



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

ENTWICKLUNG EINES BEWERTUNGSSYSTEMS ZUR DEMONTIERBARKEIT VON AKKUS AUS SMARTPHONES

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. Sebastian Seisl, BSc

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

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Florian Rohrhofer



Wien, im März 2025

Florian Rohrhofer



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 an 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.

Kurzfassung

Die kurze Lebensdauer von Smartphones stellt eine zunehmende Herausforderung für die Kreislaufwirtschaft dar. Zudem erfordert die EU-Batterieverordnung (EU 2023/1542), dass Akkus leicht entnehmbar sein müssen, um die Reparatur- und Recyclingfähigkeit von Elektro- und Elektronikgeräten (EEE) zu verbessern. In diesem Zusammenhang spielt die Akkudemontierbarkeit eine zentrale Rolle. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Bewertungsmodells zur Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones, das eine objektive Beurteilung ermöglicht. Dieses Modell soll insbesondere für Konsument:innen eine hilfreiche Orientierung bieten, indem es eine fundierte Einschätzung der Reparaturfreundlichkeit von Geräten ermöglicht.

Der Forschungsansatz basiert auf der Design Science Methode, wobei die Richtlinien von Hevner et al. (2004) berücksichtigt und durch das Prozessmodell von Peffers et al. (2007) ergänzt wurden. Zudem umfasst die Untersuchung eine systematische Literaturrecherche nach Kitchenham & Charters (2007) sowie ein Experiment.

Im ersten Schritt wurden relevante Kriterien für die Akkudemontage aus wissenschaftlichen Publikationen identifiziert, kategorisiert und in das Bewertungsmodell integriert. Anschließend wurde das Modell in einer empirischen Untersuchung anhand der Akkudemontage von zehn Smartphones getestet. Die einzelnen Demontageschritte wurden dokumentiert, analysiert und auf Basis des entwickelten Akkudemontierbarkeitsindex bewertet. Ergänzend dazu erfolgte eine Validierung durch semi-strukturierte Expert:innen-Interviews, die gemäß der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2000) ausgewertet wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass Klebeverbindungen, lineare Demontagebäume, fehlende Reparaturanleitungen sowie defekte Displays oder Rückseiten wesentliche Hindernisse für eine effiziente Akkudemontage darstellen. Das entwickelte Bewertungssystem erlaubt eine objektive Klassifikation der Demontierbarkeit und dient als Informationsquelle für Konsument:innen. Die Arbeit trägt somit zur wissenschaftlichen Beurteilung der Reparaturfähigkeit von Smartphones bei und leistet einen bedeutenden Beitrag zur Förderung der Kreislaufwirtschaft in der Elektronikindustrie.

Abstract

The short lifespan of smartphones poses an increasing challenge for the circular economy. In addition, the EU Battery Regulation (EU 2023/1542) requires that batteries must be easy to remove in order to improve the reparability and recyclability of electrical and electronic equipment (EEE). In this context, battery removability plays a central role. The aim of this work is to develop an evaluation model for the dismantlability of batteries from smartphones that enables an objective assessment. This model is intended to provide helpful orientation, especially for consumers, by enabling a well-founded assessment of the ease of repair of devices.

The research approach is based on the design science method, whereby the guidelines of Hevner et al. (2004) were taken into account and supplemented by the process model of Peffers et al. (2007). The study also includes a systematic literature search according to Kitchenham & Charters (2007) and an experiment.

In the first step, relevant criteria for battery assembly were identified from scientific publications, categorised and integrated into the evaluation model. The model was then tested in an empirical study based on the battery assembly of ten smartphones. The individual disassembly steps were documented, analysed and evaluated on the basis of the developed battery assembly index. In addition, a validation was carried out using semi-structured expert interviews, which were analysed according to Mayring's qualitative content analysis (2000).

The results show that adhesive connections, linear disassembly trees, missing repair instructions and defective displays or backs represent significant obstacles to efficient battery assembly. The developed evaluation system allows an objective classification of disassembly capability and serves as a source of information for consumers. The work thus contributes to the scientific assessment of the reparability of smartphones and makes a significant contribution to promoting the circular economy in the electronics industry.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangssituation, Problemstellung und Problemdefinition	1
1.2	Forschungsfragen und Ziel dieser Arbeit	1
1.3	Methodische Vorgehensweise und Struktur der Arbeit.....	2
2	Theoretische Grundlagen	5
2.1	Kreislaufwirtschaft – Definition und Einführung	5
2.2	Strategien der K LW – 9R-Framework.....	6
2.3	Elektro- und Elektronikgeräte und Elektro- und Elektronikaltgeräte	8
2.4	Demontage	18
3	Regulatorischer Rahmen.....	22
3.1	Der Europäische Green Deal.....	22
3.2	Gesetzesvorgaben in der EU und in Österreich	23
3.3	Überblick über die EU-Batterieverordnung	26
4	State of the Art.....	29
4.1	Beschreibung der Methode.....	29
4.2	Systematische Literatursuche.....	30
4.3	Systematische Literaturanalyse	32
4.4	Ergebnisse der Literaturanalyse	33
4.5	Bestehende Bewertungsverfahren für EEE im Hinblick auf K LW und Reparierbarkeit	36
4.6	Komponenten eines Bewertungssystems.....	48
5	Entwicklung eines Bewertungsmodells	52
5.1	Demontagetiefe.....	53
5.2	Art der Befestigungselemente.....	55
5.3	Werkzeuge.....	56
5.4	Demontagezeit.....	57
5.5	Reparaturinformationen	58
5.6	Berechnungsmethode Akkudemontierbarkeitsindex.....	59
6	Demonstrationsphase.....	62
6.1	Smartphoneauswahl	62
6.2	Auswertung der Ergebnisse der Akkudemontage.....	65

6.3	Herausforderungen bei der Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones	65
6.4	Fazit	68
7	Expert:innenvalidierung	70
7.1	Semi-strukturierte Interviews	70
7.2	Auswertung und Diskussion der ExpertInneninterviews	71
8	Diskussion und Ausblick	77
8.1	Diskussion der Ergebnisse	77
8.2	Limitationen und Ausblick	80
9	Literaturverzeichnis	82
10	Abbildungsverzeichnis.....	91
11	Tabellenverzeichnis.....	92
12	Abkürzungsverzeichnis	93
13	Anhang	94

1 Einleitung

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Ausgangssituation sowie die Problemstellung und -definition dargelegt, um den inhaltlichen Kontext und die wissenschaftliche Relevanz der Arbeit zu verdeutlichen. Darauf aufbauend werden die Forschungsfragen formuliert. Abschließend werden die methodische Vorgehensweise und der strukturelle Aufbau der Arbeit erläutert.

1.1 Ausgangssituation, Problemstellung und Problemdefinition

Elektro- und Elektronikgeräte (EEE) stellen ein zunehmendes Problem dar, da weniger als 40% dieser Geräte recycelt werden. Diese Produktkategorie ist einer der am schnellsten wachsenden Abfallströme mit einer jährlichen Wachstumsrate von 2%. Die Lebensdauer von EEE wird immer kürzer, da es oft wirtschaftlicher ist, sie zu ersetzen, als sie aufwendig zu reparieren. Niedrige Sammelquoten und eine komplexe Demontage, die Recyclingunternehmen vor große Herausforderungen stellt, verschärfen diese Situation zunehmend (Kurth et al., 2018).

Obwohl zahlreiche Vorschriften zur Förderung von Nachhaltigkeit und Recycling bestehen, bleibt die effektive Recyclingfähigkeit und Ausbaubarkeit von Batterien in EEE eine bedeutende Schwachstelle in der Kreislaufwirtschaft. Aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften und den damit verbundenen Umwelt- und Gesundheitsrisiken erfordern Batterien und Akkus besondere Aufmerksamkeit. Deren Einfluss im Recyclingprozess sowie ihr Potenzial zur Ressourcenrückgewinnung werden in der Praxis oft vernachlässigt, was zu einem Mangel an effizienten, standardisierten Demontageprozessen führt (Roithner et al., 2021).

Die Entwicklung eines Bewertungsmodells für die Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones ist dringend erforderlich, da bislang kein standardisiertes Modell existiert, das eine objektive Beurteilung ermöglicht. Ohne ein solches System bleiben wertvolle Ressourcen ungenutzt und das Risiko von Umweltschäden durch unsachgemäße Entsorgung steigt. Ein entsprechendes Modell würde die Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit von Akkus systematisch erfassen und damit zur Ressourcenschonung sowie zur Reduzierung von Umweltbelastungen beitragen. Zudem bietet es Konsument:innen eine wertvolle Orientierungshilfe, indem es Transparenz über die Reparaturfreundlichkeit von Geräten schafft.

1.2 Forschungsfragen und Ziel dieser Arbeit

Ansichts der festgestellten Forschungslücke wird in dieser Diplomarbeit die folgende zentrale Forschungsfrage (Mainresearch Question - MQ) bearbeitet:

- Wie kann die Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones bewertet werden, um die Kreislaufwirtschaft in der Elektronikindustrie zu fördern?

Ausgehend von dieser Hauptforschungsfrage ergeben sich die folgenden Subforschungsfragen (Subresearch Questions – SQ):

- SQ1: Inwieweit beeinflusst die EU-Batterieverordnung die Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones?
- SQ2: Welche Kriterien sind für die Bewertung der Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones relevant?
- SQ3: Welche technischen Hürden bestehen derzeit bei der Demontage von Akkus aus Smartphones?

Das zentrale Forschungsziel dieser Diplomarbeit ist daher die Entwicklung und Validierung eines Bewertungsmodells, das speziell auf die Demontage von Akkus in Smartphones ausgerichtet ist. Smartphones als Untersuchungsgegenstand stellen eine der am weitest verbreiteten EEE-Kategorien dar und tragen durch ihre kurzen Lebenszyklen wesentlich zum Elektro- und Elektronikgeräte-Aufkommen (WEEE) bei. Eine besondere Herausforderung bei der Demontage dieser Geräte ergibt sich aus der Tatsache, dass die Akkus häufig fest verbaut sind. Die fest verklebten oder verschraubten Akkus erhöhen den Aufwand für eine fachgerechte Entnahme, was sowohl die Recyclingprozesse erschwert als auch die Risiken für die Umwelt bei unsachgemäßem Umgang erhöht (Parchomenko et al., 2023). Ab 2027 fordert die EU-Batterieverordnung (EU 2023/1542) explizit, dass Akkus in elektronischen Geräten, einschließlich Smartphones, so konstruiert sein müssen, dass sie vom Endnutzer oder von unabhängigen Reparaturwerkstätten ohne Beschädigung des Geräts leicht entnommen werden können (Europäische Union, 2023).

Daraus ergeben sich die folgenden Forschungsziele (Objectives - O):

- O1: Analyse des regulatorischen Rahmens durch Untersuchung relevanter Gesetzesvorgaben, einschließlich eines Überblicks über die EU-Batterieverordnung, die Ökodesign-Richtlinie und deren Anforderungen.
- O2: Darstellung des aktuellen Forschungsstandes zu bestehenden Bewertungsmodellen für EEE.
- O3: Identifizierung von relevanten Indikatoren, die zur Erstellung des Bewertungsmodells zur Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones dienen.
- O4: Validierung des Bewertungsmodells durch die Demontage des Akkus an zehn verschiedenen Smartphone-Modellen.

1.3 Methodische Vorgehensweise und Struktur der Arbeit

Zur Erfüllung der zentralen Forschungsfragen und der damit verbundenen Ziele dieser Diplomarbeit wird der methodische Ansatz der Design Science Research (DSR)

gewählt. Der Einsatz von DSR ermöglicht die Entwicklung praxisorientierter Artefakte, die systematische Lösungen für das identifizierte Problem bieten: die Herausforderungen bei der Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones und deren Auswirkungen auf die Kreislaufwirtschaft (Hevner et al., 2004).

Das in dieser Arbeit entwickelte Artefakt ist ein Bewertungsmodell, das speziell dazu konzipiert wurde, die Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones zu bewerten. Das Modell zielt darauf ab, die Herausforderungen zu adressieren, die sich aus dem festen Verbau von Akkus in Smartphones ergeben. Es soll die Lücke zwischen den derzeitigen Praktiken und den mit der EU-Batterieverordnung (EU 2023/1542) ab 2027 erforderlichen Standards aufzeigen. Die methodische Vorgehensweise orientiert sich dabei am Prozessmodell von Peffers et al. (2007), welches eine strukturierte Herangehensweise in sechs klar definierten Phasen vorgibt:

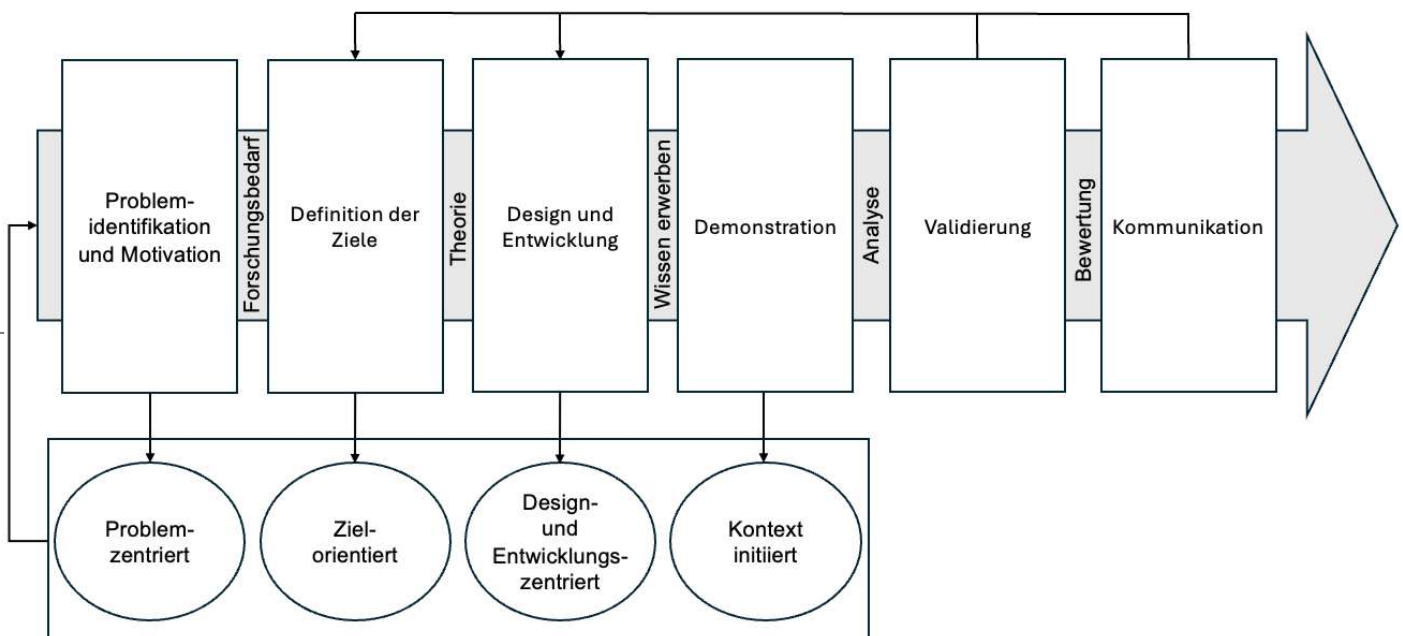


Abbildung 1: DSRM-Prozessmodell (Peffers et al., 2007)

1. Problemidentifikation und Motivation
2. Definition der Ziele
3. Design und Entwicklung
4. Demonstration
5. Validierung
6. Kommunikation

Die wissenschaftliche Relevanz der Problemstellung sowie die Ziele dieser Arbeit wurden bereits in den Abschnitten 1.1 und 1.2 detailliert dargelegt. Um einen fundierten Übergang von der anfänglichen Problemstellung zur Design- und Entwicklungsphase zu gewährleisten, ist eine umfassende theoretische Grundlage erforderlich. Diese beinhaltet eine Analyse des aktuellen Forschungsstands sowie die

Anforderungen an ein Bewertungsmodell zur Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones. Insbesondere ist es notwendig, relevante Indikatoren zur Bewertung der Demontierbarkeit zu identifizieren, um eine systematische und nachvollziehbare Beurteilung zu ermöglichen. Zur Sicherstellung eines methodisch fundierten Vorgehens wird eine systematische Literaturrecherche (SLR) durchgeführt, die auf dem Ansatz von Kitchenham BA & S. Charters (2007) basiert.

