene Technologien den Prozess unterstützen:

- Der Einsatz von Sensor- und Scanning-Technologie, Kameras, Bildverarbeitungstechniken, maschinellem Lernen und künstlicher Intelligenz sowie Produktdatenbanken ermöglicht die Unterscheidung von Fernbedienungen zu anderen Objektkategorien. Ferner können wertvolle Fernbedienungen, die als solche in der Produktdatenbank hinterlegt sind, produktspezifisch identifiziert sowie stark beschädigte Fernbedienungen aussortiert werden (**L9, L11, L12**).
- Digitale Systeme, wie Cyber-Physische Systeme, Decision Support Systeme und Cloudsysteme, welche über Daten der Fernbedienungen sowie zeit- und kostenkritische Informationen zu den Remanufacturing-Prozessen verfügen, unterstützen den Selektionsprozess, indem sie automatisch Entscheidungen über die zu wählende Wiederaufarbeitungsstrategie treffen. Die Entscheidungsfindung erfolgt anhand ökonomischer, ökologischer und sozialer Faktoren (**L8, L10, L11**). Eine Implementierung als digitales Assistenzsystem (**L11**), das die weitere Vorgehensweise zu jeder Fernbedienung vorschlägt und um Bestätigung der Mitarbeiter:innen anfragt, erscheint aufgrund des ökonomisch erforderlichen hohen Durchsatzes irrelevant.
- Die physische Sortierung kann durch intelligente Sortiersysteme (**L7**), wie beispielsweise Machine-Vision-ausgestattete Cobots und Industrieroboter, erfolgen (**L9, L15**), die den WEEE mittels Vakuumgreifern sortieren (**L15**). Visuelles Tracking und Kollisionserkennung stellen geeignete Schutzmaßnahmen für Arbeiter:innen dar, die den Sortierprozess unterstützen, um WEEE zu entfernen, welches durch die Roboter nicht gegriffen werden kann (**L13**). Eine Einteilung der Aufgaben zu Mensch, Roboter oder Mensch-Roboter erfolgt bei der Planung des Selektionsprozess anhand ökonomischer, ökologischer und sozialer Faktoren (**L14**).

4.2.2 Demontage gewöhnlicher Fernbedienungen:

Abbildung 20 veranschaulicht den Prozess der Demontage gewöhnlicher Fernbedienungen.

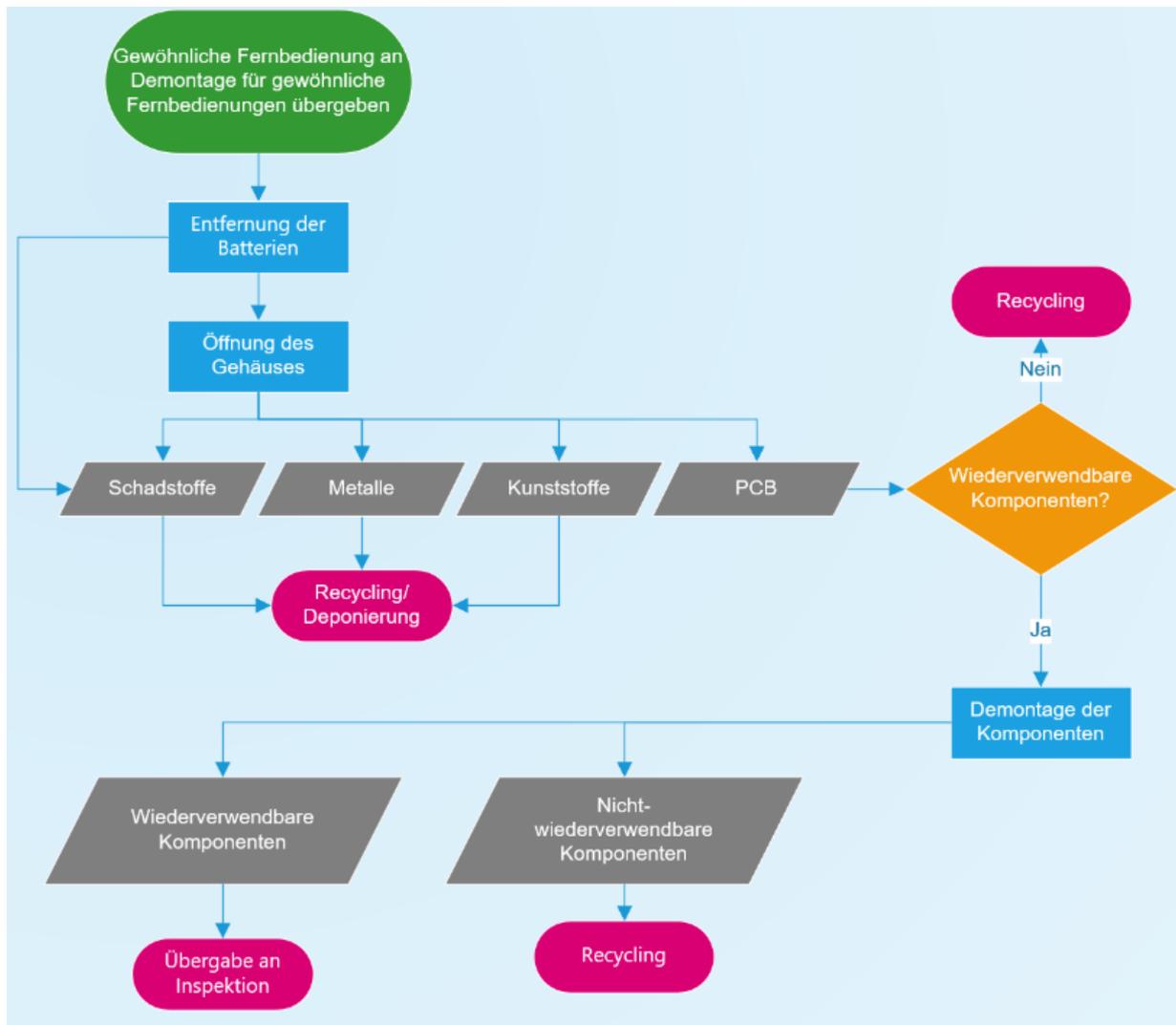


Abbildung 20: Flussdiagramm zur Demontage gewöhnlicher Fernbedienungen

Nach der Entfernung der Batterien kann das Öffnen des Gehäuses auf unterschiedliche Weise erreicht werden:

- Zerstörende Demontage:
 - Die Verwendung einer Band- oder Kreissäge ermöglicht ein schnelles Aufschneiden der Fernbedienungen (L19). Dabei erfolgt die Trennung quer durch die Mitte, wodurch das Gehäuse als auch die PCB nicht wiederverwendet werden können. Die meisten elektronischen Komponenten der PCB bleiben unbeschädigt, da diese vermehrt am Kopf- und Fußende der PCB angebracht sind. Negative Aspekte sind der Stromverbrauch der Säge und die Abnutzung der Sägeblätter sowie das

- erhöhte Arbeitsrisiko der Arbeiter:innen bei manueller Verwendung der Säge (**L14**).
- Leiterplattenschneider ermöglichen ebenso das Aufschneiden von Fernbedienungen und werden üblicherweise manuell betrieben (**L4b**).
- Beim Cryocracking werden die Fernbedienung in flüssigen Stickstoff getaucht und anschließend aufgeschlagen. Die Anwendung eignet sich ausschließlich für Kunststoffgehäuse, da Metallgehäuse nicht ausreichend zerbrechen. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass ökonomische, ökologische und soziale Faktoren bei der Anwendung von Cryocracking nicht näher beschrieben wurden und dementsprechend geprüft werden müssen (**L4b**).
- Die Verwendung eines KI-betriebenen Roboters ermöglicht das Aufbohren von Schrauben (**L17, L18**). Da Schraubverbindungen bei Fernbedienungen selten vorkommen und diese häufig verdeckt sind, kann diese Vorgehensweise verworfen werden.
- Beim Aufhebeln werden die Gehäusehälften mit Hilfe eines flachen Werkzeuges manuell aufgehebelt. Dabei können die Gehäusehälften beschädigt werden.
- Zerstörungsfreie Demontage:
 - Durch das Aufschrauben und zerstörungsfreie Lösen aller Verbindungselemente kann eine Rückgewinnung aller Komponenten gewährleistet werden. Das Aufschrauben kann manuell oder durch KI-betriebene Roboter erfolgen (**L16, L20**).

Die zerstörende Demontage ist zu präferieren (**L17, L19**). Die zerstörungsfreie Demontage gewöhnlicher Fernbedienungen ist ungeeignet, da der Prozess zu lange dauert. Darüber hinaus erfolgt keine Wiederverwendung der PCB als Ganzes sowie des Gehäuses, da der damit verbundene Arbeitsaufwand zum Remanufacturing der gesamten Fernbedienung keinen ökonomischen und ökologischen Mehrwert mit sich bringt (**L14**). Stattdessen erfolgt die Rückgewinnung von elektronischen PCB-Komponenten (EC), die einer erneuten Verwendung zugeführt werden können (**L1, L2, L3, L4a, L5, L6, L7**). Für die Trennung der Lötverbindungen der EC von Fernbedienungen mit der PCB ist die Wärmeaufbringung am vielversprechendsten. Für die Wärmeaufbringung können elektrische Heizplatten, elektrische Heizröhren, Infrarotheizer, Heißluft sowie Lötbäder verwendet werden (**L1, L2, L3**). Ein Abschleifen der Lötverbindungen erscheint zu aufwendig, während chemische Reagenzien sowie Paraffin- und Silikonöle die Wiederverwendbarkeit der EC beeinflussen könnten (**L3**). Die Abtrennung der EC erfolgt durch mechanische Kraftaufbringung, welche durch Vakuumgreifer, Parallelgreifer, Vibrationsplatten, Rotationsbürsten, heiße Luftklingen sowie horizontale und vertikale Propeller erzeugt wird (**L1, L2, L3**). Im Anschluss erfolgt die Identifikation und Sortierung der ECs zu ihrer jeweiligen EC-Gruppe (**L3**,

L4a). Dabei können Ansätze und Technologien aus dem vorherigen Unterkapitel 4.2.1 unterstützend Anwendung finden. Eine alternative Vorgehensweise zur vollständigen Demontage der PCB ist die selektive Demontage einzelner wertvoller EC (**L1, L18**), beispielsweise der integrierten Steuerschaltung. Die selektive Demontage kann durch automatische Demontagezellen erfolgen, die zusätzlich zu Werkzeugen zur Wärme- und Kraftaufbringung über Machine-Vision-Systeme verfügen (**L1**). Die manuelle selektive Demontage (**L4a**) ist aufgrund der kostengünstigen EC gewöhnlicher Fernbedienungen nicht ökonomisch.

Nicht wiederverwendbare Komponenten, PCBs und Materialien müssen entsprechend gesammelt, recycelt und deponiert werden (**L1, L2, L3, L7, L13**). Die Identifikation und Sortierung der verschiedenen Materialien kann durch den Einsatz von Machine-Vision- und Vibrationssystemen unterstützt werden (**L13**). Eine weitere Möglichkeit zur Identifizierung der Polymerbestandteile stellt die Röntgenfluoreszenzanalyse dar, welche anschließend durch eine Fourier-Transformations-Infrarot-Analyse ergänzt wird (Abeykoon et al., 2021). Arena & Ardolino stellen zudem in ihrem Paper „Technical and environmental performances of alternative treatments for challenging plastics waste“ eine Vielzahl an traditionellen und aufkommenden Verfahren zum Recycling von WEEE-Plastik vor (2022). Zur Steigerung der Produktivität des Demontagesystems ist die Implementierung flexibler modularer Transportsysteme sowie von Robotern, kollaborativen Robotern und Leichtbaurobotern für Transport- und Ladevorgänge über die gesamte Prozesskette möglich (**L6, L7, L10**). Des Weiteren sind mit einer (Semi-)Automatisierung der zerstörenden Demontageprozesse ökonomische, ökologische und soziale Vorteile verbunden (**L1, L6, L7, L9, L13, L14, L15**). Erdenklich wäre beispielsweise ein System, das Fernbedienungen automatisch zertrennt und in seine Bestandteile sortiert. Diese Vorgehensweise wäre ökonomischer, da die Fernbedienungen effizienter und kostengünstiger getrennt werden, ökologischer, da die Anzahl der wiederverwendbaren Komponenten erhöht wird, und sozialer, da Arbeiter:innen weniger oft in Berührung mit toxischen Komponenten kommen (**L1, L6, L7, L9, L13, L14, L15**).

4.2.3 Demontage hochwertiger Fernbedienungen

Abbildung 21 veranschaulicht den Prozess der Demontage hochwertiger Fernbedienungen. Aufgrund des höheren inhärenten Werts hochwertiger Fernbedienungen und ihrer Komponenten, werden diese vollständig entgegen ihrer Montagereihenfolge zerlegt (**L18**). Beim Öffnen des Gehäuses sind zerstörungsfreie Verfahren zu präferieren, um den höchstmöglichen Wert der Fernbedienung und ihrer Komponenten zu erhalten (**L16, L18, L20**). Die zerstörungsfreie Demontage erfolgt durch das Lösen aller Verbindungselemente, beispielsweise das Aufdrehen von Schraubverbindungen. Dieser Vorgang kann manuell oder durch KI-betriebene

Roboter erfolgen (L16, L20). Ausschließlich nicht mehr lösbare Verbindungen werden zerstörend getrennt, beispielsweise durch das Aufbohren von Schrauben (L17).