Die SLR nach Kitchenham BA & S. Charters (2007) lässt sich in drei Hauptphasen unterteilen:

1. Planungsphase: In dieser Phase wird ein Forschungsprotokoll entwickelt, das die Forschungsfragen definiert und die Methodik festlegt.
2. Durchführungsphase: Diese Phase umfasst die Suche, Bewertung und Auswahl der relevanten Literatur nach den zuvor festgelegten Kriterien. Datenbanken wie Google Scholar und ScienceDirect werden durchsucht und die Literatur systematisch gesichtet.
3. Berichtsphase: In der letzten Phase werden die Daten aus der ausgewählten Literatur extrahiert und die Ergebnisse zusammengefasst.

Die Vorgehensweise der SLR wird in den Kapiteln 4.1 und 4.2 detailliert beschrieben.

In der dritten Phase „Design und Entwicklung“ wird das Bewertungsmodell auf Grundlage der in der SLR identifizierten Kriterien und Indikatoren zur Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones entwickelt. Diese Kriterien und Indikatoren werden durch die Norm EN 45554, die allgemeine Grundsätze zur Bewertung der Recyclingfähigkeit und der Demontagefähigkeit von Komponenten vorgibt, sowie durch den praktischen Reparierbarkeitsansatz des iFixit-Index ergänzt.

In der Phase „Demonstration“ wird das entwickelte Bewertungsmodell anhand einer empirischen Untersuchung ausgewählter Smartphones getestet. Zu diesem Zweck werden die Akkus aus zehn verschiedenen Geräten demontiert. Der Demontageprozess jedes einzelnen Geräts wird dabei detailliert analysiert, anhand der zuvor festgelegten Kriterien bewertet und umfassend dokumentiert.

In der Validierungsphase wird das entwickelte Bewertungsmodell einer externen Überprüfung unterzogen, um dessen Allgemeingültigkeit zu testen und wertvolles Feedback für mögliche Anpassungen zu erhalten. Diese Überprüfung erfolgt durch zwei Expert:innen-Interviews. Die semi-strukturierten Interviews basieren auf der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2000). Dieser Ansatz ermöglicht eine systematische Textanalyse, bei der die erhobenen Interviewdaten strukturiert, kategorisiert und interpretiert werden, um fundierte Aussagen über die Qualität und Praxistauglichkeit des Modells treffen zu können (Mayring, 2000; Qu & Dumay, 2011).

In der letzten Phase, der „Kommunikationsphase“ wird die Arbeit veröffentlicht.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der Kreislaufwirtschaft erörtert, um zu zeigen, wie notwendig nachhaltige Methoden für die moderne Wirtschaft sind. Die Rolle von EEE im Recyclingprozess wird untersucht, wobei insbesondere deren Abfallströme analysiert werden. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Bedeutung von Batterien innerhalb dieser Systeme. Abschließend werden die Herausforderungen sowie die technischen Verfahren zur effizienten Demontage dieser Geräte thematisiert.

2.1 Kreislaufwirtschaft – Definition und Einführung

Die globalen Ressourcenreserven stehen unter zunehmendem Druck. Während das Angebot vieler essenzieller Rohstoffe begrenzt ist, führt das kontinuierliche Wachstum der Weltbevölkerung zu einer steigenden Nachfrage. Angesichts der damit verbundenen Umweltbelastungen und der Endlichkeit dieser Ressourcen ist ein Paradigmenwechsel vom linearen Wirtschaftsmodell hin zu einer Kreislaufwirtschaft erforderlich, um langfristige Nachhaltigkeit im Wirtschaftssystem zu gewährleisten. (Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft, 2022). Die Kreislaufwirtschaft stellt dabei eine vielversprechende Alternative dar, die auf einer möglichst langen Lebensdauer von Produkten und Rohstoffen sowie deren Wiederverwendung und Recycling basiert. Im Mittelpunkt des Konzepts stehen die Schonung natürlicher Ressourcen und die Reduzierung von Abfallmengen durch die Schaffung geschlossener Stoffkreisläufe. Die Umsetzung dieses Konzepts ist von großer Bedeutung für die Zukunftssicherung der kommenden Generationen. Das Konzept der Kreislaufwirtschaft findet nicht nur auf nationaler, sondern auch auf europäischer Ebene Beachtung. Der Europäische Green Deal, den die Europäische Kommission im Dezember 2019 vorgestellt hat, zielt darauf ab, die EU zum ersten klimaneutralen Wirtschaftsraum der Welt zu machen. Die Kreislaufwirtschaft setzt auf eine nachhaltige Rohstoffgewinnung und eine ressourcenschonende Produktion von Gütern. Die Lebensdauer von Produkten soll verlängert und ihre Nutzung intensiviert werden, um Ressourcenverbrauch, Abfallaufkommen und Umweltbelastungen zu minimieren. Eine entscheidende Rolle spielt dabei das Produktdesign, das bereits in der Designphase auf Langlebigkeit, Schadstofffreiheit, Reparierbarkeit und Aufrüstbarkeit ausgerichtet sein sollte. Auch dienstleistungsorientierte Geschäftsmodelle können dazu beitragen, die Nutzungsdauer von Produkten zu verlängern und damit einen wichtigen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft zu leisten. Erst wenn Produkte nicht mehr genutzt werden können, werden sie dem Abfallstrom zugeführt und als Sekundärrohstoffe verwertet. Abfälle, die nicht wiederverwertbar sind, werden entweder thermisch verwertet oder auf einer Mülldeponie entsorgt (Schaller et al., 2020).

Die Kreislaufwirtschaft ist von entscheidender Bedeutung für eine nachhaltige Entwicklung, da sie eine Verbindung zwischen Wirtschaft, Umweltschutz und sozialem Fortschritt ermöglicht. Durch die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs, die Vermeidung von Schadstoffen und die Verringerung von Abfällen und Emissionen, kann der ökologische Fußabdruck insgesamt reduziert werden. Die Implementierung der Kreislaufwirtschaft fördert wirtschaftliche Innovationen, neue Geschäftsmodelle, Arbeitsplätze und ändert Konsummuster. Auf sozialer Ebene verbessert sie die Gesundheit durch die Verringerung von Schadstoffbelastungen und trägt zur Sicherung der Lebensqualität und des materiellen Wohlstands bei (Kurth et al., 2018).

2.2 Strategien der K LW – 9R-Framework

Es gibt zahlreiche Strategien zur Implementierung der Kreislaufwirtschaft, wobei das von Potting et al. (2017) entwickelte 9R-Framework eine bedeutende Rolle spielt. Dieser Ansatz, der in veränderter Form auch in der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie aufgegriffen wird, bietet einen strukturierten Rahmen zur Optimierung der Ressourcennutzung und Verlängerung der Produktlebenszyklen durch zehn präzise definierte Maßnahmen (Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft, 2022).



Abbildung 2: Kreislaufwirtschaftsstrategie Österreich (Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft, 2022)

Abbildung 2 veranschaulicht das österreichische R-Rahmenkonzept, welches aus zehn Strategien der Kreislaufwirtschaft besteht. Diese Strategien sind in drei übergeordnete Kategorien unterteilt:

- Intelligente Nutzung und Herstellung von Produkten und Infrastruktur
- Verlängerung der Lebensdauer von Produkten, Komponenten und Infrastruktur
- Wiederverwertung von Materialien

Die Strategien sind hierarchisch nach ihrer Bedeutung für die Kreislaufwirtschaft geordnet. Refuse hat die höchste Priorität, da es auf die Vermeidung von Ressourcenverbrauch abzielt, während Recover die geringste Bedeutung hat.

Die Strategien der ersten Kategorie (Refuse, Rethink, Reduce) fokussieren sich auf grundlegende Änderungen in Produktions- und Konsummustern, um Ressourcenverbrauch und Abfall zu minimieren. Die zweite Kategorie (Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose) zielt darauf ab, die Nutzungsdauer von Produkten, Komponenten und Infrastruktur auf einem möglichst hohen Wertniveau zu verlängern. Strategien der dritten Kategorie (Recycle, Recover) konzentrieren sich darauf, Materialien so weit wie möglich als Sekundärrohstoffe in den Stoffkreislauf zu reintegrieren, um Ressourcenverluste zu minimieren (Kirchherr et al., 2017).

2.3 Elektro- und Elektronikgeräte und Elektro- und Elektronikaltgeräte

Elektro- und Elektronikgeräte (EEE) sind Produkte, die für ihren Betrieb Strom benötigen, wie Haushaltsgeräte, IT-Geräte, Büroausstattung und Unterhaltungselektronik. Sobald diese Geräte ausgedient haben, werden sie als Elektro- und Elektronikaltgeräte (EAG), oder Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) bezeichnet und müssen entsorgt oder recycelt werden.

EEE sind aus einer vielfältigen Zusammensetzung von Materialien und Komponenten aufgebaut. Im Vergleich zu gewöhnlichen kommunalen Abfällen zeichnen sie sich durch einen ständig wachsenden Abfallstrom, den Gehalt an gefährlichen Substanzen und erheblichen Umweltbelastungen während der Produktion aus. Laut Martens und Goldmann (2016) setzen sich EEE größtenteils aus Metallen (57%) und Kunststoffen (19%) zusammen. Darüber hinaus beinhalten sie Glas (10%), elektronische Bauteile (4%) und weitere Materialien (10%), wie in Abbildung 3 zu sehen ist.

Zusammensetzung von EEE allgemein

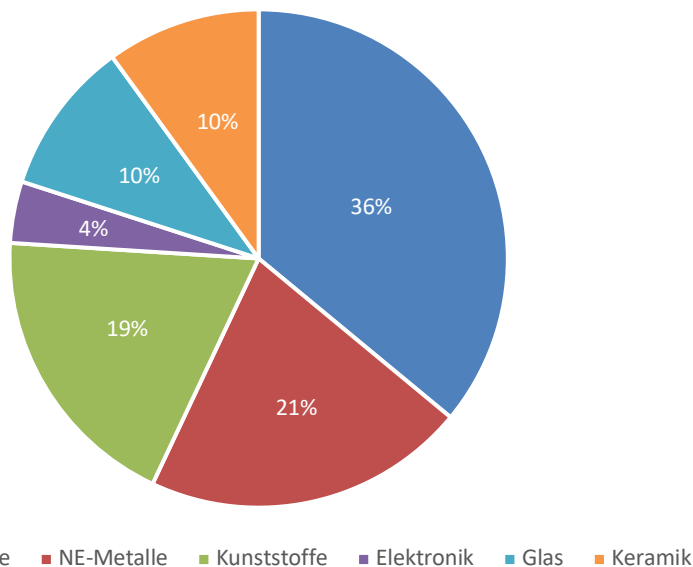


Abbildung 3: Materialbestandteile von EEE gesamt (Martens & Goldmann, 2016)

Die verstärkte Nutzung elektrischer und elektronischer Haushaltsgeräte sowie deren zunehmender Einsatz in Industrie und Gewerbe haben zu einem signifikanten Anstieg der auf den Markt gebrachten Geräte geführt. Besonders in der Unterhaltungselektronik und dem schnell wachsenden Informations- und Kommunikationssektor ist dieser Trend deutlich zu erkennen. Entsprechend steigt auch das Aufkommen an WEEE, das eine breite Palette von Gerätetypen mit sehr unterschiedlichen Lebensdauern umfasst. Während einige Haushaltsgeräte wie Waschmaschinen eine durchschnittliche Nutzungsdauer von 25 Jahren erreichen

können, wird die Nutzungsdauer von Mobiltelefonen in Industrieländern mittlerweile auf nur noch 18 Monate geschätzt. Der vorzeitige Marktaustritt vieler Geräte, insbesondere im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), wird oft durch nicht mehr kompatible Software, Modeerscheinungen oder geplante Obsoleszenz verursacht, was zu einem erhöhten Aufkommen und einer großen Vielfalt von Elektroschrott führt (Martens & Goldmann, 2016).

Die daraus resultierenden Altgeräte variieren erheblich in Typ, Alter und Größe – von Kühlschränken bis hin zu USB-Sticks (Martens & Goldmann, 2016). Weltweit fallen jährlich 53,6 Millionen Tonnen Elektroschrott an (Pawlik, 2024), in Österreich waren es im Jahr 2021 138.460 Tonnen (Neubauer et al., 2023).

2.3.1 WEEE-Aufkommen in Österreich

Die Sammlung von WEEE in Österreich erfolgt über verschiedene Kanäle. Zu diesen zählen die Altstoff-Sammelzentren und die Sperrmüllsammlungen der Gemeinden sowie stationäre und mobile Problemstoff-Sammelzentren. Zusätzlich tragen spezialisierter Handel und Entsorgungsbetriebe zur Sammlung bei. Für private Haushalte in Österreich ist die Rückgabe von EAG kostenlos (Neubauer et al., 2023).

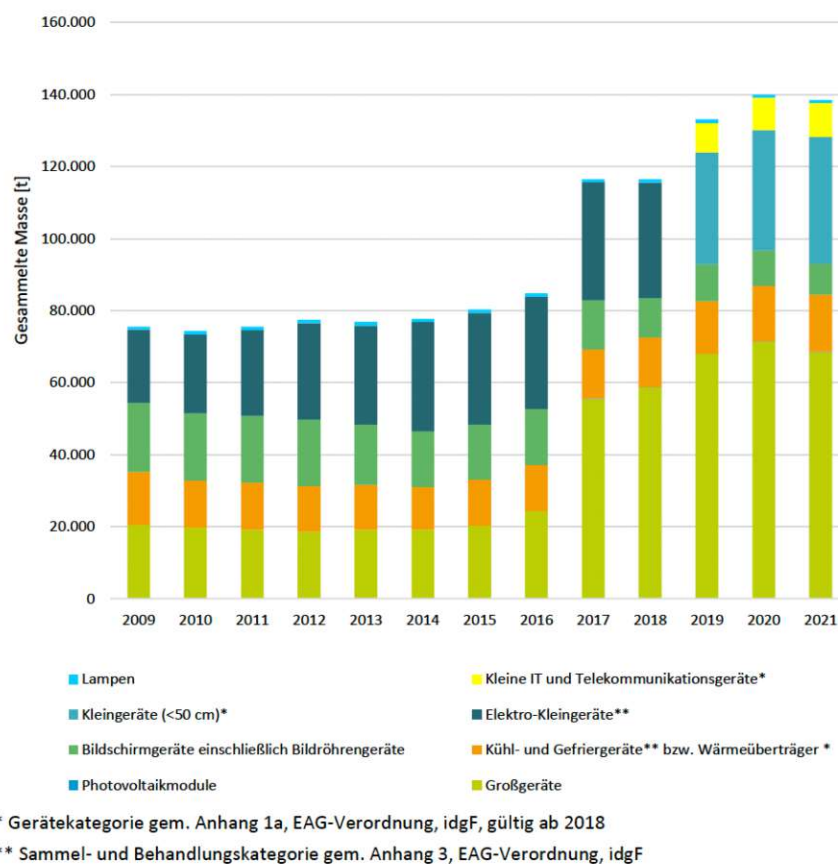


Abbildung 4: Entwicklung der Sammelmassen in Ö in t (Neubauer et al., 2023)

Die Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der gesammelten EAG in Österreich im Zeitraum von 2009 bis 2021. Im Jahr 2021 wurden im Vergleich zu 2015 um 72,5% mehr EAG gesammelt. 2017 gab es einen deutlichen Anstieg. Das ist damit zu erklären, weil in diesem Jahr erstmals zusätzliche, bislang nicht offiziell erfasste Sammelmengen in die Bilanz einbezogen wurden. Diese Mengen stammen vorrangig aus dem Bereich der Elektrogroßgeräte, die bereits von Schadstoffen befreit wurden (Neubauer et al., 2023). Klar zu erkennen ist, dass trotz veränderter Produktkategorien, (Elektro)-Kleingeräte und kleine IT- und Telekommunikationsgeräte in den letzten Jahren erheblich zugenommen haben.