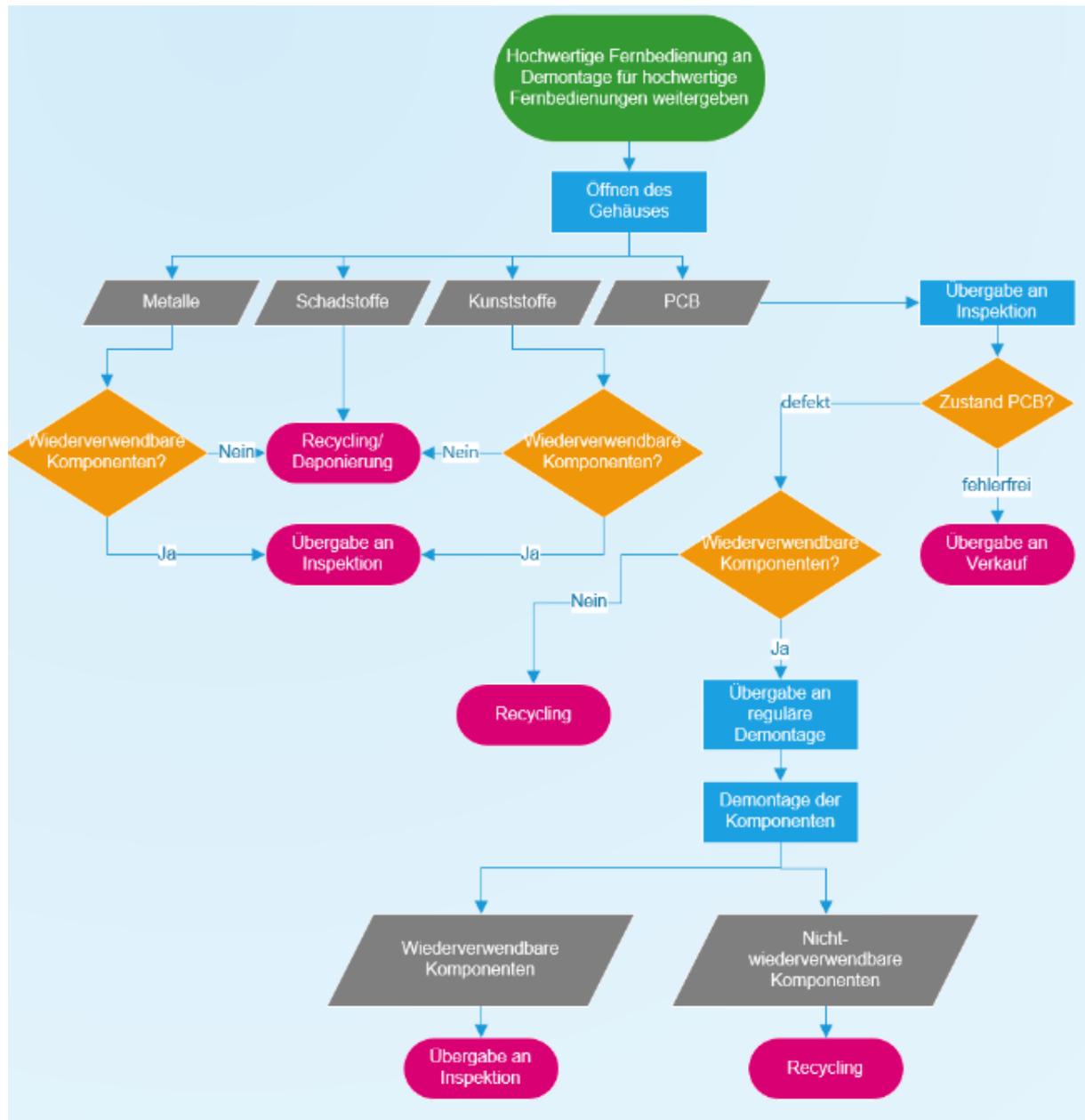


Abbildung 21: Flussdiagramm zur Demontage hochwertiger Fernbedienungen

Der Einsatz von Kameras, Bildverarbeitungstechniken künstlicher Intelligenz sowie Produktdatenbanken ermöglicht die Identifikation der Fernbedienungen sowie die Bereitstellung produktspezifischer Informationen (L10, L11, L12). Beispielsweise können automatisch generierte graphische Demontage-Prozessverläufe dargestellt werden, die als Demontage-Anleitung für Arbeiter:innen dienen (L21). Des Weiteren verfügen digitale Systeme über zeit- und kostenkritische Informationen zu den Remanufacturing-Prozessen und unterstützen bei der Entscheidungsfindung über die zu wählende Demontagetiefe oder Wiederaufarbeitungsstrategie. Die Entscheidungsfindung erfolgt anhand ökonomischer, ökologischer und sozialer

Faktoren (**L8, L10, L11, L13**). Die zurückgewonnenen PCBs werden anschließend für die Funktionsüberprüfung an die Inspektion übergeben (**L7**). Fehlerfreie PCBs können anschließend für das Remanufacturing verwendet werden. Fehlerhafte PCBs werden durch passive wiederverwendbare RFID-Tags gekennzeichnet, welche eine eindeutige Identifizierung der PCB innerhalb eines cyberphysischen Systems ermöglichen (**L10**). Dies ermöglicht die Ausschließung defekter elektronischer Komponenten (EC) von der selektiven Demontage oder deren Aussortierung nach der vollständigen Demontage ohne eine erneute Inspektion. Zudem können Daten über die PCB und ihre Komponenten an den Kunden bzw. Remanufacturer weitergegeben werden (**L8, L10**). Die Rückgewinnung der EC erfolgt anhand der in Kapitel 4.2.2 vorgestellten Vorgehensweisen. Für besonders wertvolle Komponenten besteht zudem die Möglichkeit einer manuellen Demontage (**4a**).

Des Weiteren können Technologien und Ansätze zur Sammlung, zum Recycling und zur Deponierung, zur Identifikation und Sortierung sowie zur Steigerung der Produktivität durch flexible Transportsysteme und (Semi-)Automatisierung aus Kapitel 4.2.2 übernommen werden.

5 Praktische Umsetzung eines Demontage-Demonstrators

Der Aufbau des Demontage-Demonstrators orientiert sich an den Erkenntnissen der theoretischen Demontage aus Kapitel 4. Der in Unterkapitel 4.2 modellierte Demontage-Prozessfluss, die zugehörigen Flussdiagramme sowie die Diskussion, der in der systematischen Literaturrecherche identifizierten Technologien und Ansätze, dienen als Grundlage der praktischen Umsetzung. Der Demontage-Demonstrator stellt ein Arbeitssystem zur Demontage von Fernbedienungen im Sinne des Remanufacturing dar. Ziel ist es, die kognitive Belastung des Menschen zu reduzieren und gleichzeitig den menschlichen Arbeitsaufwand zu verringern, um den Demontageprozess effizienter und wirtschaftlicher zu gestalten.

Im Anschluss an die Vorstellung und Beschreibung der praktischen Umsetzung erfolgt eine Evaluierung des Demontage-Demonstrators. Die Evaluierung erfolgt anhand der Planung, Analyse und Diskussion von Expert:innen-Interviews.

5.1 Aufbau des Demontage-Demonstrators

Abbildung 22 veranschaulicht den Aufbau des Demontage-Demonstrators in der Pilotfabrik der Technischen Universität Wien.



Abbildung 22: Aufbau des Demontage-Demonstrators

Die weiße Zone kennzeichnet den Bereich der Anlieferung der Fernbedienungen, während die orangenen Zonen die verschiedenen Sortierbereiche markieren. Die rote

Zone kennzeichnet den Arbeitsbereich der zerstörenden Demontage für gewöhnliche Fernbedienungen. Die grüne Zone markiert den Arbeitsbereich für die zerstörungsfreie Demontage hochwertiger Fernbedienungen und grenzt an den gelben Bereich zur Inspektion der PCB hochwertiger Fernbedienungen. Die schwarzen Boxen am unteren linken Bildrand dienen der Sammlung von Materialien für das spätere Recycling nicht weiter verwendbarer Bauteile und Komponenten. Die grauen Boxen am unteren rechten Bildrand dienen der Sammlung wiederverwendbarer Bauteile und Komponenten, die in weiterer Folge für das Remanufacturing hochwertiger Fernbedienungen verwendet werden können. Das hellblaue Förderband am linken oberen Bildrand repräsentiert ein vereinfachtes automatisches Komponentenrückgewinnungssystem zur Rückgewinnung elektronischer Komponenten.

5.1.1 Selektion

Die Selektion erfolgt ausgehend von der Anlieferung verschiedener Fernbedienungen in die weiße Zone (siehe Abbildung 22). Elektro-Kleingeräte anderer Produktgruppen, Müll, der fälschlicherweise als Elektro-Kleingerät gesammelt wurde, sowie stark beschädigte Fernbedienungen ohne wiederverwendbare Komponenten werden bereits zuvor aussortiert und in dieser Diplomarbeit nicht weiter behandelt. Im Anschluss erfolgt die Selektion der Fernbedienung anhand der in Kapitel 4.1 vorgestellten Kategorisierung in gewöhnliche und hochwertige Fernbedienungen und die Sortierung in die der Kategorie zugeordneten orangenen Sortierbereiche der jeweiligen Demontage-Arbeitsbereiche (siehe Abbildung 22). Wii-Fernbedienungen werden aufgrund ihres Wiederverkaufswertes sowie der dichten Bestückung der PCB mit wertvollen elektronischen Komponenten als hochwertig eingestuft. Als gewöhnliche Fernbedienungen werden Fernbedienungen verschiedener Modelle und Hersteller bezeichnet, die zur Bedienung von Fernsehern eingesetzt werden. Die PCB gewöhnlicher Fernbedienungen weisen eine spärliche Bestückung auf und setzen sich neben dem Steuerschaltkreis lediglich aus kostengünstigen Komponenten zusammen. Abbildung 23 zeigt die PCB einer hochwertigen Wii-Fernbedienung (links) sowie die PCB einer gewöhnlichen Fernbedienung (rechts) und veranschaulicht die unterschiedlich dichte Komponentenbestückung der PCBs.

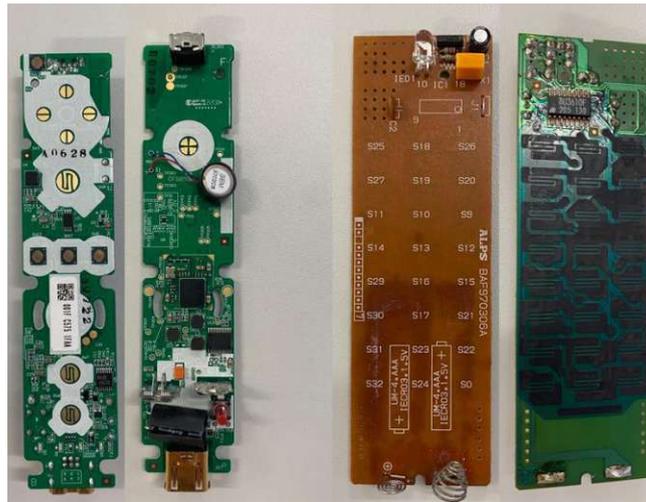


Abbildung 23: Hochwertige PCB (links) & Gewöhnliche PCB (rechts)

Die Selektion erfolgt durch den Einsatz eines Universal Robots UR3e. Der kollaborative Roboter (Cobot) ist mit einem 2-Finger-Greifer des Herstellers Robotiq und einer Logitech C270 Webcam ausgestattet sowie über ein LAN- und USB-Kabel mit einem Computer verbunden. Die Kommunikation zwischen Cobot und Computer erfolgt über ein in Python programmiertes Skript, welches über die von Jose Luis Garcia del Castillo (2018/2024) entwickelte Machina-Bridge mit dem UR3e kommuniziert. Abbildung 24 zeigt den Aufbau des Roboter-Selektionssystems.

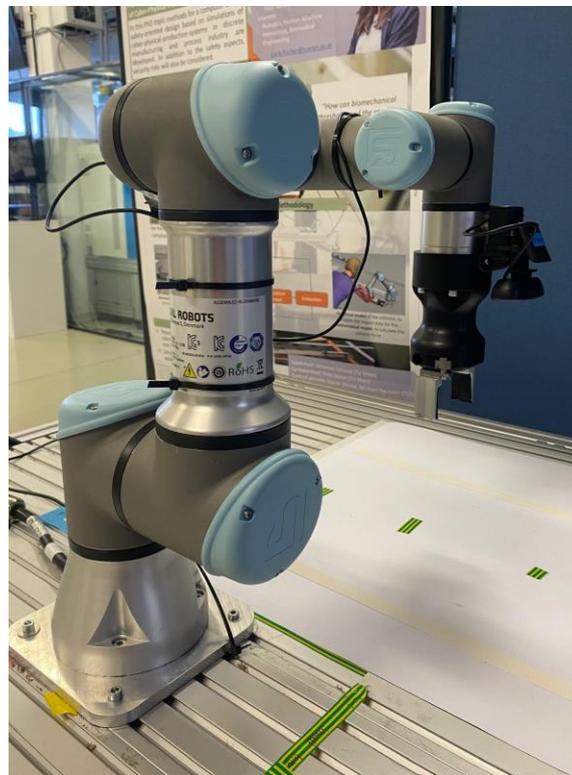


Abbildung 24: Roboter-Selektionssystem

Die Selektion erfolgt mittels einer Fotoaufnahme. Hierzu fährt der Cobot mit der Webcam über die zu klassifizierende Fernbedienung. Ein mittels maschinellen

Lernens angelernter Bildverarbeitungsalgorithmus verarbeitet das Foto und klassifiziert die Fernbedienung in die jeweilige Kategorie. Im Anschluss nimmt der Cobot die Fernbedienung auf und sortiert gewöhnliche Fernbedienungen an den Arbeitsplatz zur zerstörenden Demontage sowie hochwertige Fernbedienungen an den Arbeitsplatz zur zerstörungsfreien Demontage. Abbildung 25 veranschaulicht den auf den Demontage-Demonstrator adaptierten Prozess zur Selektion.

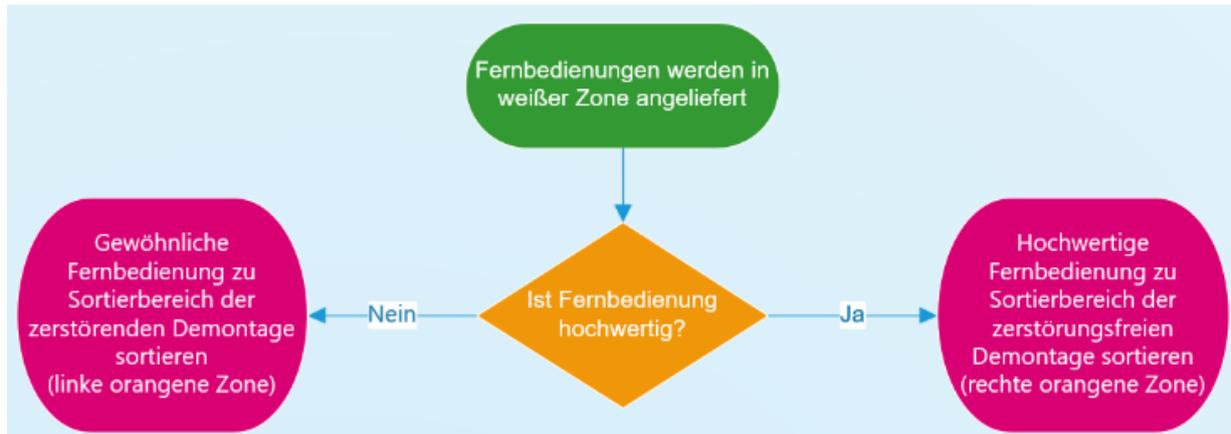


Abbildung 25: Flussdiagramm zur Selektion des Demontage-Demonstrators

5.1.2 Zerstörender Demontage-Arbeitsbereich

Die Demontage gewöhnlicher Fernbedienungen erfolgt am Arbeitsbereich zur zerstörenden Demontage in der roten Zone (siehe Abbildung 22). Der geringe Produkt- und Bauteilwert gewöhnlicher Fernbedienungen macht eine zerstörungsfreie Demontage und das Remanufacturing der gesamten Fernbedienung unwirtschaftlich. Im Fokus der zerstörenden Demontage steht die effektive Erlangung des Zugangs zur PCB, um eine Wiederverwendung der elektronischen Komponenten zu ermöglichen. Bauteile und Komponenten, die nicht für das Remanufacturing wiederverwendet werden, werden in den schwarzen Boxen am unteren linken Bildrand für das spätere Recycling gesammelt (siehe Abbildung 22). Die Gehäusehälften von gewöhnlichen Fernbedienungen sind in der Regel durch Schnappverschlüsse miteinander verbunden, die mit einem Öffnungswerkzeug für elektronische Geräte aufgebrochen werden können. Abbildung 26 zeigt das für die zerstörende Demontage verwendete Öffnungswerkzeug.