Die ab 2020 von der EU geforderte Mindestsammelquote von 65% für EAG wurde in Österreich nicht erreicht. Stattdessen wurde nur eine Quote von 56,5% erzielt. Auch die Anzahl jener Elektrogeräte, die über den Restmüll entsorgt werden, steigt weiterhin. Im Jahr 2021 waren es zirka 21.000 Elektrogeräte, die unsachgemäß weggeworfen wurden. Das führt dazu, dass wertvolle Bauteile wie elektronische Komponenten und Kabel oft nicht effektiv recycelt werden können. Diese Situation verdeutlicht den Bedarf an verbesserten Sammel- und Recyclingverfahren, um den wachsenden Mengen an Elektro- und Elektronikschrott effektiv zu begegnen und die in den Geräten enthaltenen wertvollen Ressourcen zurückzugewinnen (Neubauer et al., 2023).

Das Recycling von WEEE spielt eine zentrale Rolle, sowohl aufgrund der stetig wachsenden Mengen an Elektroschrott als auch aufgrund des Rohstoffpotenzials, das diese Geräte bieten. Geräte wie Waschmaschinen, Kühlgeräte und Elektrokleingeräte enthalten eine Vielzahl verwertbarer Rohstoffe. Zu den enthaltenen Materialien gehören Metalle wie Stahl, Kupfer und Aluminium, die in Bauteilen wie Gehäusen, Motoren und Kühlelementen verarbeitet sind. Darüber hinaus finden sich in WEEE Edelmetalle wie Gold, Palladium und Silber, die in elektronischen Komponenten verwendet werden (Martens & Goldmann, 2016).

Zusätzlich stellen WEEE eine Quelle für seltene Metalle und Halbmetalle dar, die in spezialisierten Anwendungen wie Kondensatoren, LCD-Bildschirmen und Leuchtstoffen genutzt werden. Diese Elemente sind für moderne Technologien essenziell, jedoch aufgrund ihrer begrenzten natürlichen Verfügbarkeit und aufwendigen Gewinnung von besonderer Bedeutung. Das Recycling dieser Materialien trägt zur Einsparung natürlicher Ressourcen bei und mindert die Umweltbelastungen, die mit der Primärproduktion dieser Rohstoffe verbunden sind. Angesichts der steigenden Nachfrage nach diesen Rohstoffen und der begrenzten Verfügbarkeit natürlicher Vorkommen stellt das Recycling von WEEE einen wesentlichen Beitrag zu einer nachhaltigeren und ressourcenschonenden Wirtschaftsweise dar (Martens & Goldmann, 2016).

2.3.2 Lebenszyklus von EEE

EEE entwickeln sich zunehmend zu einem Problem, da weniger als 40% dieser Altgeräte recycelt werden. Angesichts einer jährlichen Wachstumsrate von 2% zählt dieser Abfallstrom zu den am schnellsten wachsenden. Die Lebensdauer der Geräte verkürzt sich kontinuierlich, denn aufgrund ihrer komplexen Konstruktion ist eine Nachrüstung oft schwierig und eine Reparatur meist teurer als ein Neukauf. Die kurze Nutzungsdauer dieser Geräte, kombiniert mit niedrigen Sammelquoten und der komplizierten Demontage, erschweren das Recycling erheblich. Zudem sind EEE derzeit nicht für die Kreislaufwirtschaft ausgelegt (Kurth et al., 2018).

Die Globalisierung und Digitalisierung prägen die Konsummuster, indem sie technologische Innovationen und die Verfügbarkeit neuer Produkte beschleunigen. Dies führt dazu, dass der Fokus zunehmend auf der tatsächlichen Nutzungsdauer von Produkten liegt, die häufig kürzer ausfällt als ihre technische Lebensdauer. Dabei beschreibt die Nutzungsdauer die Zeitspanne, in der ein Produkt aktiv verwendet wird, während die Lebensdauer die mögliche Gesamtnutzungszeit eines Produkts umfasst. Die Nutzungsdauer eines Geräts kann durch technische Defekte vorzeitig beendet werden, insbesondere wenn diese Defekte eine Reparatur unwirtschaftlich machen und eine Entsorgung erforderlich wird. Darüber hinaus kann ein Produkt aus anderen Gründen, wie etwa technologischem Fortschritt, der zu Überalterung führt, oder weil es als nicht mehr zeitgemäß wahrgenommen wird, seinen Gebrauchswert verlieren. In solchen Fällen wird das Produkt ersetzt, obwohl seine technische Lebensdauer noch nicht vollständig ausgeschöpft ist (Tröger et al., 2017). Cooper (2004) fand in einer empirischen Untersuchung heraus, dass 30% aller entsorgten Geräte noch funktionsfähig waren, bei EEE lag dieser Anteil sogar bei 60%. In diesen Fällen hat das Nutzungsende nichts mit der tatsächlichen Lebensdauer der Produkte zu tun (Tröger et al., 2017).

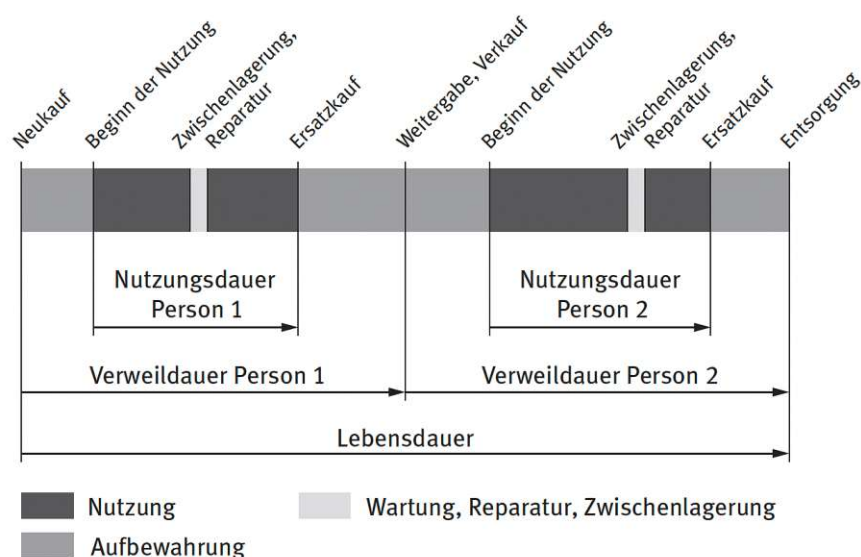


Abbildung 5: Unterschied zwischen Nutzungs- und Lebensdauer (Tröger et al., 2017)

Der Trend zu immer kürzeren Produktzyklen, insbesondere in der IKT wie Computern, Monitoren und Smartphones sowie in der Unterhaltungselektronik, trägt maßgeblich zum kontinuierlichen Anstieg des Elektronikschrotts bei. Diese Geräte enthalten durchschnittlich rund 60 verschiedene chemische Elemente und stellen eine wesentliche Quelle für Sondermetalle dar. Allerdings kann derzeit nur ein begrenzter Anteil dieser Elemente aus Altgeräten zurückgewonnen werden. In einigen Ländern mit weniger entwickelten Recyclinginfrastrukturen liegt die Rückgewinnung bei maximal fünf Elementen. Im Gegensatz dazu ermöglichen moderne Recyclingtechnologien nach aktuellem Forschungsstand in Europa die Rückgewinnung von bis zu 19 chemischen Elementen (Martens & Goldmann, 2016).

Dieser Umstand verdeutlicht den Bedarf an weiteren Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, um die Effizienz bei der Rückgewinnung wertvoller Materialien zu steigern. Eine gezielte Sammlung und Verwertung dieser Altgeräte ist dabei entscheidend, da die getrennte Sammlung die Wiederaufbereitung erheblich erleichtert. Ein beobachtbarer Trend ist, dass die Rücklaufquoten von großen Elektro- und Elektronikgeräten höher ausfallen als die von kleineren Geräten. Während die EU-Recyclingziele bei großen Geräten bereits erreicht werden, besteht bei kleinen Geräten weiterhin Handlungsbedarf, insbesondere durch Maßnahmen zur Förderung der getrennten Sammlung und Wiederverwertung (Martens & Goldmann, 2016).

Nutzungsdauer von Smartphones

Im Jahr 2015 wurde in österreichischen Haushalten eine empirische Studie durchgeführt. Ziel war es, die Nutzungsdauer spezifischer Gegenstände zu ermitteln. Kleidung weist unter den Befragten die kürzeste Nutzungsdauer auf, gefolgt von digitalen Medien und kleinen Haushaltsgeräten. Große Haushaltsgeräte, Autos und Möbel werden dagegen am längsten verwendet. Besonders auffällig ist die kurze Nutzungsdauer von Smartphones, die mit durchschnittlich 2,7 Jahren sogar kürzer ist als jene von Jeans oder Mänteln (Tröger et al., 2017).

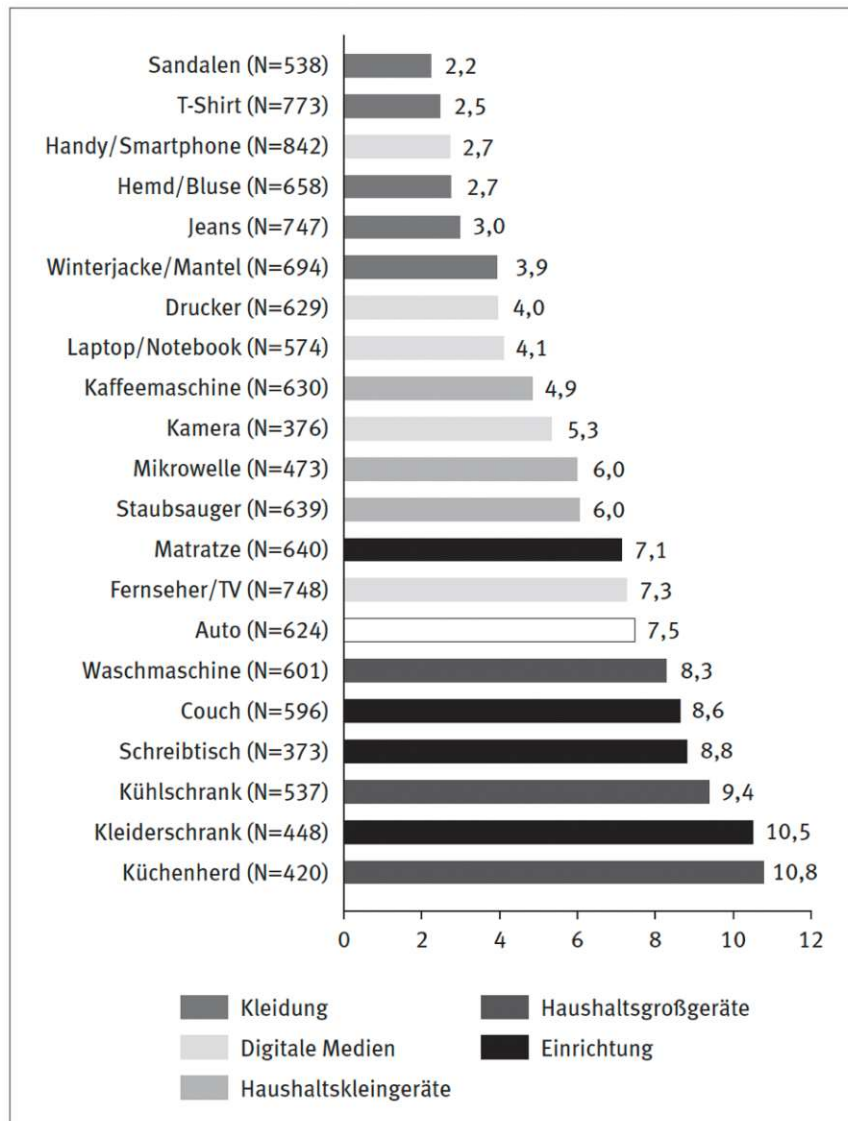


Abbildung 6: Angaben über die Nutzungsdauer von Gebrauchsgütern (in Jahre) (Tröger et al., 2017)

Einflüsse auf die Nutzungsdauer von Smartphones:

- **Nutzungsende aufgrund von technischen Fehlern**

Ein mechanischer oder technischer Defekt ist laut der im Jahr 2015 durchgeführten Umfrage für 31% der Befragten der Hauptgrund für den Austausch ihres alten Smartphones, was es zum häufigsten Grund für das Ende der Nutzungsdauer macht. Jedoch bedeutet eine eingeschränkte Funktionstüchtigkeit nicht zwangsläufig, dass ein Smartphone nicht weiter genutzt werden kann. Nur bei etwa 10% aller Geräte war ein solcher Defekt ausschlaggebend für die eingeschränkte Funktionsfähigkeit. Am häufigsten wurde ein defekter Akku genannt, der in rund 40% dieser Fälle zur Einschränkung führte. Etwa ein Drittel der Nutzer versuchte, das Handy eigenständig zu reparieren. Oftmals wird jedoch aus Zeit- und Kostengründen ein Neukauf einer Reparatur vorgezogen. Viele Verbraucher:innen erachten

eine Reparatur nur dann als sinnvoll, wenn das Gerät innerhalb der Garantiezeit defekt wird oder noch als besonders neuwertig und in gutem Zustand wahrgenommen wird (Tröger et al., 2017).

- **Nutzungsende durch Software-Probleme und technische Inkompatibilitäten**

Ungefähr 10% der Befragten berichteten, dass ihr Handy nur noch sehr langsam funktionierte. Dies weist auf funktionelle Obsoleszenz hin, ein Phänomen, das eintritt, wenn steigende technische Anforderungen die Leistungsfähigkeit vorhandener Geräte reduzieren. Mit der Einführung neuer Modelle durch den Hersteller erhalten ältere Geräte oft keine regelmäßigen Software-Updates mehr. Diese Handys verlieren erheblich an Wiederverkaufswert, sind nicht länger kompatibel mit neuesten Apps und bieten geringeren Schutz gegen Viren (Tröger et al., 2017).

- **Ende der Nutzungsdauer aufgrund von neuen Produkten**

Das Ende der Nutzungsdauer aufgrund neuer Produkteinführungen führt dazu, dass Benutzer bestrebt sind, technologisch aktuell zu bleiben und Trends zu folgen. Technische Fortschritte und Designänderungen bei neuen Modellen lassen ältere Geräte sowohl leistungsmäßig als auch optisch veraltet erscheinen. Dies fördert zwei Arten von Obsoleszenz, die häufig zu Ersatzkäufen veranlassen. Etwa 23% der Befragten ersetzen ihre alten Smartphones durch aktuellere Modelle wegen besserer Leistung, während 15% sich für ein neues Modell entschieden, weil es optisch ansprechender war. Besonders die jüngere Generation (18 bis 29 Jahre) neigt dazu, aktuellere Geräte zu bevorzugen. Tatsächlich wurde bei dieser Altersgruppe der Wunsch festgestellt, technisch immer am neuesten Stand zu sein. Der Drang, immer die aktuellen Handys zu besitzen, führt zu einer stark verkürzten Nutzungsdauer. Personen, die aufgrund neuer Modelle wechselten, nutzten ihre vorherigen Smartphones durchschnittlich nur 1,4 Jahre, was ungefähr die Hälfte der durchschnittlichen Nutzungsdauer ist (Tröger et al., 2017).

Die kurze Nutzungsdauer von Smartphones trägt wesentlich zur Zunahme des Elektroschrotts bei. Jährlich gelangen große Mengen an Elektroaltgeräten, darunter auch Smartphones, in den Restmüll und entziehen sich damit einer effizienten Wiederverwertung. In Österreich lagern darüber hinaus mehr als 10 Millionen ungenutzte Smartphones in Schubladen. (Smartphones & Nachhaltigkeit | Auswirkungen, n.d.) Dieses Phänomen ist auch als "Hoarding-Effekt" bekannt. (Martens & Goldmann, 2016). Diese Geräte entziehen dem Recyclingkreislauf wertvolle Ressourcen. Smartphones enthalten durchschnittlich etwa 60 verschiedene Elemente, darunter Kunststoffe, Aluminium, Kupfer, Stahl, Magnesium, Lithium, Silber,

Gold und Platin. Von besonderer Bedeutung ist der Gehalt von etwa 7% an kritischen Rohmaterialien wie Palladium, Kobalt oder Iridium, die schwer abbaubar sind, nicht nachwachsen und erhebliche Umweltauswirkungen haben. Während manche Materialien wie Gold und Kupfer vergleichsweise effizient recycelt werden können, benötigen andere fortgeschrittene Recyclingmethoden, die noch weiter entwickelt werden müssen (Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH, o. D.). Ein interessantes Detail ist, dass eine Tonne ausgemusterter Mobiltelefone einen höheren Goldgehalt besitzt als eine Tonne Golderz (Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH, o. D.).

2.3.3 Die Rolle von Batterien in der Umweltverschmutzung und im Ressourcenverbrauch

Batterien und Akkumulatoren, kurz Akkus genannt, stellen in der heutigen Zeit eine unverzichtbare Energiequelle dar. Akkus sind inzwischen in einer Vielzahl von Geräten wie Laptops, Smartphones und Elektrofahrzeugen verbaut. Der Bedarf an leistungsfähigeren Energiespeichern wächst parallel zur Technologie und fördert die Dominanz von Lithiumbatterien auf dem Markt der wiederaufladbaren Batterien (Kurth et al., 2018). Ihre Vorzüge sind vielfältig. Lithium-Ionen-Zellen besitzen aufgrund der hohen Zellspannung von 3,7 Volt eine sehr hohe Energiedichte von zirka 150-400 Wh/kg. Diese Einheit gibt an, wieviel Energie (in Wattstunden) eine Batterie pro Kilogramm ihrer Masse speichern kann. Dazu kommen eine geringe Selbstentladungsrate und eine niedrige Temperaturempfindlichkeit, welche Lithium-Ionen-Akkus zu einer zuverlässigen und effizienten Energiequelle machen (Martens & Goldmann).

Jedoch birgt die Nutzung von Lithiumbatterien auch Risiken. Ihre Tendenz zur Selbstentzündung kann zu schwerwiegenden Unfällen führen, wie brennende Elektronik oder explodierende E-Zigaretten zeigen. Oft resultieren diese Gefahren aus unsachgemäßem Umgang, wie mechanischer Belastung oder Überladung, die zu internen Kurzschlüssen führen können. Mit der Zunahme der Verwendung dieser Batterien steigt auch deren Präsenz im Abfallstrom, was die Notwendigkeit von effizienten Recyclingmethoden und angemessener Entsorgung unterstreicht. Aufgrund der steigenden Konsumzahlen steigen simultan auch die Abfallzahlen. Der Anstieg der Abfallmengen von Elektrogeräten ist vor allem auf technologische Entwicklungen und veränderte Konsumgewohnheiten zurückzuführen. Die Lebensspanne von Elektrogeräten verringert sich zunehmend. Ebenso ist die Lebensdauer von Lithium-Ionen-Akkus naturgemäß begrenzt. Diese erreichen typischerweise zwischen 500 und 800 Ladezyklen, was bei wöchentlichem Aufladen einer maximalen Nutzungsdauer von etwa 10 bis 15 Jahren entspricht. Angesichts einer begrenzten Lebensdauer und den potenziellen Gefahren, die von beschädigten

Batterien ausgehen, ist eine sorgfältige Handhabung im Umgang mit diesen hochenergetischen Zellen zwingend notwendig (Kurth et al., 2018).

Wenn Lithiumbatterien im Restmüll landen, können sie durch minimale Reibung oder einen Kurzschluss, der beispielsweise durch eine Beschädigung der Separatorfolie ausgelöst wird, leicht entzünden und schwer zu löschende Brände verursachen. Lithium reagiert stark mit Wasser und erzeugt neben ätzender Lithiumlauge (LiOH) auch entflammbaren Wasserstoff (H₂). Dies macht spezialisierte Löschmethoden erforderlich, die jedoch nicht immer erfolgreich sind, da Lithium den für die Verbrennung nötigen Sauerstoff selbst produzieren kann (Kurth et al., 2018).

In österreichischen Sortier- und Recyclinganlagen führen nicht korrekt entsorgte Akkus, die im Restmüll landen, regelmäßig zu Bränden. Daniel Fostner, Innovationsmanager bei Müller-Guttenbrunn, erläuterte diese Problematik während einer Führung durch das Betriebsgelände in Amstetten. Er berichtete, dass Brände durch Lithium-Ionen-Akkus zum Alltag gehören. Eine weitere Führung über das Gelände der Thermischen Abfallverwertung Wels der Energie AG Oberösterreich verdeutlichte die Tragweite dieses Problems: Mehr als 50% der Brandeinsätze sind auf nicht fachgerecht entsorgte Lithium-Akkus zurückzuführen.

Brände stellen nicht nur ein erhebliches Risiko für die Mitarbeiter dar, sondern verursachen auch einen wirtschaftlichen Schaden. Vor diesem Hintergrund ist ein rechtskonformer und sorgsamer Umgang mit Altbatterien entscheidend, ebenso wie die Sensibilisierung der Öffentlichkeit und der Industrie für korrekte Entsorgungspraktiken.

Müller-Guttenbrunn ist spezialisiert auf das Recycling von Elektroaltgeräten und setzt dabei die sogenannte Smasher-Technik ein. Ein Smasher ist eine rotierende Mischtrommel, die die kinetische Energie der fallenden Altgeräte nutzt, um die Gehäuse zu öffnen und die Materialien effizienter zu trennen und zu recyceln. Allerdings stellen fest verbaute Akkus, die durch diese Technik nicht entfernt werden können, ein anhaltendes Sicherheitsrisiko dar.

Jahr	IVS-Masse [t]	Sammelmasse [t]	Sammelquote [%]	Mindestsammelquote EU [%]
2011	3.614	1.738	50	-
2012	3.717	1.909	52	25
2013	3.892	1.976	53	25
2014	4.087	2.097	54	25
2015	4.547	2.299	55	25
2016	4.708	2.188	50	45
2017	4.746	2.117	45	45
2018	5.449	2.270	46	45
2019	5.760	2.376	45	45
2020	6.347	2.829	48	45
2021	6.139	2.770	46	45

Tabelle 1: Entwicklung der Inverkehrsetzung und Sammlung von Gerätebatterien in Österreich von 2011 bis 2021 (Neubauer et al., 2023)

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Inverkehrsetzung (IVS) und die Sammlung von Gerätealtbatterien in Österreich im Zeitraum von 2011 bis 2021. Sie zeigt die gesammelte Menge (Sammelmasse) sowie die Sammelquote, welche das Verhältnis der gesammelten Masse zur durchschnittlich in Verkehr gebrachten Masse der aktuellen und der beiden vorangegangenen Jahre darstellt.

Für das Jahr 2021 betrug die in Verkehr gebrachte Masse an Gerätealtbatterien 6.139 Tonnen. Davon wurden 2.770 Tonnen gesammelt, was einer Sammelquote von 46% entspricht. Diese Sammelquote zeigt, dass nur weniger als die Hälfte der in Verkehr gebrachten Batterien fachgerecht gesammelt wurden (Neubauer et al., 2023). Mehr als die Hälfte landen fälschlicherweise im Restmüll oder verbleiben ungenutzt in häuslichen Schubladen. In Zahlen ausgedrückt, landen zirka 1,4 Millionen Lithiumbatterien jährlich österreichweit im Restmüll (Hoepke, 2023).

Die in Österreich aktuell erreichte Sammelquote für Gerätebatterien beträgt nur 46%, was zeigt, dass noch erheblicher Handlungsbedarf besteht, um die zukünftigen Zielvorgaben der EU zu erfüllen: 63% bis zum 31. Dezember 2027 und 73% bis zum 31. Dezember 2030. Dies unterstreicht die dringende Notwendigkeit, die Bemühungen zur Steigerung der Sammel- und Recyclingraten in den kommenden Jahren signifikant zu intensivieren (Europäische Union, 2023).

2.4 Demontage

Schätzungen gehen davon aus, dass das weltweite Abfallaufkommen derzeit bei etwa 1,3 Milliarden Tonnen pro Jahr liegt und voraussichtlich bis 2025 auf rund 2,2 Milliarden Tonnen pro Jahr und bis 2050 auf 3,4 Milliarden Tonnen pro Jahr ansteigen wird. Besonders hervorzuheben ist der Bereich der WEEE, dass das am schnellsten wachsende Segment darstellt und eine breite Palette von Produkten umfasst. Das reicht von Smartphones bis hin zu Fernsehgeräten, die alle wertvolle und potenziell gefährliche Materialien enthalten. Jährlich werden in den USA und Europa 30 Millionen Computer und 100 Millionen Telefone ausgemustert und entsorgt. Für Produkte, die das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben, sollte das nicht das Ende ihres Lebenszyklus bedeuten. Ein Übergang zu einem zirkulären Materialflussmodell entspricht den Grundsätzen der Kreislaufwirtschaft, die auf Ressourcenschonung und Wiederverwertung abzielen. Aktuell liegt die weltweite Recyclingrate für WEEE nur bei 20%. Daher ist es zwingend notwendig, die bestehenden Einrichtungen zu untersuchen und die Recyclingbemühungen für WEEE zu verbessern. Der Recyclingprozess für Elektroschrott umfasst vier Hauptphasen: Sammlung, Sortierung und Demontage, die mechanische und chemische Aufbereitung und schließlich die Rückgewinnung von Rohstoffen. Die Demontage spielt hierbei eine entscheidende Rolle, da sie eine effektive Strategie zur Reduzierung der Umweltauswirkungen und zur Maximierung der Ressourceneffizienz darstellt. Der rapide technologische Fortschritt und die steigende Nachfrage nach neuer Elektronik haben zu einer Zunahme von Elektroschrott geführt, wodurch die Notwendigkeit, effiziente Recycling- und Wiederverwertungsprozesse zu entwickeln, immer dringlicher geworden ist (Lu et al., 2023).

„Unter Demontage versteht man die manuelle oder mechanisch unterstützte Zerlegung eines Altproduktes in Bauteile und/oder Werkstoffgruppen“ (Martens & Goldmann, 2016).

Insgesamt kann die Demontage in vier Aufgabenbereiche unterteilt werden:

1. Rückgewinnung funktionaler Bauteile wie Getriebe, Motoren sowie elektrische und elektronische Komponenten.
2. Entfernung von Schadstoffen wie Batterien, Kühlmittel, Öle und Gase.
3. Entnahme spezifisch recyclingfähiger Bestandteile wie bestimmter Stahlteile, NE-Metalle und Kunststoffe.
4. Reduzierung der Abfallmenge und Aufbereitung des Restabfalls für die weitere Behandlung (Martens & Goldmann, 2016).

Die Effektivität des Demontageprozesses hängt im Wesentlichen von drei Hauptfaktoren ab:

1. Die verwendete Verbindungstechnik beeinflusst entscheidend die technischen Möglichkeiten zur Demontage sowie die Effizienz des Materialaufschlusses durch angewandte Kraft. Verbindungstechniken lassen sich in drei Kategorien unterteilen:
 - Formschlüssige Verbindungen wie Nieten, Stifte, und Falzverbindungen, die mechanisch ineinandergreifen.
 - Kraftschlüssige Verbindungen wie Schraubverbindungen und Pressverbindungen.
 - Stoffschlüssige Verbindungen, zu denen Kleben, Löten und Schweißen zählen.
2. Die Anordnung und leichte Zugänglichkeit der Verbindungselemente spielen eine entscheidende Rolle für die einfache Trennung der Bauteile.
3. Die Materialkennzeichnung, vor allem bei großen Bauteilen, kann durch Technologien wie RFID-Tags unterstützt werden, um eine schnelle Identifikation und korrekte Trennung zu ermöglichen.

Im Hinblick auf die Demontage ist es zweckmäßig, Verbindungen in zwei Gruppen zu klassifizieren: lösbare und nicht-lösbare Verbindungen. Lösbare Verbindungen wie Schrauben und Pressverbindungen ermöglichen eine nicht-zerstörende Demontage, während bei nicht-lösbaren Verbindungen wie Kleb- und Lötverbindungen oft zerstörende Methoden wie Schneiden oder Trennschweißen erforderlich sind. Thermische Trennverfahren können bei Kleb- und Lötverbindungen eingesetzt werden, um Verbindungen durch Aufschmelzen oder thermische Zersetzung zu lösen (Martens & Goldmann, 2016).

2.4.1 Manuelle Demontage

Bei der manuellen Demontage kommen Handwerkzeuge und Techniken zum Einsatz, um Objekte oder Geräte auseinanderzunehmen. Die Fachkräfte müssen dabei jedes einzelne Teil und dessen Verbindungen genau untersuchen und identifizieren. Diese Methode setzt eine umfassende Schulung voraus, sowie Kenntnisse im sicheren Umgang mit den verschiedenen Werkzeugen, um Risiken während der Demontage zu minimieren. Bei der Demontage von EAG kommt häufig noch die manuelle Demontage zum Einsatz, hauptsächlich aufgrund der hohen Variabilität und Komplexität der Geräte (Lu et al., 2023). WEEE bestehen aus einer Vielzahl von Materialien und Komponenten, die auf komplexe Weise miteinander verbunden sind, was die automatisierte Demontage erschwert. Zudem unterscheiden sich Geräte oft erheblich in Größe, Form und Bauweise, was standardisierte automatische Prozesse nicht praktikabel macht. Fachkräfte demontieren diese Geräte per Hand, um Materialien gezielt zu separieren und für die Weiterverwendung vorzubereiten (Martens & Goldmann, 2016).

Die manuelle Demontage stellt jedoch auch hohe Anforderungen an die Arbeitssicherheit und Gesundheit der Beschäftigten und ist zeitaufwendiger und kostenintensiver als automatisierte Verfahren. Trotz der Fortschritte in der Automatisierungstechnologie und dem Einsatz von Robotern in der Demontage bleibt die manuelle Methode aufgrund der genannten Herausforderungen ein wesentlicher Bestandteil der WEEE-Recyclingindustrie (Lu et al., 2023).

2.4.2 Semi-automatische Demontage

Bei der semi-automatischen Demontage, auch bekannt als Hybrid-Demontage, werden Aufgaben aufgeteilt, sodass Menschen und automatisierte Systeme, wie Roboter zusammenarbeiten. Dies reduziert die körperliche Belastung für den Menschen und erhöht die Gesamteffizienz des Prozesses (Lu et al., 2023). In der Regel übernimmt der Mensch die größere Verantwortung bei der Entscheidungsfindung und der Prozesssteuerung, während Roboter sich auf wiederholende oder gefährliche Aufgaben konzentrieren. Es gibt auch schon semi-automatische Ansätze zur Batteriedemontage. Wegener et al. (2015) forschen an einer Batteriedemontagestation, bei der Menschen von Robotern unterstützt werden. Der Mensch übernimmt komplexere Aufgaben wie das Lösen von Verschlussmechanismen oder das Entfernen von Kabeln, während der Roboter beim Lösen von Schrauben und Bolzen hilft. Der Wechsel von Werkzeugen erfolgt automatisch durch kameragestützte Erkennung. Kollaborative Roboter, die durch Gesten und Sprachbefehle angelernet werden können, bieten ein vielversprechendes Potenzial, um die Demontageprozesse zu unterstützen (Wegener et al., 2015).

2.4.3 Automatisierte Demontage

Bei der automatisierten Demontage handelt es sich um eine vollautomatische Demontagemethode, bei der in erster Linie Geräte und Roboter zum Einsatz kommen und keine oder nur eine begrenzte menschliche Beteiligung erforderlich ist. Die Vollautomatisierung der Demontage hat die Vorteile hoher Effizienz, hoher Sicherheit, guter Wiederholbarkeit und hoher Präzision (Kurth et al., 2018). Die vollständige Automatisierung von Elektroschrott-Demontageprozessen steckt jedoch noch in den Kinderschuhen, insbesondere bei hochkomplexen Produkten. Technische Lücken bestehen darin, dass das Demontagesystem in der Lage sein muss, zu erkennen, selbst zu lernen und zu planen, um mit dem komplizierten Elektroschrott umzugehen, anstatt vorgegebene repetitive Aktionen durchzuführen (Lu et al., 2023).