Abbildung 26: Öffnungswerkzeug (IFIXIT Jimmy Öffnungswerkzeug EU145259-1 | HORNBACH AT, 2024)

Gewöhnliche Fernbedienungen, die über eine zusätzliche Verschraubung verfügen, können mit dem Öffnungswerkzeug nicht geöffnet werden. Das von Charles et al. beschriebene Aufschneiden des Gehäuses mit einem Leiterplattenschneider konnte in einem praktischen Versuch nicht realisiert werden, da die Dicke der Fernbedienungsgehäuse dies nicht zuließ (2020). Leiterplattenschneider und Hebelscheren werden üblicherweise zum Schneiden von Stahlblechen bis zu 8 mm und von Rundstahl bis zu 22 mm verwendet (BHM-Maschinen, 2024). Allerdings ist das Einspannen von Fernbedienungen unter der Schneide der Hebelschere nicht möglich, da die Gehäuse der Fernbedienungen dicker sind als die maximale Öffnung der Schneide. Die Umsetzung einer Cryocracking-Anlage oder eines automatischen Bandsägesystems ist aufgrund finanzieller Umsetzungseinschränkungen und Sicherheitsbedenken nicht möglich. Infolgedessen werden nicht kompatible Fernbedienungen, die sich nicht mit dem Öffnungswerkzeug aufbrechen lassen, mit einem Hammer aufgeschlagen. Diese Vorgehensweise wurde vom Schweizer Elektronikschrott-Recycler Immark AG übernommen (Edy Birchler, 2020). Die Verwendung eines Hammers führt zu Beschädigungen an den Bauteilen, beispielsweise zur Zersplitterung der PCB, was eine Wiederverwendung des gesamten Bauteils ausschließt. Im Rahmen der zerstörenden Demontage gewöhnlicher Fernbedienungen erfolgt jedoch lediglich eine Rückgewinnung elektronischer Komponenten, sodass Beschädigungen an der PCB toleriert werden. Abbildung 27 zeigt eine gewöhnliche Fernbedienung, die durch einen Hammer geöffnet wurde.

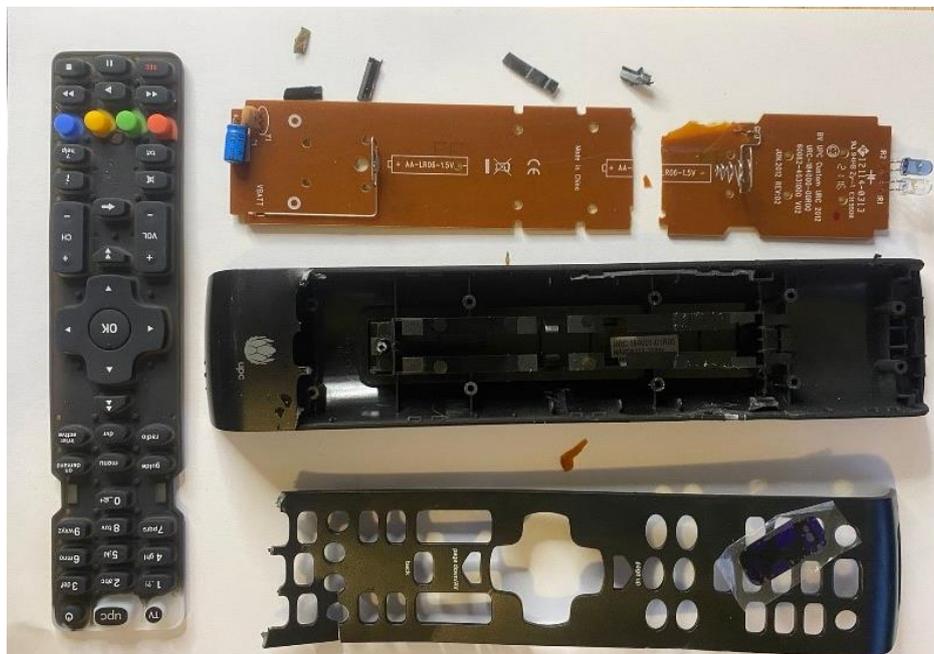


Abbildung 27: Durch Hammer geöffnete Fernbedienung

Abbildung 28 veranschaulicht den an den Demontage-Demonstrator adaptierten Prozess zur zerstörenden Demontage von gewöhnlichen Fernbedienungen.

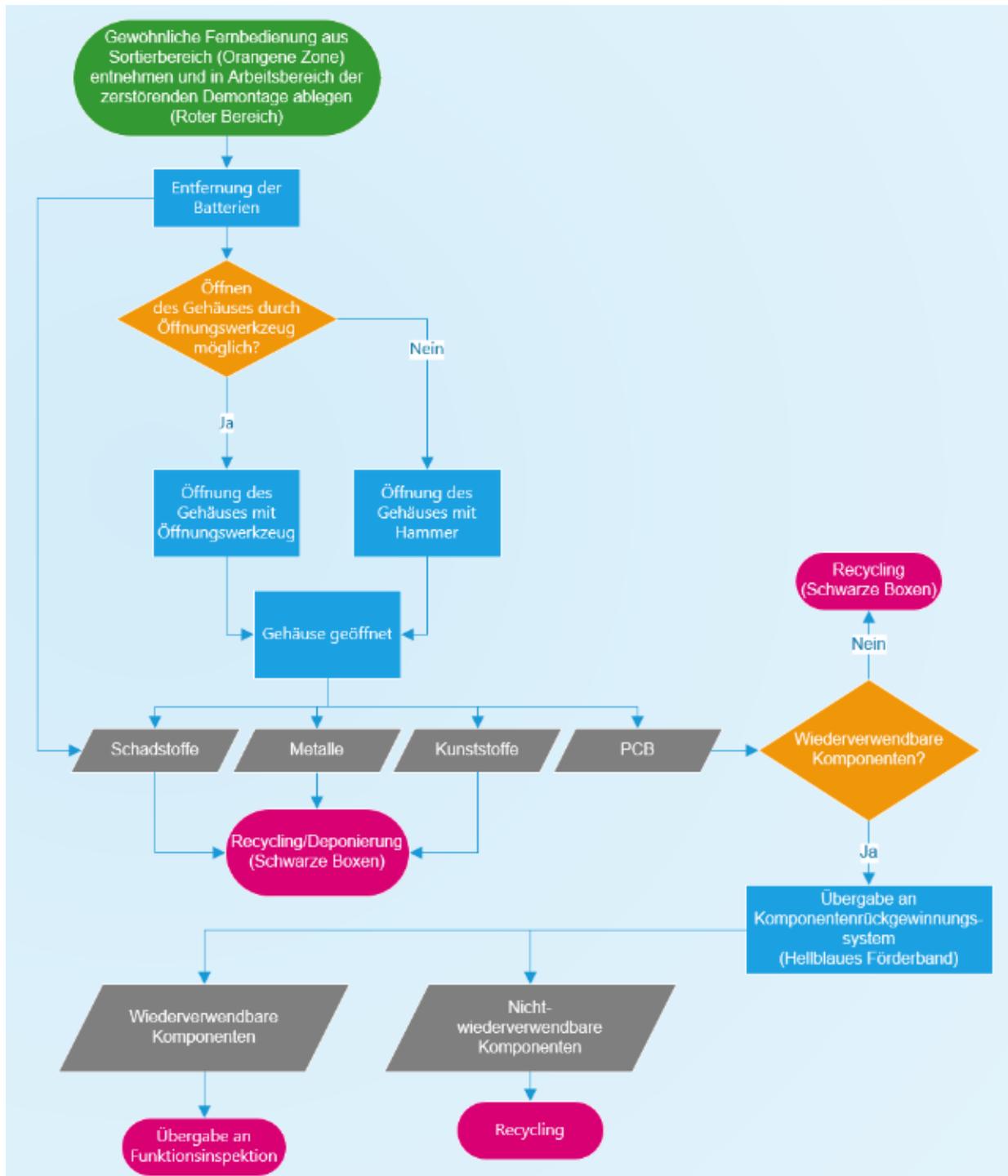


Abbildung 28: Flussdiagramm zur zerstörenden Demontage des Demontage-Demonstrators

5.1.3 Komponentenrückgewinnungssystem

Abbildung 29 veranschaulicht ein automatisches Rückgewinnungssystem für die Rückgewinnung elektronischer Komponenten von PCBs in vereinfachter Form. Das Rückgewinnungssystem umfasst ein Lötbad, in dem die Platinen auf eine Temperatur

erhitzt werden, bei der sich die Lötverbindungen lösen, ohne dass die elektronischen Komponenten beschädigt werden. Daraufhin erfolgt die Trennung der Komponenten von der PCB durch mechanische Kraftaufbringung. Im Anschluss an die Rückgewinnung der elektronischen Komponenten erfolgt eine Sortierung und Prüfung der Komponenten in der Funktionsinspektion, um eine Wiederverwendung für das Remanufacturing zu gewährleisten.

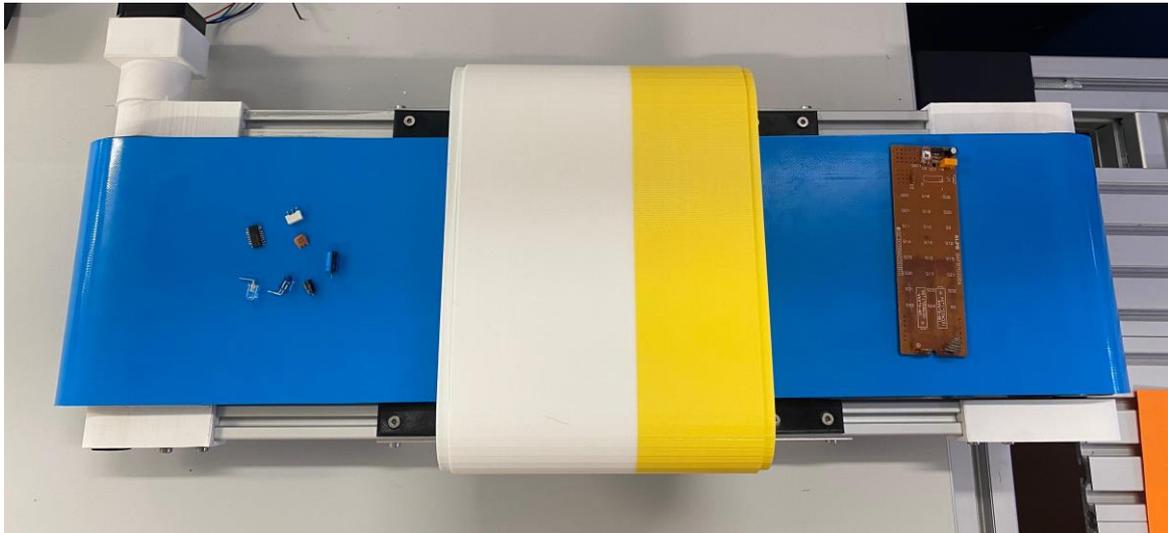


Abbildung 29: Komponentenrückgewinnungssystem

5.1.4 Zerstörungsfreier Demontage-Arbeitsbereich

Die Demontage hochwertiger Fernbedienungen erfolgt am Arbeitsbereich zur zerstörungsfreien Demontage in der grünen Zone (siehe Abbildung 30).



Abbildung 30: Arbeitsbereich zur zerstörungsfreien Demontage

Das Ziel der zerstörungsfreien Demontage hochwertiger Fernbedienungen besteht in der Rückgewinnung funktionstüchtiger gesamter PCBs, sodass diese für das Remanufacturing des gleichen Typs Fernbedienung wiederverwendet werden können. Zur zerstörungsfreien Öffnung der hochwertigen Fernbedienung werden die Montageschritte in umgekehrter Reihenfolge durchgeführt. Im Beispiel der Wii-Fernbedienung bedeutet dies, die Öffnung des Batteriefachs und das anschließende Aufdrehen der Schraubverbindungen mit Hilfe eines Schraubendrehers. Daraufhin werden die Gehäusehälften mit einem Öffnungswerkzeug vorsichtig voneinander

getrennt. Weitere funktionstüchtige wiederwendbare Bauteile und Komponenten, wie beispielsweise Silikonschaltmatten, Knöpfe und nicht verlötete Lautsprecher werden in den grauen Boxen am unteren rechten Bildrand gesammelt. Nicht wiederverwendbare Bauteile und Komponenten werden für das spätere Recycling in den schwarzen Boxen am linken unteren Bildrand gesammelt (siehe Abbildung 22). Abbildung 31 veranschaulicht den an den Demontage-Demonstrator adaptierten Prozess zur zerstörungsfreien Demontage von hochwertigen Fernbedienungen.