Vollautomatische Smartphone-Demontage

Forscher aus Japan haben eine automatisierte Hochgeschwindigkeits-Demontage für Smartphones entwickelt. Die Herausforderungen dieses Systems sind: das Lösen der mit Klebstoff befestigten Akkus, die Unterschiede in der internen Struktur von

Smartphones je nach Hersteller und Typ sowie die Notwendigkeit eines bevorzugten Bruchs, der die Schrauben löst, ohne den Akku zu beschädigen. Um das Problem des Klebstoffs zu überwinden, verwendet das System eine Methode des Einfrierens der Smartphones, um den Klebstoff der Batterie effektiv zu deaktivieren. Zusätzlich wird ein Röntgenscan in Kombination mit Deep Learning verwendet, um die internen Strukturen der Smartphones zu analysieren, was die Identifizierung der optimalen Punkte für die Demontage erleichtert, ohne dass Konstruktionsinformationen von den Herstellern benötigt werden. Derzeit liegt der Durchsatz des Systems bei etwa 600 Einheiten pro Stunde, wobei die Erfolgsquote bei der Demontage im Durchschnitt 88,3% beträgt, wie experimentell anhand von 1213 Smartphones verschiedener Typen und Hersteller bestätigt wurde. Die Erfolgsquote bei der Demontage variierte stark und hing von den einzelnen Smartphone-Herstellern ab. In Kombination mit der aktuellen Sensortechnologie, die eine automatische Bestimmung des Herstellers ermöglicht, können somit Betriebsstrategien für Recyclinganlagen entwickelt werden (Ueda et al., 2024).

3 Regulatorischer Rahmen

Um der zunehmenden Umweltverschmutzung entgegenzuwirken und den Ressourcenverbrauch zu reduzieren, hat die Europäische Union einige Maßnahmen ins Leben gerufen. Dieses Kapitel behandelt, wie dieser umfassende Plan darauf abzielt, den Klimaschutz zu stärken und eine nachhaltige Wirtschaftsweise durch die Förderung der Kreislaufwirtschaft zu etablieren. Dabei wird die Forschungsfrage SQ1 beantwortet und das Forschungsziel O1 erreicht.

3.1 Der Europäische Green Deal

Ende 2019 präsentierte die Europäische Union (EU) den European Green Deal, ein umfangreiches Aktionsprogramm, das darauf abzielt, Europa bis 2050 als ersten klimaneutralen Kontinent zu etablieren und die Transition zu einer nachhaltigen und ressourcenschonenden Wirtschaftsweise zu beschleunigen. Dieses ambitionierte Programm setzt Schwerpunkte auf die Förderung erneuerbarer Energien, die Erhöhung der Energieeffizienz sowie die Verbesserung der Luft- und Wasserqualität. Zur Erreichung dieser Ziele sieht die EU beträchtliche Investitionen in den kommenden Jahren vor, die nicht nur das Wirtschaftswachstum ankurbeln, sondern auch neue Arbeitsplätze schaffen und die internationale Wettbewerbsfähigkeit Europas stärken sollen (Reinstaller et al., 2022).

EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft

Im März 2020 hat die EU als Teil des Green Deals den überarbeiteten Aktionsplan "Für ein sauberes und wettbewerbsfähigeres Europa" vorgestellt, der speziell auf die Förderung der Kreislaufwirtschaft ausgerichtet ist. Dieser Plan zielt darauf ab, nachhaltige und zirkuläre Produkte im europäischen Binnenmarkt zur Norm zu machen. Durch die Initiative für eine nachhaltige Produktpolitik wird angestrebt, dass Produkte in der EU so gestaltet sind, dass sie langlebiger sind und einfacher wiederverwendet, repariert und recycelt werden können. Sie sollen auch einen hohen Anteil an recycelten Materialien beinhalten. Der Aktionsplan konzentriert sich insbesondere auf Branchen mit hohem Ressourcenverbrauch und Verbesserungspotenzial in ihren Kreislaufprozessen, wie die Elektronik- und IKT-Branche, Batterien und Fahrzeuge, Verpackungen, Kunststoffe, Textilien, das Bauwesen, die Mobilität, die Abfallwirtschaft und die Lebensmittelindustrie. Die EU-Kommission erarbeitet derzeit ein europaweites Modell für Abfalltrennung und Kennzeichnung zur Förderung der Abfallvermeidung (Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft, 2022).

3.2 Gesetzesvorgaben in der EU und in Österreich

Die WEEE-Richtlinie 2012/19/EU bildet die gesetzliche Grundlage für den Umgang mit EAG in der EU. Diese Richtlinie strebt die Verringerung schädlicher Umweltauswirkungen durch Elektro- und Elektronik-Altgeräte an und fördert deren Wiederverwendung und Recycling.

Die WEEE-Richtlinie unterstützt die Kreislaufwirtschaft, indem sie vorschreibt, dass alle auf den Markt gebrachten Elektro- und Elektronikgeräte nach Gebrauch ordnungsgemäß entsorgt oder recycelt werden müssen. Außerdem verbietet sie unnötige Bruchstellen in der Konstruktion der Geräte, um den Einsatz von Sollbruchstellen ohne funktionellen Nutzen zu verhindern. Darüber hinaus sind gemäß der Richtlinie Sammelquoten für Elektroschrott festgelegt, die die EU-Mitgliedsstaaten erreichen müssen. Seit 2019 müssen die Mitgliedsstaaten eine Mindestsammelquote von 65% des durchschnittlichen Gewichts der in den drei vorangegangenen Jahren in Verkehr gebrachten Elektro- und Elektronikgeräte erfüllen. Die Mitgliedsstaaten sind ebenfalls verpflichtet, die kostenfreie Rücknahme von Altgeräten durch die Vertreiber zu gewährleisten und eine sachgemäße Behandlung der gesammelten Geräte sicherzustellen, einschließlich der Entfernung aller Flüssigkeiten und der selektiven Behandlung spezifisch schädlicher Bestandteile. Die Richtlinie schreibt weiter vor, dass je nach Gerätekategorie 55 bis 80% der jährlich gesammelten Altgeräte-Masse zur Wiederverwendung vorbereitet oder recycelt werden müssen, um den Vorgaben der Richtlinie zu entsprechen (Baldé et al., 2020).

Der österreichische rechtliche Rahmen für die Abfallwirtschaft wird durch das Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG, 2002) und die Elektroaltgeräteverordnung (EAG-VO, 2005) ergänzt. Diese Gesetze spezifizieren die EU-Richtlinien weiter und regeln die Abfallbewirtschaftung einschließlich der Entsorgung von EAG. Das Abfallwirtschaftsgesetz zielt darauf ab, Abfallvermeidung und Recycling zu fördern und eine effiziente Ressourcennutzung zu gewährleisten. Es betont die lokale Behandlung von Abfällen zur Reduzierung von Transportemissionen und zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft. Ergänzend dazu stellt die Elektroaltgeräteverordnung (EAG-VO, 2005) spezifische Anforderungen an die Sammlung, Behandlung und das Recycling von EAG.

3.2.1 Ökodesign-Richtlinie

Die Ökodesign-Richtlinie der EU, ursprünglich im Jahr 2009 eingeführt, ist ein zentrales Element der europäischen Bestrebungen, Umweltbelastungen durch die Verringerung des Energieverbrauchs und die Steigerung der Nachhaltigkeit von Produkten zu reduzieren. Diese Richtlinie legt Mindestanforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte fest, um sicherzustellen, dass diese während ihrer gesamten Lebensdauer eine möglichst

geringe Umweltbelastung verursachen. Sie deckt eine breite Palette von Produkten ab, von Haushaltsgeräten wie Kühlschränken und Waschmaschinen bis hin zu professionellen Geräten und zielt darauf ab, deren Energieeffizienz und Reparierbarkeit zu verbessern (Martens & Goldmann, 2016).

Die neueste Version der EU-Ökodesign-Richtlinie dehnt nun die Vorschriften auf nahezu alle in der EU vertriebenen Produkte aus, mit einem verstärkten Fokus auf ökologische Nachhaltigkeit. Kernmerkmale dieser Aktualisierung sind die Integration kreislauforientierter Produktdesignprinzipien, die auf Langlebigkeit, Reparaturfähigkeit und Energieeffizienz abzielen. Besonders hervorzuheben ist die Einführung eines digitalen Produktpasses, der transparente Informationen über die Umweltverträglichkeit von Produkten liefert (New Proposals to Make Sustainable Products the Norm, 2022).

Die wichtigsten Neuerungen im Überblick:

- Garantierte Reparatur: Produkte sind so zu konzipieren, dass sie problemlos mit erhältlichen Komponenten über einen festgesetzten Zeitraum hinweg reparierbar sind.
- Zugänglichkeit von Ersatzteilen: Es ist sicherzustellen, dass Produkte standardmäßig und ohne spezielle Werkzeuge instand gesetzt werden können.
- Zeitrahmen für die Bereitstellung von Ersatzteilen: Alle erforderlichen Ersatzteile müssen innerhalb von fünfzehn Werktagen zur Verfügung stehen.
- Zugang zu Reparaturinformationen: Anleitungen zur Wartung und Reparatur müssen unter gerechten Bedingungen für Fachkräfte zugänglich sein.
- Markierung für die Recyclbarkeit: Materialien, die besondere Anforderungen an das Recycling stellen, sind klar zu kennzeichnen (Europäische Kommission, 2023a).

Ab dem 20. Juni 2025 tritt eine speziell für Mobiltelefone, Smartphones und Tablets ausgelegte Ökodesign-Richtlinie in Kraft. Die Ökodesign-Richtlinie 2022/0095 (COD) legt neue Anforderungen an die Hersteller von Smartphones und Tablets fest, um deren Nachhaltigkeit zu erhöhen. Sobald Geräte auf den Markt gebracht werden, müssen Hersteller regelmäßige Updates für mindestens fünf Jahre anbieten. Zudem sind detaillierte Informationen über die Beschaffenheit dieser Geräte bereitzustellen. Eine zentrale Vorgabe der Verordnung ist die Gewährleistung, dass spezifische Ersatz- und Bauteile für Smartphones fünf Jahre und für Tablets sechs Jahre nach dem letzten Verkauf für Reparaturen zur Verfügung stehen müssen. Zusätzlich müssen die Hersteller sicherstellen, dass Reparaturanleitungen für die Geräte über diesen Zeitraum hinaus zugänglich bleiben, um die Reparaturfähigkeit und damit die Lebensdauer der Geräte zu verlängern (Europäische Kommission, 2023a).

Eine besondere Bedingung ist die Austauschbarkeit der Akkus. Wenn dies nicht möglich ist, müssen die Akkus:

- nach 500 Ladezyklen noch mindestens 83% und
- nach 1000 Ladezyklen mindestens 80% ihrer ursprünglichen Kapazität aufweisen.

Zusätzlich müssen Smartphones ohne austauschbaren Akku den IP67-Standard für Staub- und Wasserdichtigkeit erfüllen (IVy, 2023). Die IP67-Zertifizierung gewährleistet, dass ein Gerät vollständig staubdicht ist und zudem Schutz bei kurzzeitigem Eintauchen bietet, wobei es bis zu 30 Minuten in bis zu einem Meter Wassertiefe wasserdicht bleibt (Was Hat Es Mit Den IP67- Und IP68-Zertifizierungen Auf Sich? | Samsung Schweiz, 2021). Eine weitere Anforderung ist die Anbringung eines Energieetiketts, das Auskunft über Energieeffizienz, Batterielebensdauer, Wasser- und Staubschutz sowie die Widerstandsfähigkeit gegen Sturzschäden gibt (IVy, 2023).

3.2.2 Recht auf Reparatur

Am 30. Juli 2024 ist die neue „Recht auf Reparatur“-Richtlinie (2024/1799) als Teil des Europäischen Grünen Deals zur Förderung der Kreislaufwirtschaft in Kraft getreten und ergänzt die Ökodesign-Verordnung. Die Richtlinie muss in Österreich bis 31. Juli 2026 in nationales Recht umgesetzt werden und bringt zahlreiche neue Anforderungen an den Warenverkehr mit sich.

Das Recht auf Reparatur ermöglicht Verbraucherinnen und Verbrauchern defekte Produkte einfacher reparieren zu lassen, anstatt sie zu ersetzen. Es umfasst sowohl elektronische Geräte wie Smartphones und Tablets als auch Haushaltsgeräte wie Waschmaschinen, Trockner, Geschirrspüler, Kühlgeräte und Staubsauger. Die gesetzlichen Vorgaben verpflichten Hersteller dazu, Ersatzteile für eine festgelegte Dauer bereitzustellen und die Verfügbarkeit von Reparaturanleitungen sicherzustellen (Europäische Kommission, 2023c).

Die Regelung umfasst unter anderem folgende Maßnahmen:

- Reparaturen müssen stets durchgeführt werden.
- Der Austausch von Geräten kann erfolgen, wenn dies kosteneffektiver als die Reparatur ist.
- Das Recht auf Reparatur bleibt auch nach Ablauf der Gewährleistung bestehen, wobei die Kosten dann von den Verbrauchern zu tragen sind.
- Reparaturbetriebe und Hersteller sind verpflichtet, einen standardisierten Kostenvoranschlag zu erstellen.

- Alle EU-Mitgliedstaaten müssen eine Vermittlungsplattform mit einer Liste zugelassener Reparaturbetriebe bereitstellen (Europäische Kommission, 2023c).

3.3 Überblick über die EU-Batterieverordnung

Die EU-Batterieverordnung (2023/1542) markiert einen bedeutenden Schritt in Richtung einer nachhaltigeren Gestaltung und Nutzung von Batterien innerhalb der Europäischen Union. Diese Verordnung wurde ins Leben gerufen, um die ökologischen Auswirkungen von Batterien über ihren gesamten Lebenszyklus zu minimieren und eine umfassende Kreislaufwirtschaft für Batteriematerialien zu fördern. Sie legt strengere Regeln für die Herstellung, das Recycling und die Entsorgung von Batterien fest und zielt darauf ab, die Umweltbelastungen zu reduzieren, die mit der Produktion und dem Verbrauch von Batterien verbunden sind. Durch die Einführung dieser Verordnung soll sichergestellt werden, dass Batterien nicht nur sicherer und nachhaltiger, sondern auch effizienter im Hinblick auf die Ressourcennutzung und -rückgewinnung, sind (Europäische Union, 2023).

Für diese Diplomarbeit und daher auch für die Entwicklung des Bewertungsmodells ist die wichtigste Neuerung der Batterieverordnung der Artikel 11 zur **„Entfernbarkeit und Austauschbarkeit von Gerätebatterien und LV-Batterien“**:

Artikel 11 der neuen EU-Verordnung (gültig ab dem 18. Februar 2027) schreibt vor, dass Gerätebatterien so gestaltet sein müssen, dass Endnutzer diese während der gesamten Lebensdauer des Produkts einfach entfernen und austauschen können. Eine Batterie gilt als entfernbar, wenn sie mithilfe handelsüblicher Werkzeuge aus dem Produkt entfernt werden kann. Die Verwendung von Spezialwerkzeugen ist nur zulässig, wenn diese kostenlos bereitgestellt werden. Herstellerspezifische Werkzeuge, Wärmeenergie oder Lösungsmittel dürfen für die Demontage nicht erforderlich sein. Darüber hinaus sind Hersteller verpflichtet, Betriebsanleitungen für das Entfernen der Akkus sowie Sicherheitsinformationen sowohl in physischer Form als auch online bereitzustellen (Europäische Union, 2023).

Die EU-Verordnung definiert „Gerätebatterien“ als Batterien, die verschlossen sind, weniger als 5 kg wiegen, nicht speziell für industrielle Anwendungen konzipiert sind und weder zu Batterien für Elektrofahrzeuge noch zu leichten Transportmitteln oder Starterbatterien gehören. Diese Verordnung erstreckt sich auf eine breite Palette elektronischer Geräte, einschließlich Smartphones, Tablets, Notebooks und Smartwatches (Europäische Union, 2023).

Gemäß der Verordnung gibt es auch Ausnahmen, so dass bestimmte Produkte so gestaltet sein können, dass deren Batterien ausschließlich von Fachkräften entfernt und ersetzt werden dürfen. Dies betrifft Geräte, die speziell für den Einsatz unter

extremen Wasserbedingungen wie Spritz-, Strahl- oder Unterwasser konzipiert sind, sowie hochspezialisierte medizinische Geräte. Diese Ausnahmeregelung wird nur dann angewandt, wenn sie zur Gewährleistung der Sicherheit des Nutzers und des Geräts unbedingt erforderlich ist (Europäische Union, 2023).

Die weiteren Neuerungen im Detail:

- **Neue Kategorien von Batterien:** Zusätzlich zu den bestehenden Kategorien wie Geräte-, Fahrzeug- und Industriebatterien führt man zwei neue Arten ein: Batterien für Elektrofahrzeuge (EV) und für leichte Transportmittel (LTM), auch bekannt als Light Means of Transport, zu denen E-Bikes und E-Scooter gehören. Dies erweitert die Gesamtzahl der Batterietypen auf fünf (Europäische Union, 2023).
- **Kostenlose Rücknahme von Batterien:** In Zukunft sind Hersteller verpflichtet (Artikel 59), Batterien für leichte Transportmittel und Elektrofahrzeuge sowie Starter- und Industriebatterien nach einer Übergangszeit kostenfrei von den Endnutzern zurückzunehmen und zu entsorgen. Dies galt bisher nur für Gerätebatterien. Ziel ist es, den Besitzern alter Batterien die fachgerechte Entsorgung zu erleichtern (Europäische Union, 2023).
- **Verstärkte Sorgfaltspflichten für Großunternehmen:** Großunternehmen müssen die Auswirkungen ihrer Aktivitäten in Bezug auf die Beschaffung, Verarbeitung und den Handel mit Batterierohstoffen auf Menschen und Umwelt durch eine Due-Diligence-Richtlinie (Artikel 47) berücksichtigen. Zudem ist sicherzustellen, dass betroffene Personen in den Lieferketten Zugang zu Mechanismen für Beschwerden und Entschädigungen haben (Europäische Union, 2023).
- **Neue Kennzeichnungsanforderungen und digitaler Batteriepass:** Batterien müssen zukünftig mit neuen Labels und einem QR-Code versehen sein. Dieser QR-Code dient dazu, Verbraucher über Kapazität, Leistung, Lebensdauer, chemische Zusammensetzung und Entsorgungspflichten zu informieren. Für Batterien, die in leichten Transportmitteln und Elektrofahrzeugen sowie in industriellen und gewerblichen Anwendungen mit mindestens 2 Kilowattstunden (kWh) Leistung verwendet werden, wird ein digitaler Batteriepass (Artikel 77) eingeführt. Dieser Pass enthält Details zum Batteriemodell, den verwendeten Rohstoffen, der Nutzung und weiteren Daten, um das Recycling zu optimieren (Europäische Union, 2023).
- **Neue Sammelziele für Batterien:** Die Sammelquoten (Artikel 59) für Gerätebatterien werden angehoben, wobei das Ziel bei 63% bis 2027 und bei 73% bis 2030 liegt. Für Batterien leichter Transportmittel sind die Ziele auf 51% bis 2028 und 61% bis 2031 festgelegt (Europäische Union, 2023).
- **Vorgaben zur Recyclingeffizienz:** Für verschiedene Batteriearten werden Mindesteffizienzzraten für Recyclingprozesse festgelegt. Diese bestimmen das

Verhältnis der aus Altbatterien zurückgewonnenen Sekundärrohstoffe zur Gesamtmasse der recycelten Batterien. Bis Ende 2025 müssen folgende Effizienzzraten erreicht werden: 75% bei Blei-Säure-Batterien, 65% bei Lithium-basierten Batterien, 80% bei Nickel-Cadmium-Batterien und 50% bei anderen Batteriearten. Bis Ende 2030 steigen die Anforderungen für Blei-Säure-Batterien auf 80% und für Lithium-basierte Batterien auf 70% (Europäische Union, 2023).

- **Rezyklat-Einsatzquoten:** 96 Monate nach Inkrafttreten der Verordnung (2031) wird von Elektrofahrzeug-, Starter- und Industriebatterien gefordert, bestimmte Mindestwerte von Recyclingmaterial einzusetzen: 16% für Kobalt, 85% für Blei sowie 6% für Lithium und Nickel. Diese Werte erhöhen sich nach 156 Monaten (2036) auf 26% für Kobalt, 12% für Lithium und 15% für Nickel und werden dann auch für Batterien leichter Transportmittel gefordert (Europäische Union, 2023).
- **Vorgaben zur Materialrückgewinnung:** Die neuen Bestimmungen (Artikel 71) sehen vor, dass bis zum 31. Dezember 2027 alle Recyclingverfahren für Kobalt, Kupfer, Blei und Nickel eine Mindestrückgewinnungsquote von 90% erreichen müssen. Für Lithium ist bis zu diesem Datum eine Quote von 50% gefordert. Bis zum 31. Dezember 2031 müssen dann 95% der genannten Metalle und 80% des Lithiums aus Altbatterien wiedergewonnen werden (Europäische Union, 2023).
- **CO₂-Fußabdruckgrenzen für Batterien:** In den nächsten Jahren wird die Europäische Kommission maximale Schwellenwerte für den CO₂-Fußabdruck über den gesamten Lebenszyklus von Batterien für Elektrofahrzeuge, wiederaufladbare Industriebatterien und Batterien für leichte Transportmittel festlegen (Artikel 7). Batterien, die diese festgelegten Grenzwerte überschreiten, dürfen dann nicht mehr in Europa in den Verkehr gebracht werden (Europäische Union, 2023).
- **Überprüfung des Verbots von Einwegbatterien:** Bis zum Ende des Jahres 2030 wird die Europäische Kommission beurteilen, ob nicht-wiederaufladbare Batterien (Artikel 9) innerhalb der EU verboten werden sollen (Europäische Union, 2023).

4 State of the Art

Aufbauend auf den in den vorherigen Kapiteln dargestellten theoretischen und rechtlichen Grundlagen wird in diesem Kapitel eine SLR durchgeführt, die darauf abzielt, alle relevanten Parameter zu identifizieren, die für die Entwicklung eines Bewertungsmodells zur Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones von Bedeutung sind. Der Schwerpunkt liegt darauf, herauszuarbeiten, welche Kriterien und Indikatoren in ein solches Bewertungsmodell integriert werden sollten, um die Demontageprozesse präzise und effizient zu bewerten und somit aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Diese umfassende Analyse schafft eine fundierte Grundlage für die Entwicklung des Bewertungssystems und ermöglicht die Beantwortung der Teilforschungsfrage SQ2 sowie das Erreichen der Forschungsziele O2 und O3.

4.1 Beschreibung der Methode

Für die systematische Literaturrecherche wird der methodische Ansatz von Kitchenham BA & S. Charters (2007) gewählt. Dieser Ansatz strukturiert die Recherche in drei Hauptphasen: Planung, Durchführung und Berichterstattung. Diese Methodik ist besonders geeignet, um eine systematische, transparente und nachvollziehbare Analyse der Literatur zu gewährleisten.

1. Planungsphase:

1.1 Erforderlichkeit einer systematischen Literaturrecherche: Eine systematische Literaturrecherche ist unerlässlich, um alle verfügbaren Informationen umfassend und neutral zu erfassen. Dieser Ansatz gewährleistet, dass eine gründliche und unvoreingenommene Arbeitsweise sichergestellt wird, was besonders bei der Verarbeitung großer Datenmengen notwendig ist. Auf diese Weise wird es ermöglicht, über die Ergebnisse einzelner Studien hinauszugehen und verallgemeinerbare Schlussfolgerungen zu ziehen, die eine solide Grundlage für weiterführende Forschung und praxisrelevante Anwendungen bieten (Tranfield et al., 2003).

1.2 Formulierung der Forschungsfragen: Die Forschungsfragen sind zentral für den gesamten Überprüfungsprozess. Dadurch wird bestimmt, wie die Literatursuche gestaltet wird, welche Daten extrahiert werden müssen und wie diese analysiert werden, um die Forschungsfragen zu beantworten (Kitchenham BA & S. Charters, 2007).

1.3 Protokollerstellung: Ein detailliertes Überprüfungsprotokoll wird festgelegt, um die methodische Konsistenz des Forschungsprozesses zu gewährleisten. Die Erstellung eines Protokolls dient als Fundament der Literaturrecherche. (Kitchenham BA & S. Charters, 2007) Als Rechercheprotokoll für diese Arbeit

wurde der gesamte Suchprozess präzise und systematisch in einem Excel-Dokument festgehalten.

2. **Durchführungsphase:** Das Ziel einer systematischen Überprüfung besteht darin, eine objektive Suchstrategie anzuwenden, um eine umfassende Sammlung von Primärstudien zu identifizieren, die relevant zur gestellten Forschungsfrage sind. Die gesamte Literatur wird anschließend in einem mehrstufigen Prozess gesichtet, um zu bestimmen, ob die Literatur zur Beantwortung der Forschungsfragen beiträgt. Der Auswahlprozess beginnt mit der Sichtung der Titel, setzt sich fort mit einer detaillierten Untersuchung der Abstracts. Zum Abschluss des Auswahlprozesses wird die Literatur entweder vollständig oder in relevanten Kapiteln gelesen, um ihre Eignung eingehend zu beurteilen (Booth et al. 2016).
3. **Berichtsphase:** In der finalen Phase erfolgt die sorgfältige Extraktion der Daten aus der ausgewählten Literatur und eine umfassende Zusammenfassung der Ergebnisse (Kitchenham BA & S. Charters, 2007).

4.2 Systematische Literatursuche

Um die Relevanz und Anwendbarkeit des entwickelten Bewertungsmodells zu gewährleisten, war die Einbeziehung einer umfassenden Literaturrecherche von zentraler Bedeutung, um alle relevanten Parameter und Kriterien für die Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones zu identifizieren. Hierfür wurden akademische Datenbanken wie ScienceDirect und Google Scholar sowie praxisorientierte Suchen über Google genutzt. Die Suche über Google erwies sich als besonders kritisch, da die Reparaturfähigkeit von Produkten derzeit intensiv diskutiert wird und Plattformen wie „iFixit“ entscheidende Einblicke bieten. Besonderes Augenmerk wurde auf technische Berichte der Europäischen Kommission sowie auf Verordnungen und Richtlinien der EU gelegt, um ein fundiertes Verständnis der regulatorischen Anforderungen und Diskussionen zu gewinnen.

Die Literatursuche zielte darauf ab, eine umfassende Sammlung von Quellen zum Thema "Bewertungsmodell für die Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones" zu gewinnen.

Ausgehend von der Subforschungsfrage SQ2 wurden relevante Schlüsselbegriffe für die Recherche identifiziert und unter Verwendung Boolescher Operatoren zu einem Suchstring kombiniert:

((„Bewertungsmodell“ OR „Bewertung“ OR „Modell“ OR „Indikatoren“ OR „Punktesystem“) AND („Demontage“ OR „Recyclingfähigkeit“ OR „Reparaturfähigkeit“) AND („Smartphones“ OR „EEE“))

Um eine gründliche Erfassung relevanter Literatur zu sichern, wurden erweiterte Terminologien in den Suchstrategien verwendet. Der Suchbegriff "Bewertungsmodell" wurde um Termini wie "Bewertung", "Modell", "Indikatoren" und "Punktesystem" (Scoring System) ergänzt, um eine breitere Abdeckung relevanter Forschungsarbeiten zu gewährleisten. Zusätzlich wurde der Fokus von der spezifischen Demontage von Smartphones auf allgemeinere Aspekte wie „Recyclingfähigkeit“ und "Reparaturfähigkeit" ausgeweitet und das Suchfeld von Smartphones auf eine breitere Kategorie von EEE erweitert.

Die Einschlusskriterien der Recherche fokussierten sich vor allem auf Quellen, die online zugänglich waren, um eine breite und unmittelbare Verfügbarkeit zu gewährleisten.

Inklusionskriterien:

- Zeitraum: 01.01.2000 bis 13.09.2024
- Zugriff: online verfügbar
- Sprachen: Deutsch und Englisch
- Quellenarten: Journals, Peer-reviewed Artikel, EU-Verordnungen, Technische Berichte, Internetplattformen
- Publikationsphase: Final

Ausschlusskriterien:

- Fehlender Bezug auf Bewertungsmodelle für Demontage, Reparierbarkeit, Recyclingfähigkeit mit Fokus auf Smartphones und EEE
- Publikationen, die sich auf nicht übertragbare Produktgruppen beziehen, wie etwa Fahrzeugbatterien
- Studien, die keine technischen Bewertungsmodelle oder spezifische Indikatoren enthalten

Die systematische Literaturrecherche berücksichtigte Studien aus dem Zeitraum 01.01.2000 bis 13.09.2024, die online verfügbar sowie in Deutsch oder Englisch verfasst sind. Eingeschlossen wurden Journals, peer-reviewte Artikel, EU-Verordnungen und technische Berichte in finaler Publikationsphase.

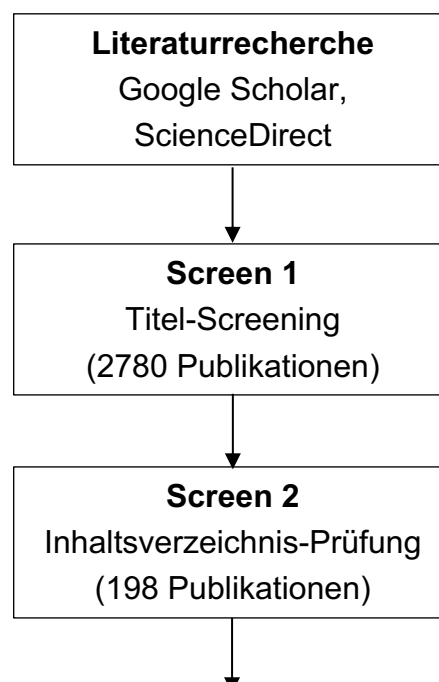
Ausgeschlossen wurden Publikationen ohne Bezug zu Bewertungsmodellen für Demontage, Reparierbarkeit oder Recyclingfähigkeit Smartphones und EEE sowie Studien zu nicht übertragbaren Produktgruppen wie Fahrzeugbatterien oder ohne technische Bewertungsmodelle und spezifische Indikatoren.

4.3 Systematische Literaturanalyse

In der systematischen Literaturanalyse wird eine Kombination methodischer Ansätze genutzt, um fundierte Ergebnisse zu erzielen. Zunächst erfolgt eine umfassende Suche in den festgelegten Datenbanken unter Verwendung spezifischer Suchbegriffe, um einen initialen Überblick über die relevante Literatur zu gewinnen, wie von Booth et al. (2016) beschrieben. Anschließend wird das sogenannte "Trichterprinzip" angewendet, welches eine systematische Filterung der ermittelten Literatur ermöglicht und somit die Menge der zu analysierenden Quellen signifikant reduziert. Dieser Prozess umfasst mehrere Stufen:

- **Titel-Screening:** Eine erste Beurteilung erfolgt durch Sichten der Titel, um offensichtlich irrelevante Studien auszuschließen.
- **Inhaltsverzeichnis-Prüfung:** Anschließend werden die Inhaltsverzeichnisse der verbliebenen Werke geprüft, um die Eignung weiter zu bewerten.
- **Abstract-Analyse:** Die Abstracts der Publikationen werden analysiert, um deren Relevanz bezüglich der Forschungsfrage festzustellen.
- **Volltext-Lektüre:** Schließlich werden die vielversprechendsten Quellen im Volltext gelesen, um detaillierte Einsichten und Daten für die Analyse zu extrahieren.