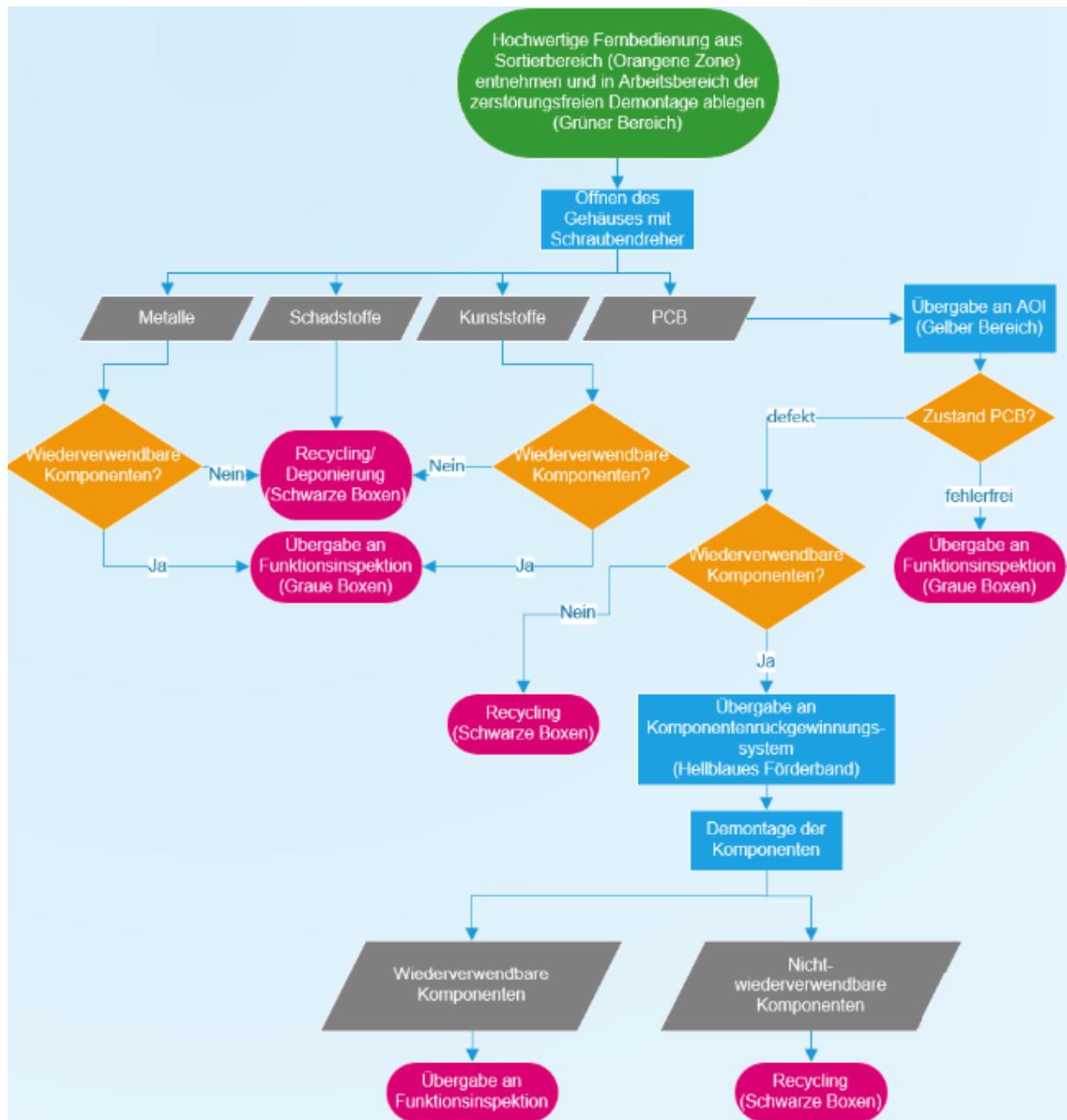


Abbildung 31: Flussdiagramm zur zerstörungsfreien Demontage des Demontage-Demonstrators

5.1.5 Automatische optische Inspektion

Die visuelle Inspektion der hochwertigen PCBs erfolgt mittels Template Matching in einem automatischen optischen Inspektor in der gelben Zone (siehe Abbildung 22). Template Matching ist eine digitale Bildverarbeitungstechnik, bei der Übereinstimmungen von Bildteilen mit einem sogenannten Template-Bild identifiziert werden (Brunelli, 2009). Ein automatischer optischer Inspektor (AOI) beschreibt ein Qualitätskontrollsystem, das mit Hilfe einer Kamera und Bildverarbeitungsverfahren Defekte auf z.B. PCBs automatisch erkennen kann (Taha et al., 2014). Der zur Entwicklung des Demontage-Demonstrators zur Verfügung gestellte AOI besteht aus einem 3D-gedruckten Gehäuse, in das eine Kamera und Beleuchtung integriert sind, und ist mit einem Computer verbunden. Die Benutzer:innenoberfläche wird auf einem Bildschirm dargestellt und lässt sich mit Hilfe einer Tastatur bedienen. Im Anschluss an die Demontage wird die hochwertige PCB in die oben liegende Öffnung des AOI eingelegt und durch den Bildverarbeitungsalgorithmus eines Programms analysiert. Dabei werden die elektronischen Komponenten der eingelegten PCB mit Hilfe von Template Matching mit einer fehlerfreien PCB abgeglichen. Wird eine elektronische Komponente erkannt, so wird diese gelb umrahmt dargestellt. Die automatische optische Inspektion (AOI) erfolgt in einer Weise, die eine übersichtliche Gestaltung der Inspektion für die Arbeiter:innen gewährleistet. Dazu überlagert der AOI das Bild der PCB mit einer schwarzen Maske, welche die angezeigten Bildinformationen auf das Nötigste reduziert. Abbildung 32 zeigt die Ausgabe der AOI bei optischer Unversehrtheit der PCB. In diesem Fall wird die PCB in eine graue Transportbox gelegt und zur Funktionsinspektion transportiert. Im Falle einer Bestätigung der vollen Funktionsfähigkeit der PCB erfolgt eine Verwendung der PCB für das Remanufacturing des gleichen Typs Fernbedienung.

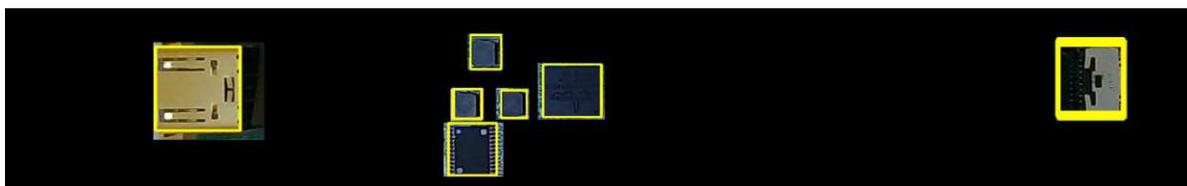


Abbildung 32: Automatische optische Inspektion: Fehlerfreie PCB

Sofern elektronische Komponenten der PCB fehlen oder durch starke Abnutzung für den AOI unkenntlich sind, werden Felder der Maske nicht umrahmt. Abbildung 33 zeigt, dass die Komponente im zweiten Feld von rechts nicht identifiziert werden kann, da die elektronische Komponente nicht vorhanden ist. Eine Reparatur defekter PCBs ist aus wirtschaftlichen Gründen nicht rentabel. Defekte PCBs werden daher zum Komponentenrückgewinnungssystem transportiert. Dort werden die wiederverwendbaren elektronischen Komponenten von der PCB getrennt.

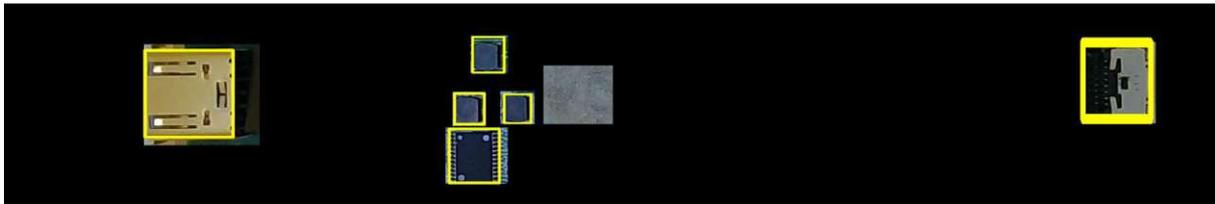


Abbildung 33: Automatische optische Inspektion: Fehlerbehaftete PCB

5.2 Evaluierung des Demontage-Demonstrators

In diesem Unterkapitel erfolgt die Evaluierung des praktisch umgesetzten Demontage-Demonstrators. Zunächst wird die Methode der qualitativen semi-strukturierten Interviews vorgestellt und die Durchführung der Expert:innen-Interviews im Zuge dieser Diplomarbeit geplant. Anschließend erfolgt eine Analyse und Diskussion der erhobenen qualitativen Daten.

5.2.1 Methode & Planung der Evaluierung

Methode der Evaluierung

Qualitative Forschungsmethoden werden im Rahmen der Untersuchung neuer Forschungsfelder und Artefakte sowie der Identifizierung und Erfassung bedeutsamer Themen eingesetzt. Dabei bedient sich die qualitative Forschung einer Vielzahl von Methoden, um ein vertiefendes und umfassendes Verständnis von Sachverhalten durch Textinterpretation zu erlangen. Eine gängige Methode zur Erhebung qualitativer Daten ist das qualitative Interview (Jamshed, 2014). Qualitative Interviews lassen sich in drei Hauptkategorien untergliedern (Seaman, 1999):

- Bei strukturierten Interviews erfolgen die Antworten der befragten Person auf im Vorfeld festgelegte Fragen. Das strukturierte Interview verfolgt spezifische Ziele hinsichtlich der Art der Information, die im Rahmen des Interviews erlangt werden soll. Dies impliziert, dass die Fragen in einer relativ spezifischen Form formuliert werden (Seaman, 1999).
- Unstrukturierte Interviews sind offener gestaltet. Das Ziel eines unstrukturierten Interviews besteht in der Erlangung einer möglichst großen Menge an Informationen zu einem breit definierten Thema. Da die Form und der Inhalt der Informationen im Vorfeld nicht bekannt sind, müssen die Fragen so offen wie möglich formuliert werden (Seaman, 1999).
- Semistrukturierte Interviews umfassen eine Mischung aus offenen und spezifischen Fragen, die nicht nur erwartbare Antworten, sondern auch unerwartete Typen von Informationen hervorbringen sollen (Seaman, 1999). Zudem ermöglichen sie der interviewenden Person auf die Antworten der befragten Person einzugehen (Qu & Dumay, 2011).

Die Durchführung semistrukturierter qualitativer Interviews erfolgt in der Regel mit einzelnen Personen oder Gruppen. Grundlage hierfür ist ein im Vorfeld entwickelter semistrukturierter Interviewleitfaden. Der Leitfaden dient der systematischen und umfassenden Befragung der Befragten. Die Fragen des Interviewleitfadens umfassen sowohl die Kernfrage als auch assoziierte Fragen, die im Zusammenhang mit der Kernfrage stehen. Die Aufzeichnung des Interviews erlaubt eine Konzentration auf den Inhalt und die Durchführung des Interviews (Jamshed, 2014). Im Anschluss an die Erhebung der qualitativen Daten erfolgt eine inhaltliche Analyse (Seaman, 1999).

Planung der Evaluierung

Die Evaluierung des Demontage-Demonstrators erfolgt anhand qualitativer, semistrukturierter Expert:innen-Interviews. Im Rahmen der Evaluierung werden sieben Expert:innen aus der Forschung und Industrie interviewt. Tabelle 6 zeigt die zuvor angefertigten semistrukturierten Interviewleitfragen, welche als Grundlage des Interviews dienen.

I	Inwiefern beschäftigen Sie sich beruflich, wissenschaftlich oder projektbezogen mit der Demontage und/oder Wiederaufarbeitung (Remanufacturing) von Produkten und Komponenten, insbesondere aus der Kategorie Elektrokleingeräte?
II	Welche technischen Innovationen, Maßnahmen der Gesetzgeber:innen, wirtschaftlichen Anreize und organisatorischen Veränderungen sind aus Ihrer Sicht notwendig, um die Kreislaufwirtschaft zu unterstützen, damit Elektrokleingeräte und ihre Komponenten nachhaltig demontiert werden, so dass sie im Sinne des Remanufacturing wiederverwendet werden können?
III	Was für Feedback haben Sie zu den implementierten Ansätzen und Technologien des Demontage-Demonstrators? Welche Verbesserungspotenziale sehen Sie, um das System produktiver zu gestalten? Welche Weiterentwicklungsmöglichkeiten identifizieren Sie, damit ein solches Demontagesystem eingesetzt werden kann?
IV	Welche Vor- und Nachteile hat das Demontagesystem gegenüber einem rein manuellen nicht technologieunterstützten Arbeitsplatz?
V	Welche Ansätze und Technologien können verwendet werden und welche Adaptierungen braucht es, um andere Produktgruppen zu demontieren? Für welche anderen Produktgruppen aus dem Bereich der Elektrokleingeräte eignet sich ein solches Demontagesystem?

Tabelle 6: Interviewleitfragen

Ziel des Interviews ist die Evaluierung des Demontage-Demonstrators und die Beantwortung assoziierter Fragen. Die Interviews werden in Präsenz oder in Online-Meetings durchgeführt und aufgezeichnet, um sie einer späteren inhaltlichen Analyse zu unterziehen. Nach der Begrüßung der Expert:innen erfolgt eine Einführung in die Rahmenbedingungen des Interviews sowie das Einholen der Zustimmung zur Aufnahme und Analyse des Interviews. Im Anschluss wird die Motivation, die der Diplomarbeit sowie dem Demontage-Demonstrator zugrunde liegt, erläutert. Im Rahmen der Präsentation des Demontage-Demonstrators erfolgt die Vorführung eines

Videos, in welchem die implementierten Ansätze und Technologien vorgestellt werden. Im Anschluss werden die Expert:innen befragt. Das Interview wird mit einer Danksagung und Verabschiedung beendet. Die nachfolgende inhaltliche Analyse erfolgt gemäß der Methode der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2000), welche eine Strukturierung und Analyse der erhobenen Daten ermöglicht.

5.2.2 Analyse & Diskussion der Expert:innen-Interviews

Im Folgenden werden die erhobenen Interviewdaten analysiert. Dabei erfolgt eine Codierung der interviewten Personen „I#“, um eine Zuordnung der Antworten zu ermöglichen. Anschließend erfolgt eine kurze Diskussion der Analyse.

Analyse

Frage I: Inwiefern beschäftigen Sie sich beruflich, wissenschaftlich oder projektbezogen mit der Demontage und/oder Wiederaufarbeitung (Remanufacturing) von Produkten und Komponenten, insbesondere aus der Kategorie Elektrokleingeräte?

Drei der Expert:innen beschäftigen sich im universitären oder universitätsnahen Kontext mit Kreislaufwirtschaftsthemen, Remanufacturing und/oder der Demontage durch die Verfassung von wissenschaftlichen Arbeiten und der Teilnahme an Forschungsprojekten (I1, I2, I3). Die weiteren Befragten sind als Kreislaufwirtschaftsexpert:innen in der Unternehmensberatung, als Geschäftsführerin eines sozial geförderten Demontagezentrums und als Vorstandsmitglied eines Forums von Kreislaufwirtschaftsexpert:innen tätig (I4, I5, I6, I7).

Frage II: Welche technischen Innovationen, Maßnahmen der Gesetzgeber:innen, wirtschaftlichen Anreize und organisatorischen Veränderungen sind aus Ihrer Sicht notwendig, um die Kreislaufwirtschaft zu unterstützen, damit Elektrokleingeräte und ihre Komponenten nachhaltig demontiert werden, so dass sie im Sinne des Remanufacturing wiederverwendet werden können?

Die Kreislaufwirtschaft muss bei der Produktentwicklung mitgedacht werden, um zirkuläre Strategien in der Demontage und Wiederverwendung effizienter umsetzen zu können (I1, I3, I6). Dazu gehört das Entwickeln von Produktpässen, die Informationen zur Wiederverwendbarkeit enthalten (I3), die Teileharmonisierung und Modularität von Baugruppen (I1, I3, I6), die (Weiter-)Entwicklung von Normen und Standards (I3) sowie das demontagefreundliche Design (I1, I6). Die Gesetzgeber:innen sind gefordert, Unternehmen durch Regulative und Förderungen zur Kreislaufwirtschaft zu bewegen (I1, I2, I3, I5, I6, I7). Auf der Ebene der Regulative müssen Verordnungen geschaffen bzw. weiterentwickelt werden, die Unternehmen dazu bewegen, nachhaltige Kreislaufprozesse umzusetzen (I1, I2, I3). Zudem muss ein rechtlicher Gesetzrahmen geschaffen werden, der regelt, wer für die Produkte am Ende des Lebenszyklus und

deren Wiederverwendung verantwortlich ist (I2). Die Einführung eines Pfand- (I2, I3) oder Belohnungssystems (I6) für die korrekte Rückführung von WEEE durch Endverbraucher:innen, kann zu einer Erhöhung der Sammelquote beitragen. Eine weitere Maßnahme stellt die Erhebung von Strafzöllen für Unternehmen dar, die nicht wiederaufarbeitbare bzw. schlecht demontierbare Produkte herstellen (I6). Förderungen für Unternehmen (I3, I7), die kreislaufwirtschaftliche Prozesse und Projekte umsetzen sowie wirtschaftliche Anreize durch verringerte Steuersätze auf Sekundärmaterialien und -produkte sind notwendig (I3, I5). Der eingebettete Wert in WEEE hat großes ungenutztes Potential (I1), das nur genutzt werden wird, wenn die Demontage wirtschaftlich rentabel ist (I2, I4, I5, I7) und wiederaufgearbeitete Produkte günstiger hergestellt bzw. verkauft werden können (I7). Dazu braucht es die effiziente Verarbeitung großer Mengen von Altgeräten (I7) sowie die Reduktion der Kosten und Dauer der Demontage (I2, I4, I5). Gegenwärtig lassen sich lineare Prozesse deutlich schneller durchführen, während kreislaufwirtschaftliche Prozesse mehr Zeit benötigen und mit hohen Implementierungskosten verbunden sind (I2, I4, I5). Die (Semi-)Automatisierung von kreislaufwirtschaftlichen Demontageprozessen kann durch die Implementierung innovativer Technologien, wie beispielsweise Cobots und digitale Systeme, unterstützt werden. Dies führt zu einer Reduktion der Demontagedauer und -kosten (I1, I2, I5).

Frage III: Was für Feedback haben Sie zu den implementierten Ansätzen und Technologien des Demontage-Demonstrators? Welche Verbesserungspotenziale sehen Sie, um das System produktiver zu gestalten? Welche Weiterentwicklungsmöglichkeiten identifizieren Sie, damit ein solches Demontagesystem eingesetzt werden kann?

Der Demontage-Demonstrator wurde als innovativ und spannend wahrgenommen (I1, I2, I5, I6) und stellt ein hilfreiches System zur Vorbereitung auf die Wiederverwendung von Komponenten dar (I3). Die automatisierte Erkennung und Sortierung von Fernbedienungen in die entsprechenden Kategorien ist adäquat umgesetzt und ermöglicht die Identifizierung wiederverwendbarer Geräte und Komponenten (I1, I2, I4). Positiv erwähnte Aspekte sind die Wiederverwendbarkeit der Platine bei zerstörungsfreier Demontage (I6), die potenzielle Skalierbarkeit durch die Implementierung weiterer Roboter (I2) sowie ein erhöhter Durchsatz, der durch die Verringerung der Demontagezeit und Erhöhung der Produktivität erreicht wird (I2, I3, I5). Als Verbesserungspotenziale wurden die Beschleunigung des Selektionsprozesses (I5) sowie die Implementierung eines vorgereichten Funktionstests für hochwertige Fernbedienungen genannt (I7). Vollständig funktionsfähige Geräte sollen nicht demontiert, sondern für den Reuse weiterverwendet werden (I7). Potenzielle Weiterentwicklungsmöglichkeiten wurden in der Automatisierung der Interlogistik zwischen Stationen (I2) und Zerlegung der Fernbedienungen identifiziert (I1, I7). Ein Experte (I6) erwähnte, dass aufgrund des

geringen Komponentenwerts nur eine vollautomatisierte Demontage von gewöhnlichen Fernbedienungen wirtschaftlich ist. Die Integration von IoT, Datenbanken und intelligenten digitalen Systemen ermöglicht zudem die Sammlung von Daten und Informationen aus der Demontage (I2). Expertin (I4) erläuterte, dass aufgrund der nicht produktgruppenspezifischen Sammlung von Elektrokleingeräten, ein flexibleres Selektionssystem hilfreich wäre, das alle Elektrokleingerät-Produktgruppen identifizieren und sortieren kann. Dies erfordert laut Experte I1 eine Vielzahl an Produktdaten und -informationen. Als nächste Schritte wurden ein Pilottest des Demonstrators in einer Demontageanlage sowie weiterführende Diplomarbeiten und Projekte angeführt (I2). Die Weiterentwicklung des Demontage-Demonstrator veranschaulicht Unternehmen wie nachhaltige Demontagesysteme gestaltet werden können (I5).

Frage IV: Welche Vor- und Nachteile hat das Demontagesystem gegenüber einem rein manuellen nicht technologieunterstützten Arbeitsplatz?

Der höhere Automatisierungsgrad des entwickelten Demontagesystems ermöglicht eine schnellere Demontage (I2, I5), was Kosten (I2, I3) und Zeit (I2, I6) spart. Dies führt zu effizienteren und wirtschaftlicheren Demontageprozessen (I3, I7), wodurch sie für Industriekund:innen attraktiv werden (I3). Der automatisierte Selektionsprozess und der semiautomatisierte Inspektionsprozess reduzieren monotone Arbeitsschritte (I5), den menschlichen Arbeitsaufwand und ermöglichen den Einsatz von weniger geschultem Personal (I4, I7). Zudem werden gesundheitliche Vorteile erzielt, da der Kontakt mit Schadstoffen verringert und der unergonomische Selektionsprozess eliminiert werden (I2). Zusätzlich bewirkt die Automatisierung eine erhöhte Objektivität in der Entscheidungsfindung (I3) und senkt die Fehlerquote der Selektion und Inspektion (I1, I3, I4). Die Technologien müssen ausreichend getestet werden, um ihre Implementierung zu gewährleisten (I2, I7). Ein Nachteil ist die Klassifizierung für neue Produkte, da diese erst im System hinterlegt werden müssen (I4).

Frage V: Welche Ansätze und Technologien können verwendet werden und welche Adaptierungen braucht es, um andere Produktgruppen zu demontieren? Für welche anderen Produktgruppen aus dem Bereich der Elektrokleingeräte eignet sich ein solches Demontagesystem?

Die Entwicklung eines universell einsetzbaren Remanufacturing-Demontagesystems zur Rückgewinnung wertvoller Komponenten aus Elektrokleingeräten jeglicher Produktgruppe wird von Experte I1 als erstrebenswert erachtet. Dies erfordert das Lokalisieren und Lösen verschiedener Verbindungselemente wie Schnappverbindungen, Schrauben, Verklebungen und Verschweißungen, ohne die für die Wiederaufarbeitung bestimmten Komponenten zu beschädigen. Zerstörende Demontagesysteme, die Verbindungselemente lokalisieren und ausschneiden, beschädigen je nach Produkt wertvolle Komponenten. Systeme wie Apples Daisy-

Roboter, die vollautomatisch, zerstörungsfrei demontieren, sind nur zur Demontage eines spezifischen Produkts (iPhones) geeignet. Die Gestaltung eines flexiblen Systems, das die wertvollen Komponenten jedes Elektrokleingeräts zerstörungsfrei demontieren kann, stellt daher eine Herausforderung dar (**I1**). Expert:innen **I4** und **I6** befürworten die Adaptierung des Demontagesystems für spezifische Produktgruppen, um die Demontageeffizienz zu steigern (**I6**). Bei dem von Expertin **I4** beschriebenen Demontagesystem erfolgt die Selektion der Elektrokleingeräte zu den adaptierten Demontage-Arbeitsbereichen durch kameragestützte Roboter, die die Elektrokleingeräte verschiedener Produktgruppen von einem Förderband zu den entsprechenden Arbeitsbereichen sortiert (**I4**). Vor der Gestaltung der adaptierten Demontage-Arbeitsbereiche wird ermittelt bei welchen Produktgruppen die Rückgewinnung von Komponenten wirtschaftlich ist (**I1, I2, I3**). Als potenziell lohnenswerte Produktgruppen wurden Laptops (**I2, I6**), Beamer (**I2**) sowie elektrische Zahnbürsten (**I7**) und Rasierer (**I1, I7**), bei denen die Rückgewinnung der PCB erfolgt, genannt. Nach Experte **I3** ist die Demontage zur Komponentenrückgewinnung nur bei wenigen, hochpreisigen Produkten wirtschaftlich realisierbar.

Diskussion

Im Folgenden ergänzt die Diskussion die Analyse der Expert:innen-Interviews:

Die Analyse von **Frage III & IV** diente der Evaluierung des Demontage-Demonstrators gemäß Subforschungsfrage **S2**. Die praktische Umsetzung basiert auf Technologien und Ansätzen, die im Rahmen von Kapitel 3 identifiziert und im anschließenden Kapitel 4 anhand ihrer Eignung zur Gestaltung eines Demontagesystems theoretisch diskutiert wurden. Die Analyse der Expert:innen-Interviews zu **Frage IV** belegt, dass die praktische Umsetzung des theoretischen Wissens erfolgreich war. Die implementierten Technologien und Ansätze sowie die damit einhergehende Erhöhung des Automatisierungsgrads ermöglichen eine „schnellere Demontage, was Kosten und Zeit spart“, führen zu „effizienten und wirtschaftlicheren Demontageprozessen“ und reduzieren „menschlichen Arbeitsaufwand“. Die in Kapitel 1.3 vorgestellte DSR-Methodik nach Peffers (2007) beschreibt in „Aktivität 5: Evaluierung“, dass nach der Beobachtung und Messung festgestellt wird, ob und inwiefern das Artefakt zur Lösung des Problems beiträgt. In der Folge kann entschieden werden, ob die Lösung als zufriedenstellend ist oder ob zu „Aktivität 3: Design und Entwicklung“ zurückgesprungen werden muss, um die DSR-Methodik iterativ fortzusetzen (Peffers et al., 2007). Die oben angeführten Bewertungen der Expert:innen erfüllen die von Li et al. (2020) geforderte Reduktion des manuellen menschlichen Arbeitsaufwands durch die Automatisierung von Demontageprozessen, wodurch eine wirtschaftlichere Gestaltung des Remanufacturing ermöglicht wird. Daher kann die Lösung bereits als zufriedenstellend bezeichnet werden. Die unter **Frage III** genannten Verbesserungspotenziale und Weiterentwicklungsmöglichkeiten können vorgemerkt

und für die iterative Weiterentwicklung des Demontage-Demonstrators verwendet werden, falls die Anforderungen an die Lösung zu einem späteren Zeitpunkt steigen.

Subforschungsfrage **S3** wurde als **Frage V** in die Leitfragen des Expert:innen-Interviews aufgenommen. Die Beantwortung der Subforschungsfrage **S3** erfolgt anhand der bereits durchgeführten Analyse von **Frage V** sowie der nachfolgenden Diskussion. Im Rahmen der ersten Teilfrage soll zunächst eruiert werden, welche Ansätze und Technologien des entwickelten Demontagesystems für die Demontage anderer Produktgruppen aus dem Bereich der Elektrokleingeräte geeignet sind und welche Adaptierungen erforderlich sind. In der zweiten Teilfrage soll eruiert werden, welche Produktgruppen sich für die Demontage am entwickelten Demontagesystem eignen. Die Analyse der ersten Teilfrage von **Frage V** zeigt, dass die Expert:innen in dieser Frage geteilter Meinung sind. Ein Teil der Expert:innen (**I1**) befürwortet die Entwicklung eines universell einsetzbaren Remanufacturing-Demontagesystems, welches die zerstörungsfreie Rückgewinnung wertvoller Komponenten aus Elektrokleingeräten jeglicher Produktgruppen ermöglichen soll. Der Vorteil des universell einsetzbaren Demontagesystems liegt in der flexiblen Demontierbarkeit aller Elektrokleingeräte an einem Demontage-Arbeitsbereich (**I1**). Bei dieser Art der Umsetzung entfällt die Notwendigkeit der Sortierung der Produkte in ihre Produktgruppen, da das universell einsetzbare Demontagesystem jedes Produkt demontieren können soll. Ein weiterer Teil der Expert:innen (**I4, I6**) präferiert die Adaptierung des Demontagesystems anhand spezifischer Produktgruppen. Der Vorteil der Adaptierung des Demontagesystems besteht in der Spezialisierung des Demontagebereichs, wodurch eine Steigerung der Demontageeffizienz erwartet wird (**I6**). Gemäß Li et al. stellen die Steigerung der Automatisierung und die Verringerung des menschlichen Arbeitsaufwands die maßgeblichsten Faktoren dar, um das Remanufacturing wirtschaftlicher zu gestalten (2020). Die in Kapitel 3.3 durchgeführte systematische Literaturrecherche führt zu einer Reihe von Literaturquellen, die eine Sortierung der Ergebnisse nach Produktgruppen sinnvoll begründen. Simon et al. (2018) entwickelten beispielsweise ein semi-automatisches HDD-Demontagesystem, bei dem die Schraubverbindungen der Produktgruppe Festplatten aufgebohrt werden. Die von Charles et al. (2020) evaluierte Cryocracking-Methode stellt eine vielversprechende Alternative zur zerstörenden Demontage von Gehäusen dar, ist jedoch lediglich für Plastikgehäuse anwendbar. Das von Barletta et al. (2015) beschriebene intelligente Sortiersystem selektiert Gefahrenstoffe aus und ist zudem in der Lage, die übrigen Produkte in ihre jeweiligen Produktgruppen zu sortieren. Die interviewten Expert:innen identifizierten Laptops (**I2, I6**), Beamer (**I2**), elektrische Zahnbürsten (**I7**) und Rasierer (**I1, I7**) als geeignete Produkte für die Rückgewinnung von Komponenten. Aufgrund der inhomogenen Verteilung der Produktgruppen wäre die Implementierung automatisierter Demontagetechnologien an einem universell einsetzbaren Demontagesystem mit Schwierigkeiten verbunden. In Bezug auf den entwickelten Demontage-Demonstrator ist zu berücksichtigen, dass der Cobot sowohl

in der Lage sein müsste, einen Beamer als auch einen Rasierer zu greifen. Darüber hinaus wäre ein universell einsetzbares Demontagesystem mit einer Vielzahl an Spezialwerkzeugen für die Demontage unterschiedlicher Produktgruppen auszustatten. Das Demontage- und Recyclingzentrum (DRZ) basiert auf der Sortierung von Produkten in Produktgruppen. Die teilweise Zusammenlegung von Produktgruppen erfolgt dabei, um die Anzahl der Demontagebereiche zu limitieren. In Konsequenz der dargelegten Argumente erfolgt die Adaptierung des Demontagesystems anhand spezifischer Demontagebereiche. In Anlehnung an das DRZ werden ähnliche Produktgruppen zu größeren Einheiten zusammengefasst. Wie von Expertin **I4** skizziert, besteht das Demontagesystem aus mehreren adaptierten Demontagebereichen, die durch ein KI-gesteuertes, kameragestütztes Robotersortiersystem und intelligente Förderbandsysteme mit Produkten versorgt werden. Die einzelnen Demontagebereiche wurden anhand der in der SLR (Kapitel 3) ermittelten Ansätze und Technologien an die zu demontierenden Produktgruppen angepasst. Adaptierungen können beispielsweise unterschiedliche Cobot-Greifer zur Handlung der Produkte, Spezialwerkzeuge sowie automatische Demontagesysteme umfassen. Auch die automatische Inspektion der Platinen muss an die verschiedenen Gerätemaße angepasst werden bzw. ermittelt werden, ob es überhaupt Produkte innerhalb der Produktgruppe gibt, die eine Wiederverwendung der Platine ökonomisch machen. Des Weiteren muss das intelligente Sortiersystem Zugriff auf Informationen und Produktdaten der verschiedenen Produktgruppen haben, um automatisch entscheiden zu können, welche R-Strategie angewandt werden soll. Die Adaptierung des Demontagebereichs ermöglicht die Demontage eines breiten Spektrums an Elektrokleingeräten und deren Komponenten für die Wiederverwendung im Sinne des Remanufacturing, sofern dies ökonomisch vertretbar ist.