Nach der Identifikation relevanter Literatur durch systematisches Screening wird der „Forward Search“ Ansatz, beschrieben von Webster und Watson (2002), angewendet. Dieser Ansatz konzentriert sich darauf, weitere Literatur zu identifizieren, die bereits als relevant eingestufte Quellen zitiert. Die Anwendung der Webster und Watson Methode auf diese selektierten Quellen erhöht die Wahrscheinlichkeit, zusätzliche relevante Literatur zu entdecken.



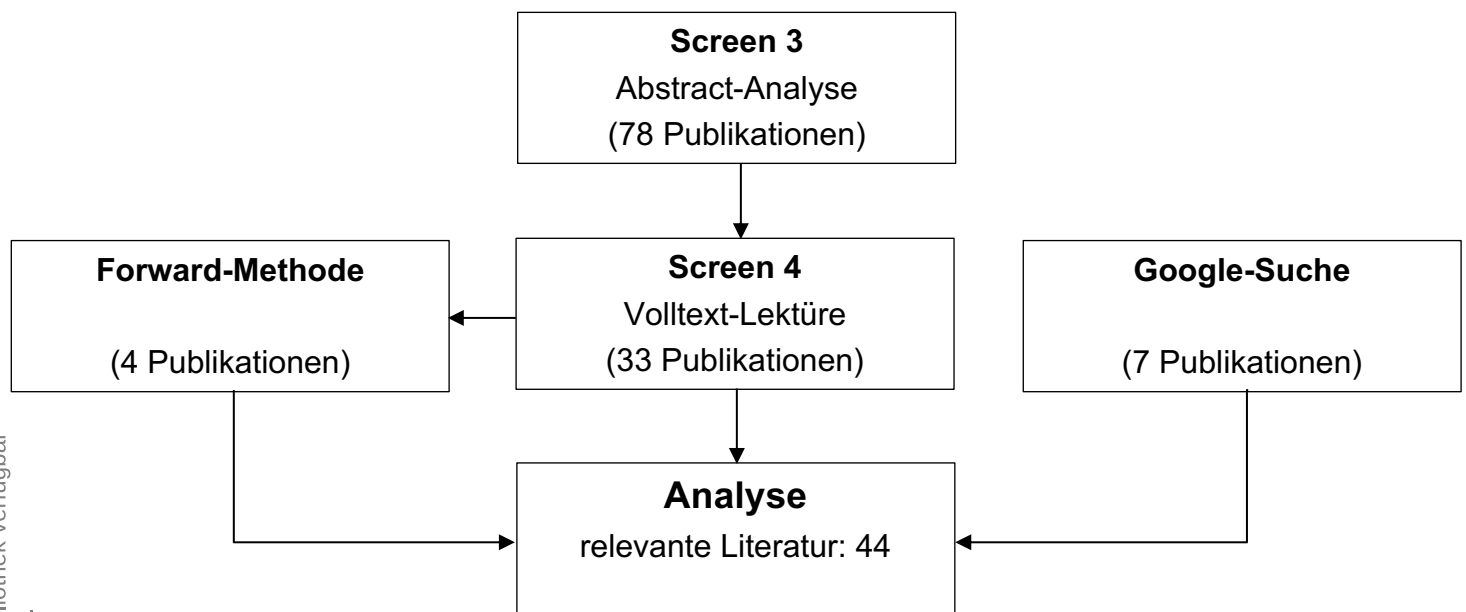


Abbildung 7: Zusammenfassung der SLR

Booth et al. (2016) betonen, dass ein mehrstufiger Ansatz hilft, den Prozess zu strukturieren und sicherzustellen, dass alle relevanten Quellen berücksichtigt werden, während gleichzeitig irrelevante Literatur effizient aussortiert wird.

4.4 Ergebnisse der Literaturanalyse

Die Ergebnisse der Literaturanalyse basieren auf der Durchführung der SLR. In Tabelle 2 sind die als relevant identifizierten Literaturquellen aufgeführt und fortlaufend nummeriert, wobei die Nummerierung von L1 bis L44 reicht. Die Literaturquellen wurden anschließend in thematische Kategorien (K1–K4) eingeordnet.

K1: Wesentliche Kriterien eines Bewertungssystems zur Reparierbarkeit

Nr.	Autoren	Titel
1	(Bracquené et al., 2018)	Repairability criteria for energy related products
2	(Mauro et al., 2019)	Analysis and development of a scoring system for repair and upgrade of products
3	(Ritthoff et al., 2021)	Methoden und Normen zur Bewertung der Reparierbarkeit von Elektro- und Elektronikgeräten

K2: Bewertungsmodelle und Indikatoren für die Reparierbarkeit von Smartphones

4	(Cordella et al., 2020)	Durability of smartphones: A technical analysis of reliability and repairability aspects
---	-------------------------	--

5	(Schischke et al., 2022)	Durability, reparability and recyclability: Applying material efficiency standards EN 4555x to mobile phones and tablet computers
6	(Flipsen et al., 2019)	Smartphone Reparability Scoring: Assessing the Self-Repair Potential of Mobile ICT Deives
7	(Suovanen, 2024)	iFixit
8	(Europäische Kommission, 2023a)	VERORDNUNG (EU) 2023/1670 DER KOMMISSION vom 16. Juni 2023 zur Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an Smartphones, Mobiltelefone, die keine Smartphones sind, schnurlose Telefone und Slate-Tablets gemäß der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Änderung der Verordnung (EU) 2023/826 der Kommission
9	(Europäische Kommission, 2023b)	DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) 2023/1669 DER KOMMISSION vom 16. Juni 2023 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2017/1369 des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Energieverbrauchskennzeichnung von Smartphones und Slate-Tablets
10	(Prakash et al., 2016)	Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen" Obsoleszenz "
11	(Roithner et al., 2021)	Ein neuer Weg zur Bewertung der Recyclingfähigkeit von Produkten mittels Statistischer Entropie: Fallbeispiel Mobiltelefone
12	(Mauro et al., 2020)	Guidance of the Assessment of Material Efficiency: Application of Smartphones
13	(Barros & Dimla, 2023)	Smartphone reparability indexes in practice: Linking repair scores to industrial design features

K3: Bewertungsmodelle und Indikatoren für die Reparierbarkeit von EEE

14	(Rodríguez et al., 2023)	Analysis of disassembly parameters in reparability scores: limitations for engineering design and suggestions for improvement
15	(Rodríguez et al., 2024)	Analysis of reparability index to improve disassemblability and serviceability in cooker hoods
16	(Dangal et al., 2022)	Design Aspects in Reparability Scoring Systems: Comparing Their Objectivity and Completeness
17	(Flipsen et al., 2016)	Developing a reparability indicator for electronic products
18	(Cordella et al., 2018)	Development of an approach for assessing the reparability and upgradability of Energy-related Products
19	(Rodríguez & Favi, 2023)	Disassembly and Reparability of Mechatronic Products: Insight for Engineering Design

20	(Rodríguez & Favi, 2022)	Eco-design guidelines takeaways from the analysis of product repairability and ease of disassembly: a case study for electric ovens
21	(Franceschini et al., 2007)	Management by Measurement
22	(Bovea & Pérez-Belis, 2018)	Identifying design guidelines to meet the circular economy principles: A case study on electric and electronic equipment
23	(Favi et al., 2016)	Includes Knowledge of Dismantling Centers in the Early Design Phase: A Knowledge-based Design for Disassembly Approach
24	(Ministère de la Transition écologique, 2022)	Instructions manual for the display and the calculation of the repairability index of electrical and electronic equipments
25	(Andrae et al., 2020)	Method for determining the Circularity Score of ICT goods
26	(Dangal et al., 2021)	Perceived Capabilities and Barriers for Do-It-Yourself Repair
27	(Sonego et al., 2022)	Repair of electronic products: Consumer practices and institutional initiatives
28	(Pena et al., 2016)	Study for a method to assess the ease of disassembly of electrical and electronic equipment
29	(Vicente et al., 2019)	Methods for the Assessment of the Reparability and Upgradability of Energy-related Products: Application to TVs
30	(Bracquené et al., 2020)	Analysis of evaluation systems for product repairability: A case study for washing machines
31	(Paolo et al., 2016)	Analysis of durability, reusability and reparability - Application to washing machines and dishwashers
32	(Desai & Mital, 2003)	Evaluation of disassemblability to enable design for disassembly in mass production
33	(Bovea et al., 2016)	Disassembly properties and material characterisation of household small waste electric and electronic equipment
34	(Vanegas et al., 2014)	Disassembly targets for improving resource efficiency
35	(Giudice & Kassem, 2009)	End-of-life impact reduction through analysis and redistribution of disassembly depth: A case study in electronic device redesign

K4: Berechnung der Demontagezeit mit Fokus auf der eDiM-Methode

36	(Soh et al., 2015)	Application of Design for Disassembly from Remanufacturing Perspective
37	(Sawanishi et al., 2015)	A Study on Disassemblability and Feasibility of Component Reuse of Mobile Phones
38	(Favi et al., 2018)	A design for disassembly tool oriented to mechatronic product de-manufacturing and recycling
39	(Moraga et al., 2019)	Circular economy indicators: What do they measure?

40	(Chu et al., 2024)	Disassembly time estimation for used smartphones based on Maynard operation sequence technology
41	(De Fazio et al., 2021)	The Disassembly Map: A new method to enhance design for product repairability
42	(Mandolini et al., 2017)	Time-based disassembly method: how to assess the best disassembly sequence and time of target components in complex products
43	(Jef et al., 2018)	eDIM: further development of the method to assess the ease of disassembly and reassembly of products
44	(Vanegas et al., 2017)	Ease of disassembly of products to support circular economy strategies

Tabelle 2: **Identifizierte relevante Literatur**

4.5 Bestehende Bewertungsverfahren für EEE im Hinblick auf K LW und Reparierbarkeit

Die bestehenden Bewertungsansätze zur Reparierbarkeit von EEE lassen sich laut Bracquené et al. (2018), Mauro et al. (2019), Ritthoff et al. (2021) und Cordella et al. (2018) in drei methodische Hauptkategorien unterteilen: qualitative, semi-quantitative und quantitative Ansätze. Qualitative Ansätze ermöglichen in der Regel eine einfache, binäre Bewertung und eignen sich besonders für umweltbezogene Labels und Zertifizierungen, bei denen die Erfüllung vordefinierter Anforderungen im Vordergrund steht. Semi-quantitative Ansätze kombinieren Mindestanforderungen mit einer graduellen Bewertung und bieten somit differenzierte Einblicke in die Reparierbarkeit, da sie über eine rein binäre Klassifizierung hinausgehen. Quantitative Ansätze hingegen erlauben eine präzise Messung spezifischer Aspekte der Reparierbarkeit und liefern detaillierte, messbare Ergebnisse. Diese Ansätze erfordern jedoch einen höheren Modellierungs- und Datenaufwand und sind oft auf spezifische Produktkomponenten fokussiert.

	Verwendete Ansätze der Literatur	Qualitativ	Semi-qualitativ	Quantitativ
Bewertungs- systeme	ONR 192102:2014	☐	☒	☐
	EN 45554	☐	☒	☐
	iFixit	☐	☒	☐
	EU Ecolabel	☒	☐	☐
	Französischer Reparaturindex	☐	☒	☐
	eDiM	☐	☐	☒
K1	(Mauro et al., 2019)	☒	☒	☒
	(Ritthoff et al., 2021)	☒	☒	☒
K2	(Cordella et al., 2020)	☐	☒	☐
	(Schischke et al., 2022)	☐	☒	☐
	(Flipsen et al., 2019)	☐	☒	☐
	(Europäische Kommission, 2023a)	☐	☒	☐
	(Europäische Kommission, 2023b)	☐	☒	☐
	(Prakash et al., 2016)	☐	☒	☐
	(Roithner et al., 2021)	☐	☐	☒
	(Barros & Dimla, 2023)	☐	☒	☐
	(Mauro et al., 2020)	☐	☒	☐
K3	(Rodríguez et al., 2023)	☐	☒	☒
	(Rodríguez et al., 2024)	☐	☒	☒
	(Dangal et al., 2022)	☐	☒	☐
	(Flipsen et al., 2016)	☒	☐	☐
	(Cordella et al., 2018)	☒	☒	☒
	(Rodríguez & Favi, 2023)	☐	☒	☒
	(Rodríguez & Favi, 2022)	☐	☒	☒
	(Franceschini et al., 2007)	☐	☐	☒
	(Bovea & Pérez-Belis, 2018)	☐	☐	☒
	(Favi et al., 2016)	☐	☒	☐
	(Ministère de la Transition écologique, 2022)	☐	☒	☐
	(Andrae et al., 2020)	☐	☒	☒
	(Pena et al., 2016)	☐	☐	☒
	(Vicente et al., 2019)	☐	☒	☒
	(Bracquené et al., 2020)	☐	☒	☒
	(Paolo et al., 2016)	☐	☒	☒
	(Desai & Mital, 2003)	☐	☒	☐
	(Bovea et al., 2016)	☐	☒	☐
	(Giudice & Kassem, 2009)	☐	☐	☒
K4	(Soh et al., 2015)	☐	☐	☒
	(Sawanishi et al., 2015)	☐	☐	☒
	(Favi et al., 2018)	☐	☐	☒
	(Moraga et al., 2019)	☐	☐	☒
	(Chu et al., 2024)	☐	☐	☒
	(De Fazio et al., 2021)	☐	☐	☒
	(Mandolini et al., 2017)	☐	☐	☒
	(Jef et al., 2018)	☐	☒	☒
	(Vanegas et al., 2017)	☐	☐	☒

Abbildung 8: Verwendete methodische Ansätze der in der Literatur (eigene Darstellung)

Abbildung 8 stellt eine systematische Klassifikation der methodischen Ansätze zur Bewertung der Reparierbarkeit, geordnet nach den jeweiligen Kategorien K1 bis K4, in der Literatur dar. Die ausgewerteten Publikationen wurden den drei Hauptkategorien – qualitativ, semi-quantitativ und quantitativ – zugeordnet, um die Häufigkeit dieser Ansätze zu erfassen und vergleichend darzustellen.

Das Balkendiagramm, wie in Abbildung 9 ersichtlich, zeigt die Häufigkeit des Auftretens der drei Bewertungsansätze "Qualitativ", "Semi-quantitativ" und "Quantitativ" in der betrachteten Literatur. Die erhobenen Daten verdeutlichen, dass die Kategorien "Quantitativ" und "Semi-quantitativ" mit den meisten Stimmen stark dominieren, während der "Qualitative" Ansatz eine geringere Verbreitung aufweist.