Antworten der Expert:innen zu **Frage II** werden in Unterkapitel 6.2 „Limitationen und Ausblick“ aufgegriffen.

6 Diskussion und Ausblick

Im ersten Abschnitt dieses letzten Kapitels erfolgt zunächst eine kurze Zusammenfassung der Ausgangssituation sowie die Auflistung der Hauptforschungsfrage **H1** sowie der Subforschungsfragen **S1–S3** aus Kapitel 1.2. In weiterer Folge werden die Ergebnisse der Diplomarbeit diskutiert.

Im zweiten Abschnitt erfolgt die Präsentation und Diskussion der Limitationen der Arbeit. Im Anschluss erfolgt ein Ausblick über die Weiterentwicklung des Demontagedemonstrators und des Remanufacturing.

6.1 Diskussion der Ergebnisse

Die steigende Menge an Elektro- und Elektronikaltgeräten geht mit negativen Konsequenzen für Mensch und Umwelt einher. Zudem werden ökonomische Potentiale, die durch den eingebetteten Wert in Produkten und ihren Komponenten vorhanden sind, unzureichend genutzt. Das derzeit vorherrschende lineare Wirtschaftsmodell trägt maßgeblich zu dieser Problematik bei, da Produkte am Ende ihres Lebenszyklus als Müll betrachtet werden. Eine nachhaltigere Alternative stellt die Kreislaufwirtschaft und ihre zugrundeliegenden Kreislaufwirtschaftsstrategien dar. Im Rahmen dieser Strategien sollen Produkte, Komponenten und Materialien in ihrer höchstmöglichen Wertigkeit erhalten und wiederverwendet werden. Remanufacturing ist eine der Kreislaufwirtschaftsstrategien und zielt auf die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und ihrer Komponenten ab. Für das Remanufacturing müssen die Elektro- und Elektronikaltgeräten demontiert werden. Die Demontage erfolgt gegenwärtig in den meisten Fällen manuell, da automatisierte Demontagesysteme aufgrund der Produkt- und Zustandsvielfalt nur schwer umzusetzen sind. Eine Reduktion der menschlichen Arbeit und die Automatisierung der Demontage sind erforderlich, um das Remanufacturing effizienter und wirtschaftlicher zu gestalten.

Demzufolge war das Ziel der vorliegenden Arbeit die Beantwortung der Hauptforschungsfrage **H1**:

H1 Wie muss ein produktives Arbeitssystem für die Demontage von Elektrokleingeräten aufgebaut werden, damit dieser im Bereich des Remanufacturing eingesetzt werden kann?

Zur Beantwortung der Hauptforschungsfrage **H1** wurden die Subforschungsfragen **S1-S3** herangezogen:

- S1** Welche Ansätze und Technologien für die Demontage von Elektro- und Elektronikschrott im Bereich des Remanufacturing von Elektrokleingeräten gibt es bereits?
- S2** Wie kann ein produktives Demontagesystem für das Remanufacturing von Fernbedienungen gestaltet werden?
- S3** Welche Ansätze und Technologien können verwendet werden und welche Adaptierungen braucht es, um andere Produktgruppen aus dem Bereich der Elektrokleingeräte zu demontieren? Für welche anderen Produktgruppen aus dem Bereich der Elektrokleingeräte eignet sich ein solches Arbeitssystem?

Zur Beantwortung der Subforschungsfrage **S1** wurde eine systematische Literaturrecherche nach der Methode von Tranfield (2003) durchgeführt (Kapitel 3). Hierzu wurden geeignete Schlüsselwörter durch Boolesche Operatoren verknüpft, adäquate Ein- und Ausschlusskriterien bestimmt, ein umfangreiches Screening durchgeführt und Backward Reference Searching angewandt (Kapitel 3.1). Im Rahmen der systematischen Literaturrecherche konnten somit 21 relevante Literaturquellen identifiziert werden, die Ansätze und Technologien für die Demontage von Elektrokleingeräten im Sinne des Remanufacturing beschreiben. Die relevanten Literaturquellen wurden einer deskriptiven (Kapitel 3.2) und thematischen Analyse (Kapitel 3.3) unterzogen und die Ergebnisse dokumentiert. In einem ersten Schritt wurden die 21 Literaturquellen individuell zusammengefasst und daraufhin anhand ihres thematischen Schwerpunkts in die folgenden Kategorien K1-K5 gruppiert: K1 Rückgewinnung von PCB-Komponenten, K2 Intelligente Demontageanlagen, K3 Cobots & Robots, K4 Zerstörende und zerstörungsfreie Demontage, K5 Remanufacturing- und Demontageprozesse (Kapitel 3.3). Anschließend wurden die Erkenntnisse aller Literaturquellen zusammengefasst und dokumentiert (Kapitel 3.4). Dabei wurden die gesammelten Erkenntnisse und Vorgehensweise in Ansätze und Technologien kategorisiert, um eine Differenzierung zwischen Methoden und theoretischen Ansätzen sowie konkreten Implementierungen zu ermöglichen (Kapitel 3.4). Zu den identifizierten Technologien zählen beispielsweise automatische Lötbäder zur Rückgewinnung von PCB-Komponenten, Cryocracking zum Aufbrechen von Gehäusen, Cloudbasierte Decision Support Systeme zur Entscheidungsfindung der anzuwendenden Kreislaufstrategie, automatische Sortiersysteme, intelligente Demontageanlagen, Cobots zur Sortierung oder Demontage, KI-gesteuerte Identifikations- und Inspektionssysteme und automatische Schraubenerkennungs- und Aufbohrsysteme. Zu den identifizierten Ansätzen zählen beispielsweise die zerstörungsfreie, zerstörende und selektive Demontage, die Wiederverwendung von

Komponenten, der Bedarf der Automatisierung der Demontage und die Strategien zur Umsetzung der Technologien.

Die Beantwortung der Subforschungsfrage **S2** erfolgte zunächst anhand der theoretischen Demontage von Fernbedienungen (Kapitel 4). Hierzu wurde die Produktgruppe der Fernbedienungen vorgestellt und anhand der Wertigkeit der Komponenten in zwei Kategorien (hochwertig, gewöhnlich) untergliedert (Kapitel 4.1). Anschließend wurde der Demontage-Prozessfluss für Fernbedienungen modelliert und anhand von Flussdiagrammen der Subprozesse Selektion (Kapitel 4.2.1), Demontage gewöhnlicher Fernbedienungen (4.2.2) und Demontage hochwertiger Fernbedienungen dargestellt (4.2.3). Im Rahmen dessen wurden die in Subforschungsfrage **S1** identifizierten Ansätze und Technologien (Kapitel 3.3) hinsichtlich ihrer Eignung zur Gestaltung eines technologieunterstützten Demontagesystems zur Demontage von Fernbedienungen im Sinne des Remanufacturing analysiert und diskutiert (Kapitel 4.2). Die gewonnenen Erkenntnisse wurden dazu genutzt, die Theorie in die Praxis umzusetzen (Kapitel 5). Die praktische Umsetzung erfolgte in der Pilotfabrik der Technischen Universität Wien in Form eines Demontage-Demonstrators. Hierzu wurden die in Kapitel 4 modellierten Vorgehensweisen und Flussdiagramme sowie die als geeignet identifizierten Technologien und Ansätze angepasst, erweitert und implementiert, sodass ein funktionales und effizientes Demontagesystem geschaffen werden konnte (Kapitel 5.1). Dieses setzt sich aus den Bereichen Selektion (Kapitel 5.1.1), Zerstörer Demontage-Arbeitsbereich (Kapitel 5.1.2), Komponentenrückgewinnungssystem (Kapitel 5.1.3), Zerstörungsfreier Demontage-Arbeitsbereich (Kapitel 5.1.4) und Automatische Optische Inspektion (Kapitel 5.1.5) zusammen und beinhaltet unter anderen einen kameragestützten Cobot zur automatischen Selektion der Fernbedienungen, einen automatischen optischen Inspektor zur semiautomatischen Inspektion des Zustands hochwertiger Platinen und ein angedeutetes automatisches Entlötbad zur Rückgewinnung elektronischer Komponenten von der Platine, sowie verschiedenes Werkzeug und Boxen zur Materialaufsammlung. Anschließend erfolgte die Evaluierung des Demontage-Demonstrators anhand qualitativer, semistrukturierter Expert:innen-Interviews (Kapitel 5.2). Im Rahmen dessen wurden sieben Expert:innen aus der Forschung und Industrie interviewt. Die Analyse der Interviews erfolgte anhand der qualitativen inhaltlichen Analyse nach Mayring (2000) und wurde durch eine Diskussion ergänzt, wobei **Frage III & IV** für die Evaluierung des Demontage-Demonstrators herangezogen wurden (Kapitel 5.2.2). Im Rahmen dessen wurde der durch die Implementierung der Ansätze und Technologien erhöhte Automatisierungsgrad positiv hervorgehoben, der eine schnellere, effizientere und wirtschaftlichere Demontage ermögliche. In Konsequenz dessen konnte die von Li et al. (2020) geforderte Reduktion des menschlichen Arbeitsaufwands sowie die Erhöhung der Automatisierung realisiert werden. Des Weiteren wurden die Reduktion monotoner Arbeit, die geringere

Schadstoffbelastung durch die Automatisierung der Selektion sowie das Senken der Fehlerquote als positive Aspekte hervorgehoben. Ebenfalls wurden Verbesserungspotentiale und Weiterentwicklungsmöglichkeiten für den Demontage-Demonstrator aufgedeckt, die im folgenden Kapitel 6.2 aufgegriffen werden.

Subforschungsfrage **S3** wurde anhand von **Frage V** des qualitativen, semistrukturierten Expert:innen-Interviews beantwortet (Kapitel 5.2). Die Zielsetzung bestand in der Ermittlung der erforderlichen Adaptierungen, um andere Produktgruppen der Elektrokleingeräte im Sinne des Remanufacturing zu demontieren, sowie in der Identifizierung geeigneter zu demontierender Produktgruppen. Auch hier erfolgte die qualitative inhaltliche Analyse nach Mayring (2000) und wurde durch eine Diskussion ergänzt. Dafür wurden Erkenntnisse aus der systematischen Literaturrecherche aus Subforschungsfrage **S1** und die bei der Gestaltung des Demontage-Demonstrators gesammelten Erfahrungswerte aus Subforschungsfrage **S2** in die Diskussion der Evaluierung (Kapitel 5.2.2) eingearbeitet. Im Rahmen der Analyse und Diskussion zeigte sich, dass die Expert:innen geteilter Meinung waren, ob ein universell einsetzbares oder ein anhand der Produktgruppe adaptiertes Demontagesystem zielführender ist. Ersteres sei flexibler einzusetzen, zweiteres soll eine effizientere Demontage durch die Spezialisierung ermöglichen. Auf Basis der gesammelten Erkenntnisse und Erfahrungswerte aus der SLR, Implementierung sowie Besuch des Demontage- und Recyclingzentrums wurden für die spezifische Adaptierungen der Demontagebereiche für verschiedene Produktgruppen verargumentiert. Diese Adaptierungen müssen immer an das Anforderungsprofil der Produktgruppe angepasst werden. Dadurch kann ein breites Spektrum an Elektrokleingeräten demontiert werden, sofern dies ökonomisch vertretbar ist.

Damit konnte die Hauptforschungsfrage **H1** unter Zuhilfenahme der Subforschungsfragen **S1-S3** vollständig beantwortet werden. Die vorliegende Arbeit hat erfolgreich aufgezeigt, wie ein produktives Arbeitssystem für die Demontage von Elektrokleingeräten aufgebaut werden muss, damit dieses im Bereich des Remanufacturing eingesetzt werden kann.

6.2 Limitationen und Ausblick

Das in dieser Diplomarbeit entwickelte Demontagesystem stellt die erste Iteration zur Umsetzung des Demontage-Demonstrators in der Pilotfabrik der Technischen Universität Wien dar. Aufgrund dessen wurden nicht alle identifizierten Technologien und Ansätze getestet. Demzufolge weist der Demontage-Demonstrator noch großes Weiterentwicklungspotenzial auf und kann durch die iterative Vorgehensweise der DSR-Methodik weiter verbessert werden. Die erste Iteration zielte darauf ab, eine kostengünstige Umsetzung zu präsentieren, um die zugrundeliegende nachhaltige

Kreislaufstrategie Remanufacturing zu demonstrieren. Dadurch sollte im weiteren Verlauf eruiert werden, ob und wie der Demonstrator ausgebaut werden soll. Zudem wurde auf die Implementierung von potenziell gefährlichen Gerätschaften verzichtet, um arbeitssicherheitsrelevante Aspekte innerhalb der Pilotfabrik zu wahren. Die in Kapitel 4 vorgestellten Ansätze und Technologien wurden anhand der Demontage von Fernbedienungen theoretisch erörtert. Da die Demontage anderer Produktgruppen jedoch spezifische Anpassungen erfordert kann, ist eine erneute Überarbeitung der Ansätze und Technologien erforderlich. Hierzu zählt der Greifer des Cobots, dessen Öffnungsweite bei größeren Elektrokleingeräten nicht ausreichend wäre. Eine mögliche Lösung wäre die Verwendung eines Vakuumgreifers, sofern die Produktgruppe die Verwendung eines solchen zulässt. Außerdem müsste ein anderer Roboter verwendet werden, wenn die zu sortierenden Geräte zu schwer sind. Zudem ist zu berücksichtigen, dass der Bildverarbeitungsalgorithmus für andere Produktgruppen maschinell eingelernt werden muss. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass der automatische optische Inspektor ebenso an die Maße und Spezifikationen der Platine der jeweiligen Produktgruppe angepasst werden muss. Ferner kann nicht ausgeschlossen werden, dass für die Öffnung der Geräte unterschiedliches oder zusätzliches Werkzeug erforderlich ist. Auch die ausgearbeiteten Ansätze zur zerstörenden und zerstörungsfreien Demontage sowie die Kategorisierung in hochwertige und gewöhnliche Produkte erlauben keine allgemeingültige Übertragung auf alle Produktgruppen.

Die Testung und Implementierung weiterer Ansätze und Technologien könnte zu einer weiteren Steigerung der Produktivität des Demontage-Demonstrators führen. Zudem könnten durch die Analyse der Verbesserungsvorschläge und Weiterentwicklungspotenziale der Expert:innen weitere Fortschritte erzielt werden. In diesem Rahmen muss die Umsetzbarkeit geprüft und geplant werden, bevor der Demonstrator adaptiert werden kann. Unter den identifizierten Vorschlägen und Potentialen finden sich beispielsweise die Beschleunigung des Selektionsprozesses, die Erhöhung des Automatisierungsgrades der Interlogistik zwischen Stationen sowie die Automatisierung der eigentlichen Zerlegung. Die Demontage weiterer Produktgruppen verspricht zudem interessante neue Einblicke und ökonomische Potentiale.

Im Rahmen einer systematischen Literaturrecherche besteht die Möglichkeit, relevante Literaturquellen zu übersehen, da die Wahl der Ein- und Ausschlusskriterien sowie der Literaturdatenbank einen Einfluss auf die Ergebnisliste hat. Dadurch kann eine Erweiterung der Literaturquellen resultieren, die einen zusätzlichen Mehrwert für den Demontage-Demonstrator oder diese Diplomarbeit darstellen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass die Literaturquellen lediglich den Standpunkt der Forschung, nicht aber den der Industrie ausreichend widerspiegeln. Durch die geeignete Wahl und Verknüpfung von Schlüsselwörtern sowie den Einsatz adäquater Ein- und

Ausschlusskriterien sowie der Protokollierung und Dokumentation des Verfahrens wurde versucht, das Risiko möglichst gering zu halten. Des Weiteren wurde durch den Besuch eines Demontage- und Recyclingzentrums sowie die Einbindung von Expert:innen aus der Industrie in die qualitativen Interviews versucht, die industrielle Perspektive zu integrieren.

Der ökonomische Mehrwert, der durch die Demontage und Wiederverwendung von Fernbedienungen und ihrer Komponenten für das Remanufacturing entsteht, wurde bislang noch nicht berechnet. Die Berechnung des ökonomischen Mehrwerts kann Aufschluss über die gewinnbringendste Demontagetiefe geben.

Obgleich der Wert von Elektroaltgeräten und deren Komponenten steigt, werden Kreislaufstrategien zur Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und Komponenten noch nicht in ausreichendem Maße genutzt und umgesetzt. Diesbezüglich ist ein Umdenken zur Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit erforderlich. Durch die Einführung von Pfand- und Belohnungssystemen können die Sammelquoten erhöht werden und der Bevölkerung bewusst gemacht werden, welchen Wert Altgeräte noch besitzen. Des Weiteren ist ein Umdenken auf der Managementebene großer Unternehmen sowie die Verabschiedung geeigneter Gesetze und Regulative durch die Gesetzgeber erforderlich, die in der Wirtschaft als Chance und nicht als Bürde verstanden werden. Durch die Förderung von Kreislaufwirtschaftsprojekten und die Senkung der Steuern auf Produkte, Komponenten und Materialien aus dem Sekundärmarkt können zudem wirtschaftliche Anreize gesetzt werden, denn gegenwärtig sind lineare Prozesse immer noch schneller durchzuführen und kostengünstiger zu implementieren als nachhaltige kreislaufwirtschaftliche Prozesse. Zudem ist es erforderlich, Remanufacturing nicht als isolierte Demontagestrategie zu betrachten, sondern bereits bei der Produktentwicklung zu berücksichtigen. Zu den genannten Maßnahmen zählen beispielsweise die Teileharmonisierung und Modularität von Geräten und Bauteilen, welche die Reusability und Serviceability erhöhen und durch ein demontagefreundliches Design ergänzt werden. Unternehmen, die nicht demontagefreundlich produzieren, könnten mit Strafzöllen belegt werden. Weiters können durch das Entwickeln und Beifügen von Produktpässen Informationen zur Wiederverwendbarkeit von Produkten und Komponenten abgerufen werden. Die DIN SPEC 91472 identifiziert zudem die Bewältigung der folgende Herausforderungen, um die Vorteile des Remanufacturing voll nutzen zu können (2023):

- Strukturaufbau für geringe Stückzahlen
- Aufbau von Kompetenzen und Personalressourcen
- Aufbau eines effizienten Reverse-Logistiksystems
- Entwicklung und Umsetzung zirkularer Geschäftsmodelle

Die Zielsetzung dieser Arbeit bestand in der Untersuchung der Anforderungen, um produktive Demontagesysteme für das Remanufacturing von Elektrokleingeräten zu gestalten. Im Rahmen der Diplomarbeit wurden zahlreiche Aspekte identifiziert, die in direktem oder indirektem Zusammenhang mit dem Remanufacturing stehen. Dazu gehören sowohl theoretische Grundlagen als auch innovative Technologien und Ansätze zur Umsetzung von Remanufacturing-Prozessen sowie die interessanten Einblicke, Meinungen und Erfahrungen der Expert:innen. Das Remanufacturing von Elektroaltgeräten birgt ein beträchtliches Potenzial, das durch geeignete Maßnahmen erschlossen werden kann und muss. Für die Entkoppelung von Gewinnen und Rohstoffverbrauch sowie eine nachhaltigere und ressourcenschonendere Produktion, von der die Umwelt und Menschheit profitiert.

7 Literaturverzeichnis

- Abeykoon, C., McMillan, A., Dasanayaka, C. H., Huang, X., & Xu, P. (2021). Remanufacturing using end-of-life vehicles and electrical and electronic equipment polymer recyclates—A paradigm for assessing the value proposition. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4(4), 434–448. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2021.06.005>
- Alabi, O. A., Bakare, A. A., Xu, X., Li, B., Zhang, Y., & Huo, X. (2012). Comparative evaluation of environmental contamination and DNA damage induced by electronic-waste in Nigeria and China. *Science of The Total Environment*, 423, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.01.056>
- Alvarez-de-los-Mozos, E., & Renteria, A. (2017). Collaborative Robots in e-waste Management. *Procedia Manufacturing*, 11, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.133>
- Amoabeng Nti, A. A., Arko-Mensah, J., Botwe, P. K., Dwomoh, D., Kwarteng, L., Takyi, S. A., Acquah, A. A., Tettey, P., Basu, N., Batterman, S., Robins, T. G., & Fobil, J. N. (2020). Effect of Particulate Matter Exposure on Respiratory Health of e-Waste Workers at Agbogbloshie, Accra, Ghana. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(9), 3042. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093042>
- Arena, U., & Ardolino, F. (2022). Technical and environmental performances of alternative treatments for challenging plastics waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 183, 106379. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106379>
- Baldé, K., D'Angelo, E., Forti, V., Kuehr, R., & van den Brink, S. (2018). *Waste Mercury Perspective: 2010-2035 From global to regional*. United Nations University and United Nations Industrial Development Organization. <https://collections.unu.edu/view/UNU:6712>

- Baporikar, N. (Hrsg.). (2020). *Handbook of Research on Entrepreneurship Development and Opportunities in Circular Economy*: IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-5116-5>
- Barletta, I., Johansson, B., Reimers, J., Stahre, J., & Berlin, C. (2015). Prerequisites for a High-level Framework to Design Sustainable Plants in the E-waste Supply Chain. *Procedia CIRP*, 29, 633–638. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.037>
- BHM-Maschinen. (2024). *Hebelschere*. <https://www.bhm-maschinen.de/de/blechbearbeitung/hebelschere/>
- Bogue, R. (2019). Robots in recycling and disassembly. *Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application*, 46(4), 461–466. <https://doi.org/10.1108/IR-03-2019-0053>
- Brunelli, R. (2009). *Template Matching Techniques in Computer Vision: Theory and Practice* (1. Aufl.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470744055>
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. (2022). *Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft. Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie*.
- Charles, R. G., Douglas, P., Dowling, M., Liversage, G., & Davies, M. L. (2020). Towards Increased Recovery of Critical Raw Materials from WEEE– evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104923. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104923>
- Cheng, H., Xu, W., Ai, Q., Liu, Q., Zhou, Z., & Pham, D. T. (2017). Manufacturing Capability Assessment for Human-Robot Collaborative Disassembly Based on Multi-Data Fusion. *Procedia Manufacturing*, 10, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.008>

- Colledani, M., Copani, G., & Tolio, T. (2014). De-manufacturing Systems. *Procedia CIRP*, 17, 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.075>
- Cong, X., Xu, X., Xu, L., Li, M., Xu, C., Qin, Q., & Huo, X. (2018). Elevated biomarkers of sympatho-adrenomedullary activity linked to e-waste air pollutant exposure in preschool children. *Environment International*, 115, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.011>
- Davis, J., & Garb, Y. (2019). A strong spatial association between e-waste burn sites and childhood lymphoma in the West Bank, Palestine. *International Journal of Cancer*, 144(3), 470–475. <https://doi.org/10.1002/ijc.31902>
- De Jesus, A., Antunes, P., Santos, R., & Mendonça, S. (2018). Eco-innovation in the transition to a circular economy: An analytical literature review. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2999–3018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.111>
- Debnath, B., Roychowdhury, P., & Kundu, R. (2016). Electronic Components (EC) Reuse and Recycling – A New Approach towards WEEE Management. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 656–668. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.060>
- Decharat, S., & Kiddee, P. (2020). Health Problems Among Workers Who Recycle Electronic Waste in Southern Thailand. *Osong Public Health and Research Perspectives*, 11(1), 34–43. <https://doi.org/10.24171/j.phrp.2020.11.1.06>
- dict.cc. (2024a). *Disassemble* | Übersetzung Englisch-Deutsch. <https://www.dict.cc/?s=disassemble>
- dict.cc. (2024b). *Dismantle* | Übersetzung Englisch-Deutsch. <https://www.dict.cc/?s=dismantle>

- DIN SPEC 91472:2023-06, Remanufacturing (Reman)_- Qualitätsklassifizierung für zirkuläre Prozesse.* (2023). Beuth Verlag GmbH.
<https://doi.org/10.31030/3434252>
- Driljača, M. (2016, Mai 24). *The Transition From Linear to Circular Economy (Concept of Efficient Waste Management)*. <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Transition-From-Linear-to-Circular-Economy-of-Drilja%C4%8Da/38f5c9909754a03596e867fb7b938b764dfc7c72>
- EC. (2018). *Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste (Text with EEA relevance)* [WWW document]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.150.01.0109.01.ENG
- Edy Birchler (Regisseur). (2020, April 17). *Elektronikschrott Recycling bei der Immark AG*. <https://www.youtube.com/watch?v=qzFOBmUDykQ>
- Ellen MacArthur Foundation. (2012). *Towards the Circular Economy: An Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*.
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). *The butterfly diagram: Visualising the circular economy*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>
- Ellen MacArthur Foundation. (2022). *The technical cycle of the butterfly diagram*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/articles/the-technical-cycle-of-the-butterfly-diagram>
- Ellen MacArthur Foundation. (2024). *Circular Economy Introduction*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>

- Elo, K., & Sundin, E. (2014). Process Concepts for Semi-automatic Dismantling of LCD Televisions. *Procedia CIRP*, 23, 270–275. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.104>
- Elsevier. (2024). *ScienceDirect | Peer-reviewed literature | Elsevier*. [Www.Elsevier.Com. https://www.elsevier.com/products/sciencedirect](https://www.elsevier.com/products/sciencedirect)
- Europäisches Parlament. (2023). *Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile*. <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile>
- Fink, A. (2010). *Conducting research literature reviews: From the Internet to paper* (3rd ed). Sage.
- Foo, G., Kara, S., & Pagnucco, M. (2021). Screw detection for disassembly of electronic waste using reasoning and re-training of a deep learning model. *Procedia CIRP*, 98, 666–671. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.172>
- Footprint Data Foundation, York University Ecological Footprint Initiative, & Global Footprint Network. (2023). *National Footprint and Biocapacity Accounts, 2023 edition*. <https://www.footprintnetwork.org/licenses/public-data-package-free/>
- Fornasari, & Neri. (2022). A Model for the Transition to the Circular Economy: The “R” Framework. *SYMPHONYA.EMERGING ISSUES IN MANAGEMENT*, 78. <https://doi.org/10.4468/2022.1.08fornasari.neri>
- Fornasiero, R., Brondi, C., & Fragassi, F. (2016). Sustainable Networks for WEEE Treatment: A Case Study. *Procedia CIRP*, 41, 276–281. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.136>
- Forti, V., Baldé, C., & Kuehr, R. (2018). *E-Waste statistics Guidelines on classification, reporting and indicators*.
- Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *The Global E-waste Monitor 2020*.

- Gharfalkar, M., Court, R., Campbell, C., Ali, Z., & Hillier, G. (2015). Analysis of waste hierarchy in the European waste directive 2008/98/EC. *Waste Management*, 39, 305–313. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.007>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Grant, K., Goldizen, F. C., Sly, P. D., Brune, M.-N., Neira, M., Van Den Berg, M., & Norman, R. E. (2013). Health consequences of exposure to e-waste: A systematic review. *The Lancet Global Health*, 1(6), e350–e361. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(13\)70101-3](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(13)70101-3)
- Grenz-Farenholtz, B. (2013). *Systematische Literaturrecherche*. <https://docplayer.org/41971234-Systematische-literaturrecherche.html>
- Herat, S. (2008). Environmental impacts and use of brominated flame retardants in electrical and electronic equipment. *The Environmentalist*, 28(4), 348–357. <https://doi.org/10.1007/s10669-007-9144-2>
- Hevner, A., R, A., March, S., T, S., Park, Park, J., Ram, & Sudha. (2004). Design Science in Information Systems Research. *Management Information Systems Quarterly*, 28, 75.
- Huo, X., Wu, Y., Xu, L., Zeng, X., Qin, Q., & Xu, X. (2019). Maternal urinary metabolites of PAHs and its association with adverse birth outcomes in an intensive e-waste recycling area. *Environmental Pollution*, 245, 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.098>
- IFIXIT Jimmy Öffnungswerkzeug EU145259-1 | HORNBAACH AT. (2024). HORNBAACH. <https://www.hornbach.at/p/ifixit-jimmy-oeffnungswerkzeug-eu145259-1/10506062/>

- Jamshed, S. (2014). Qualitative research method-interviewing and observation. *Journal of Basic and Clinical Pharmacy*, 5(4), 87. <https://doi.org/10.4103/0976-0105.141942>
- Jose Luis Garcia del Castillo. (2024). *Machina-Bridge* [C#]. RobotExMachina. <https://github.com/RobotExMachina/Machina-Bridge> (Original work published 2018)
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Landrigan, P. J., & Goldman, L. R. (2011). Children's Vulnerability To Toxic Chemicals: A Challenge And Opportunity To Strengthen Health And Environmental Policy. *Health Affairs*, 30(5), 842–850. <https://doi.org/10.1377/hlthaff.2011.0151>
- Li, R., Ji, C., Liu, Q., Zhou, Z., Pham, D. T., Huang, J., Tan, Y., Qu, M., Wang, Y., Kerin, M., Jiang, K., & Su, S. (2020). Unfastening of Hexagonal Headed Screws by a Collaborative Robot. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 1–14. <https://doi.org/10.1109/TASE.2019.2958712>
- Liu, H., Hai, J., Li, L., & Yin, F. (2022). An efficient disassembly process generation method for large quantities of waste smartphones. *Procedia CIRP*, 105, 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.024>
- Lu, B., Li, B., Wang, L., Yang, J., Liu, J., & Wang, X. V. (2014). Reusability based on Life Cycle Sustainability Assessment: Case Study on WEEE. *Procedia CIRP*, 15, 473–478. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.046>

- Mangold, S., Steiner, C., Friedmann, M., & Fleischer, J. (2022). Vision-Based Screw Head Detection for Automated Disassembly for Remanufacturing. *Procedia CIRP*, 105, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.001>
- MatsumotoDr., M., & IjomahDr., W. (2013). Remanufacturing. In J. Kauffman & K.-M. Lee (Hrsg.), *Handbook of Sustainable Engineering* (S. 389–408). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8939-8_93
- Mayring, P. (2000). *Qualitative Inhaltsanalyse*.
- Padron, K. (2010). *Tips and Tricks for Backward and Forward Reference Searching*. https://libguides.fau.edu/ld.php?content_id=72734516
- Parsa, S., & Saadat, M. (2021). Human-robot collaboration disassembly planning for end-of-life product disassembly process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 71, 102170. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102170>
- Paul, J., Lim, W. M., O’Cass, A., Hao, A. W., & Bresciani, S. (2021). Scientific procedures and rationales for systematic literature reviews (SPAR-4-SLR). *International Journal of Consumer Studies*, 45(4). <https://doi.org/10.1111/ijcs.12695>
- Peffers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. *Journal of Management Information Systems*, 24(3), 45–77. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>
- Peiró, & Gabarrell i Durany. (2019). “DoSE database (i-depot:120009),” 2019.
- Peiró, L. T., Baiguera, F., Maci, A., Olivieri, M., Villa, P., Colledani, M., & Durany, X. G. I. (2021). Digitalization as an enabler of the Circular Economy of electronics. *Procedia Manufacturing*, 54, 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.010>

- Penev, K. D., & De Ron, A. J. (1996). Determination of a disassembly strategy. *International Journal of Production Research*, 34(2), 495–506.
<https://doi.org/10.1080/00207549608904915>
- Potting, J., Hekkert, M. P., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). *Circular Economy: Measuring innovation in the product chain*.
- Qu, S. Q., & Dumay, J. (2011). The qualitative research interview. *Qualitative Research in Accounting & Management*, 8(3), 238–264.
<https://doi.org/10.1108/11766091111162070>
- Recycling.com. (2019). *Original Waste Hierarchy of Ad Lansink*.
<https://www.recycling.com/downloads/waste-hierarchy-lansinks-ladder/>
- Sapmaz Veral, E. (2019). An Evaluation on the Circular Economy Model and the Loops Design in the Context of Waste Management. *European Journal of Science and Technology*, 18–27. <https://doi.org/10.31590/ejosat.479333>
- Sariatli, F. (2017). Linear Economy Versus Circular Economy: A Comparative and Analyzer Study for Optimization of Economy for Sustainability. *Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development*, 6(1), 31–34.
<https://doi.org/10.1515/vjbsd-2017-0005>
- Schluep, M. (2014). Waste Electrical and Electronic Equipment Management. In *Handbook of Recycling* (S. 397–403). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00025-8>
- Schlüter, M., Lickert, H., Schweitzer, K., Bilge, P., Briese, C., Dietrich, F., & Krüger, J. (2021). AI-enhanced Identification, Inspection and Sorting for Reverse Logistics in Remanufacturing. *Procedia CIRP*, 98, 300–305.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.107>

- Seaman, C. B. (1999). Qualitative methods in empirical studies of software engineering. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 25(4), 557–572. <https://doi.org/10.1109/32.799955>
- Seith, R., Arain, A. L., Nambunmee, K., Adar, S. D., & Neitzel, R. L. (2019). Self-Reported Health and Metal Body Burden in an Electronic Waste Recycling Community in Northeastern Thailand. *Journal of Occupational & Environmental Medicine*, 61(11), 905–909. <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000001697>
- Sharpe, R. G., Goodall, P. A., Neal, A. D., Conway, P. P., & West, A. A. (2018). Cyber-Physical Systems in the re-use, refurbishment and recycling of used Electrical and Electronic Equipment. *Journal of Cleaner Production*, 170, 351–361. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.087>
- Sihvonen, S., & Ritola, T. (2015). Conceptualizing ReX for Aggregating End-of-life Strategies in Product Development. *Procedia CIRP*, 29, 639–644. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.026>
- Simon, T. R., Cong, L., Zhai, Y., Zhu, Y., & Zhao, F. (2018). A Semi-automatic System for Efficient Recovery of Rare Earth Permanent Magnets from Hard Disk Drives. *Procedia CIRP*, 69, 916–920. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.024>
- Soetrisno, F. N., & Delgado-Saborit, J. M. (2020). Chronic exposure to heavy metals from informal e-waste recycling plants and children's attention, executive function and academic performance. *Science of The Total Environment*, 717, 137099. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137099>
- Stadt Wien: Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark. (2024). *Elektro-Altgeräte—Mülltrennung*. <https://www.wien.gv.at/umwelt/ma48/beratung/muelltrennung/elektroaltgeraete.html>

- Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435–438.
<https://doi.org/10.1038/531435a>
- Step Initiative. (2014). *One Global Definition of E-Waste*.
https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6120/step_one_global_definition_amended.pdf
- Taha, E. M., Emary, E., & Moustafa, K. (2014). *Automatic Optical Inspection for PCB Manufacturing: A Survey*. 5(7).
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Vom Brocke, J., Hevner, A. R., & Mädche, A. (Hrsg.). (2020). *Design science research. Cases*. Springer.
- Wang, H., Peng, Q., Zhang, J., & Gu, P. (2017). Selective Disassembly Planning for the End-of-life Product. *Procedia CIRP*, 60, 512–517.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.003>
- Wang, X. V., & Wang, L. (2015). WRCloud: A Novel WEEE Remanufacturing Cloud System. *Procedia CIRP*, 29, 786–791.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.011>
- Xiang, D., Pang, Z. F., Long, D. F., Mou, P., Yang, J. P., & Duan, G. H. (2013). The Disassembly Process and Apparatus of Waste Printed Circuit Board Assembly for Reusing the Components. *Applied Mechanics and Materials*, 457–458, 474–485. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.457-458.474>
- Xu, L., Huo, X., Liu, Y., Zhang, Y., Qin, Q., & Xu, X. (2020). Hearing loss risk and DNA methylation signatures in preschool children following lead and cadmium

- exposure from an electronic waste recycling area. *Chemosphere*, 246, 125829.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125829>
- Yan, J., & Feng, C. (2014). Sustainable design-oriented product modularity combined with 6R concept: A case study of rotor laboratory bench. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(1), 95–109. <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0597-3>
- Zeng, X., Zheng, L., Xie, H., Lu, B., Xia, K., Chao, K., Li, W., Yang, J., Lin, S., & Li, J. (2012). Current Status and Future Perspective of Waste Printed Circuit Boards Recycling. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 590–597.
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.081>
- Zhang, C., Hu, M., Di Maio, F., Sprecher, B., Yang, X., & Tukker, A. (2022). An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. *Science of The Total Environment*, 803, 149892. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149892>
- Zhang, H., Peeters, J., Demeester, E., Duflou, J. R., & Kellens, K. (2022). A CNN-Based Fast Picking Method for WEEE Recycling. *Procedia CIRP*, 106, 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.189>
- Zhang, Y., Xu, X., Chen, A., Davuljigari, C. B., Zheng, X., Kim, S. S., Dietrich, K. N., Ho, S.-M., Reponen, T., & Huo, X. (2018). Maternal urinary cadmium levels during pregnancy associated with risk of sex-dependent birth outcomes from an e-waste pollution site in China. *Reproductive Toxicology*, 75, 49–55.
<https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2017.11.003>
- Ziegler, O. (2013). Waste Electrical and Electronic Equipment. In O. Ziegler, *EU Regulatory Decision Making and the Role of the United States* (S. 93–141). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-00054-7_4

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Design Science Research Framework (Hevner et al., 2004)	5
Abbildung 2: Schmetterlingsdiagramm (Ellen MacArthur Foundation, 2019)	17
Abbildung 3: Vergleich zwischen Kreislaufwirtschaftsrahmenwerken (a) und EU- Abfallhierarchie (C. Zhang et al., 2022)	18
Abbildung 4: R-Rahmenwerk für die Kreislaufwirtschaft in Österreich (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2022).....	19
Abbildung 5: Generische Prozesskette eines Remanufacturing-Prozesses (DIN SPEC 91472, 2023)	22
Abbildung 6: Stufen des SPAR-4-SLR-Protokolls (vgl. Paul et al., 2021).....	27
Abbildung 7: Stufe 2 - Durchführung der Literaturrecherche	31
Abbildung 8: Weltweite Verteilung der Literaturquellen	31
Abbildung 9: Verallgemeinerter WEEE Remanufacturing Prozessfluss (X. V. Wang & Wang, 2015).....	40
Abbildung 10: Potenzieller Aufbau eines intelligenten Sortiersystems	42
Abbildung 11: Prozessfluss für die Selektion von Cores (Schlüter et al., 2021)	45
Abbildung 12: Aufbau des Greifsystems (H. Zhang et al., 2022).....	50
Abbildung 13: Greifvorgang	50
Abbildung 14: Automatisches Demontagesystem für Schrauben (Mangold et al., 2022)	51
Abbildung 15: Prototyp eines semi-automatischen HDD-Demontagesystems (Simon et al., 2018).....	52
Abbildung 16: Cryocracking eines Mobiltelefons	54
Abbildung 17: Entscheidungsbaum für die Behandlung von WEEE durch eine AATF	56
Abbildung 18: Legende der Diagrammelemente	63
Abbildung 19: Flussdiagramm zur Selektion.....	63
Abbildung 20: Flussdiagramm zur Demontage gewöhnlicher Fernbedienungen	65
Abbildung 21: Flussdiagramm zur Demontage hochwertiger Fernbedienungen	68
Abbildung 22: Aufbau des Demontage-Demonstrators	70
Abbildung 23: Hochwertige PCB (links) & Gewöhnliche PCB (rechts)	72
Abbildung 24: Roboter-Selektionssystem.....	72
Abbildung 25: Flussdiagramm zur Selektion des Demontage-Demonstrators.....	73
Abbildung 26: Öffnungswerkzeug (<i>IFIXIT Jimmy Öffnungswerkzeug EU145259-1 HORNBACH AT, 2024</i>)	73
Abbildung 27: Durch Hammer geöffnete Fernbedienung	74
Abbildung 28: Flussdiagramm zur zerstörenden Demontage des Demontage- Demonstrators	75
Abbildung 29: Komponentenrückgewinnungssystem	76

Abbildung 30: Arbeitsbereich zur zerstörungsfreien Demontage	76
Abbildung 31: Flussdiagramm zur zerstörungsfreien Demontage des Demontage-Demonstrators	77
Abbildung 32: Automatische optische Inspektion: Fehlerfreie PCB	78
Abbildung 33: Automatische optische Inspektion: Fehlerbehaftete PCB	79

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Stufen einer systematischen Literaturrecherche (Tranfield et al., 2003)...	26
Tabelle 2: Systematische Literaturrecherche Einschlusskriterien	30
Tabelle 3: Systematische Literaturrecherche Ausschlusskriterien	30
Tabelle 4: Relevante Literaturquellen	32
Tabelle 5: Bewertungsindikatoren für Roboter und Mensch (Cheng et al., 2017).....	48
Tabelle 6: Interviewleitfragen	80

10 Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensional
AK	Ausschlusskriterium
BFR	Brominated flame retardant
BJT	Bipolar Junction Transistor
bzw.	beziehungsweise
Ca.	zirka
CFC	Chlorofluorocarbon
CNN	Convolutional Neural Network
CNNB-CL	Convolutional Neural Network based Closed Loop
CO ₂	Kohlendioxid
Cobot	Kollaborativer Roboter
CPS	Cyber-Physische Systeme
d.h.	das heißt
DOF	Directions of Freedom
DoSE	Database of Semiconductors
DSR	Design Science Research
EC	Elektronische Komponenten
ECU	Elektronisches Steuergerät
EEE	Electrical and Electronic Equipment
EK	Einschlusskriterium
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
E-Waste	Electronic Waste
FET	Field-Effect Transistor
H#	Hauptforschungsfrage #Nummer
HCFC	Hydrochlorofluorocarbons
HDD	Festplattenlaufwerke
IC	Integrierter Schaltkreis
IoT	Internet of Things
IT	Informationstechnologie
K#	Kategorie #Nummer
kg	Kilogramm
KI	Künstliche Intelligenz
L#	Literaturquelle #Nummer
LAN	Local Area Network
LCD-TV	Liquid Crystal Display Television
PBB	Polybromierte Biphenyle
PBDE	Polybromierte Diphenylether
PC	Personal Computer
PCB	Printed Circuit Boards
PCBA	Printed Circuit Board Assembly
POLIMI	Politecnico di Milano

RAM	Random Access Memory
RDM	Re-/Demanufacturing
REPM	Rare Earth Permanent Magnets
RFID	Radio Frequency Identification
ROM	Read-Only Memory
S#	Subforschungsfrage #Nummer
SLR	Systematische Literaturrecherche
SMD	Surface Mounted Devices
SPAR-4-SLR	Scientific Procedures and Rationales for Systematic Literature Reviews
StEP	Solving the E-waste Problem
THD	Through Hole Devices
TV	Television
UHF	Ultra-High-Frequency
UN	United Nations
UNU	United Nations University
UR	Universal Robot
US	United States (of America)
USB	Universal Serial Bus
WEEE	Waste of Electrical and Electronic Equipment
WFD	Waste Framework Directive
WRCloud	WEEE Remanufacturing Cloud
z.B.	zum Beispiel