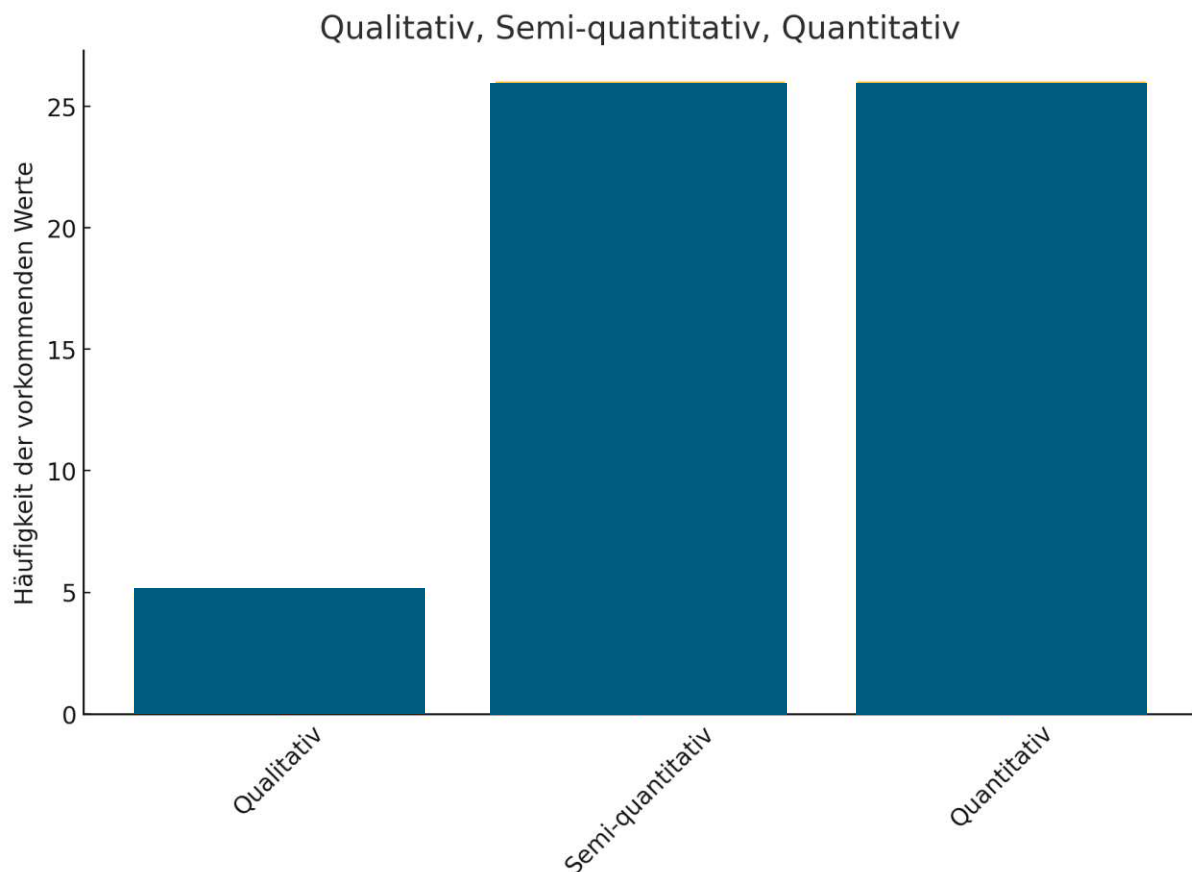


Abbildung 9: Häufigkeit des Auftretens der Bewertungsansätze

Die Kategorie "Quantitativ" zeigt, zusammen mit dem "Semi-quantitativen" Ansatz, die höchste Häufigkeit. Dies verdeutlicht eine starke Präferenz für Ansätze, die auf messbaren und objektiven Daten basieren. Die hohe Nutzung quantitativer Ansätze in der Literatur legt nahe, dass Bewertungsmodelle häufig auf Objektivität und Nachvollziehbarkeit ausgelegt sind, indem sie numerische Daten und klare Metriken zur Bewertung nutzen. Quantitative Ansätze haben den Vorteil, dass sie eine hohe Vergleichbarkeit und Replizierbarkeit bieten, was für die wissenschaftliche Methodik von großer Bedeutung ist (De Fazio et al., 2021). Insbesondere in technischen Kontexten, wie der Bewertung der Demontierbarkeit von Smartphones, bieten quantitative Indikatoren wie Demontagezeit oder Anzahl der benötigten Schritte eine solide Grundlage für die Bewertung und für Vergleichsstudien.

Die zweite dominierende Kategorie ist der "Semi-quantitative" Ansatz. Dieser Ansatz stellt eine Mischform dar, bei der qualitative Informationen in eine quantifizierbare Form überführt werden. Die hohe Häufigkeit dieser Kategorie deutet darauf hin, dass viele der betrachteten Studien die Notwendigkeit erkannt haben, qualitative Aspekte zu berücksichtigen, die für eine umfassende Bewertung von Bedeutung sind, aber gleichzeitig eine gewisse Objektivität beizubehalten. Der semi-quantitative Ansatz ermöglicht eine Kontextualisierung von Bewertungsfaktoren, die in rein quantitativen Modellen oft nicht ausreichend abgebildet werden können. Dies könnte insbesondere im Kontext des Vorhandenseins von Reparaturinformationen oder des

Qualifikationsniveaus von Bedeutung sein, da diese Faktoren nicht immer leicht quantifizierbar sind und eine qualitative Bewertung erfordern (Mauro et al. 2019).

Für die Entwicklung eines Bewertungsmodells sind diese Erkenntnisse von erheblicher Bedeutung. Die starke Präferenz für quantitative und semi-quantitative Ansätze legt nahe, dass ein Modell, das auf einer Kombination beider Ansätze basiert, besonders effektiv sein könnte. Die quantitative Komponente gewährleistet eine hohe Objektivität und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse (De Fazio et al., 2021), während semi-quantitative Komponenten es ermöglichen, komplexe, nicht direkt messbare Aspekte in das Modell zu integrieren (Ritthoff et al., 2021). Dies würde eine ausgewogene Bewertung ermöglichen, die sowohl die Stärken objektiver Metriken als auch die Tiefe qualitativer Einblicke nutzt, um eine umfassende und praxisnahe Demontierbarkeitsbewertung sicherzustellen.

4.5.1 Qualitative Bewertungsmethoden

Diese Methode stellt das einfachste Bewertungsniveau dar und nutzt dichotome Indikatoren, die als Checklisten zur Einschätzung der Reparierbarkeit dienen. Qualitative Ansätze erfordern keine detaillierten technischen Daten und dienen primär dazu, allgemeine Designprinzipien festzulegen, die die Reparaturfreundlichkeit fördern (Cordella et al. 2018).

EU Ecolabel

Das EU Ecolabel, eingeführt im Jahr 1992, ist ein von EU-Mitgliedsstaaten sowie einigen Nicht-EU-Staaten anerkanntes Umweltsiegel. Es kennzeichnet Produkte und Dienstleistungen, die geringere Umweltauswirkungen als vergleichbare Alternativen aufweisen, um umweltbewusste Kaufentscheidungen zu erleichtern. Bisher tragen etwa 100.000 Produkte das EU Ecolabel, allerdings nur drei Arten von elektronischen Geräten, darunter Fernseher, Computer und Displays wie Monitore. Das EU Ecolabel kann von Herstellern, Importeuren, Händlern oder Dienstleistern beantragt werden. Der Antrag wird im Land eingereicht, in dem das Produkt hergestellt oder erstmals vermarktet wird. Bei Genehmigung erhält man eine Lizenz zur Nutzung des Labels, die bis zur nächsten Überarbeitung der Kriterien gültig ist, welche alle drei bis fünf Jahre an neue technologische Entwicklungen angepasst werden. Die Antragsteller müssen Nachweise wie Prüfberichte vorlegen. Die Kriterien werden von Experten und Interessensvertretern entwickelt und berücksichtigen Umweltaspekte. Bei Computern und Fernsehern liegt der Fokus auf der Reparierbarkeit. Ersatzteile müssen bis zu fünf bzw. sieben Jahre nach Produktionsende verfügbar sein, und eine Garantie von mindestens zwei Jahren wird gefordert (EU Ecolabel - Home, 2024).

Derzeit sind keine Smartphones und Tablets unter dem EU Ecolabel gelistet. Um Nachhaltigkeit und Transparenz in diesem Bereich zu fördern, entwickelt die EU einen

Reparierbarkeitsindex für diese Geräte. Die Integration der Reparierbarkeit in das Produktdesign trägt zur Langlebigkeit von Konsumgütern bei und ermöglicht eine transparente Darstellung dieser Eigenschaft. Der geplante Index soll Verbraucher:innen künftig eine bessere Orientierung hinsichtlich der Reparaturfreundlichkeit von Smartphones und Tablets bieten. Darüber hinaus müssen Hersteller Angaben zur Energieeffizienz, Batterielebensdauer sowie zum Schutz gegen Staub und Wasser machen und einen Reparierbarkeitsscore ausweisen. Diese Produkte müssen mit einem gedruckten Etikett versehen sein. Die entsprechenden Daten werden in die Produktdatenbank eingetragen und sowohl visuelle Werbung als auch technisches Werbematerial müssen die Energieeffizienzklasse des Produkts angeben (Smartphones and Tablets, 2023).

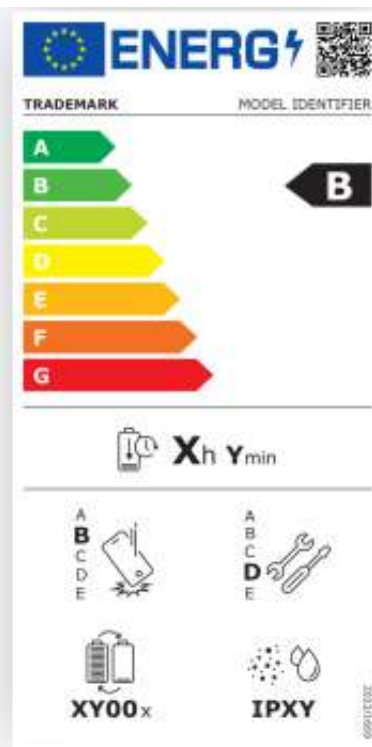


Abbildung 10: EU Energielabel (Smartphones and Tablets, 2023)

4.5.2 Semi-quantitative Bewertungsmethoden

Semi-qualitative Ansätze erweitern qualitative Checklisten um abgestufte Bewertungsoptionen für jedes Kriterium, die numerisch, alphabetisch oder farblich kodiert sein können. Diese Methode baut auf der qualitativen Bewertung auf, indem sie produktspezifische Parameter einbezieht, die einen Vergleich unterschiedlicher Designoptionen hinsichtlich ihrer Reparierbarkeit ermöglichen. In semi-quantitativen Methoden erfolgt die Bewertung der Kriterien auf einer Skala, wodurch die Reparierbarkeit eines Produkts differenziert in mehreren Stufen dargestellt werden kann. Dieser Ansatz kombiniert Elemente der qualitativen und quantitativen Bewertung

und ist besonders wertvoll, um Designentscheidungen auf Grundlage detaillierterer Informationen zu unterstützen (Mauro et al. 2019).

Österreichische Normungsregel ONR 192102:2014

Die ONR 192102:2014 repräsentiert ein österreichisches Gütezeichen, das speziell für die Langlebigkeit und Reparaturfreundlichkeit von elektrischen und elektronischen Geräten entwickelt wurde. Dieses Gütezeichen stellt keine Norm im eigentlichen Sinne dar, sondern eher eine Regelung, die potenziell zu einer vollständigen Norm ausgebaut werden könnte. Die ONR zielt primär auf sogenannte Braune Ware und Weiße Ware ab. Weiße Ware umfasst Küchengeräte wie Kühlschränke und Waschmaschinen, wohingegen zur Braunen Ware Unterhaltungselektronik wie Fernseher und Computer gezählt werden. Für die Bewertung der Reparierbarkeit dieser Geräte sind spezifische Kriterien festgelegt: 40 Kriterien für Weiße Ware und 53 Kriterien für Braune Ware, die inhaltlich weitgehend übereinstimmen. Diese Kriterien unterteilen sich in Soll-Kriterien, die eine Erreichung bestimmter Punktwerte vorsehen, und Muss-Kriterien, die obligatorisch erfüllt werden müssen.

Die Muss-Kriterien definieren grundlegende Anforderungen zur Gewährleistung der Langlebigkeit und Reparaturfreundlichkeit der Geräte. Diese umfassen die Erfüllung einer vorgegebenen Mindestlebensdauer, die Verfügbarkeit eines Verzeichnisses von Bezugsquellen für Ersatzteile sowie die Verfügbarkeit der Ersatzteile selbst über einen festgelegten Zeitraum. Ein Gerät, das eines dieser obligatorischen Kriterien nicht erfüllt, wird nicht mit dem Gütezeichen ausgezeichnet (Mauro et al., 2019).

Im Gegensatz dazu erfordern Soll-Kriterien das Erreichen einer festgelegten Mindestpunktzahl, die zwischen 5 und maximal 10 Punkten liegen kann. Die gesammelten Punkte aus den einzelnen Soll-Kriterien werden addiert und gemäß einer Umrechnungstabelle in Qualitätsstufen zwischen 5 und 10 eingestuft. Auf dieser Grundlage erfolgt dann die endgültige Bewertung der Reparierbarkeit und Langlebigkeit des Produkts, die auf einer graduellen Skala von „gut“ über „sehr gut“ bis „ausgezeichnet“ erfolgt und auf dem Gütezeichen vermerkt wird (Ritthoff et al., 2021).

Qualitätsstufe	Erreichte Punktzahl	Wertung
10	175 bis 205	Ausgezeichnet
9	145 bis 175	Ausgezeichnet
8	120 bis 144	Sehr gut
7	95 bis 119	Sehr gut
6	70 bis 94	Gut
5	45 bis 69	Gut

Tabelle 3: Umrechnungstabelle ONR 192102:2014

Französischer Reparaturindex (Indice de réparabilité)

Im Jahr 2021 wurde in Frankreich eine gesetzliche Vorschrift eingeführt, die produzierende Unternehmen dazu verpflichtet, ihre Produkte mit einem Label zu versehen, das Auskunft über die Reparaturmöglichkeiten bei Defekten gibt. Diese Kennzeichnungspflicht ist Teil der operativen Umsetzung des sogenannten Anti-Abfall-Gesetzes für eine Kreislaufwirtschaft, welches 2018 verabschiedet wurde (Ritthoff et al., 2021). Ziel dieser Maßnahme ist es, die Reparaturrate von EEE bis 2025 auf 60% zu steigern (L'indicateur De Réparabilité - ADEME, 2023).

Der Reparaturindex, der aus fünf Hauptkategorien mit jeweiligen Unterkriterien besteht, ermöglicht eine maximale Punktzahl von 10 und muss deutlich sichtbar direkt am Verkaufsort auf dem Produkt oder dessen Verpackung angebracht werden. Derzeit wird der Index auf acht verschiedene Gerätekategorien angewendet: Waschmaschinen, Smartphones, Laptops, Fernseher, Rasenmäher, Spülmaschinen, Staubsauger und Hochdruckreiniger. Die Bewertung erfolgt durch die Vergabe von Punkten für jedes Kriterium, woraus sich eine Gesamtnote von 0 bis 10 ergibt. Die Verwendung einer Farbcodierung erleichtert die visuelle Erfassung der Bewertung und muss neben der Verpackung auch in der Werbung deutlich kommuniziert werden (Tout Savoir Sur L'indice De Réparabilité, 2024).



Abbildung 11: Französischer Reparaturindex (Tout savoir sur l'indice de réparabilité, 2024)

Der Index setzt sich aus fünf Hauptkriterien zusammen, die jeweils spezifische Unterkriterien enthalten und im Folgenden detailliert beschrieben werden:

- **Dokumentation:** Die Bewertung ergibt sich aus der Verpflichtung des Herstellers, technische Dokumentationen über mehrere Jahre hinweg kostenlos Reparaturbetrieben und auch Verbrauchern bereitzustellen.
- **Zerlegbarkeit, Zugang, Werkzeuge, Befestigungen:** Die Bewertung wird anhand der Demontagefreundlichkeit des Produkts, der Art der benötigten Werkzeuge sowie der Verwendung der verbauten Befestigungselemente festgelegt.
- **Verfügbarkeit von Ersatzteilen:** Der Wert wird durch die Verpflichtung des Herstellers in Bezug auf die Dauer der Verfügbarkeit von Ersatzteilen sowie deren Lieferzeiten festgelegt.
- **Preis der Ersatzteile:** Dieser Wert ergibt sich aus dem Verhältnis des Verkaufspreises der Ersatzteile zum Preis des Gesamtprodukts.

- **Produktspezifisch:** Die Bewertung basiert auf spezifischen Unterkriterien, die für die jeweilige Produktkategorie relevant sind (Tout Savoir Sur L'indice De Réparabilité, 2024).

iFixit

iFixit ist eine Online-Plattform, die mithilfe einer Scorecard die Reparierbarkeit von Tablets, Smartphones und Laptops bewertet. Zudem haben Nutzer:innen die Möglichkeit, Reparaturanleitung untereinander zu teilen. Die Bewertung beinhaltet Kriterien wie die Schwierigkeit beim Öffnen des Gerätes, die Art der verwendeten Befestigungselemente und die Komplexität beim Austauschen wichtiger Komponenten. Zusätzliche Bewertungspunkte werden für Aufrüstbarkeit, die Verwendung von standardisierten Schrauben und die Modularität der Komponenten vergeben. Jedes Kriterium kann entweder 5 oder 10 Punkte beitragen, mit einer maximalen Gesamtpunktzahl von 100. Die finale Bewertung wird durch Division der Gesamtpunktzahl durch 10 ermittelt, wobei die Skala von 0 (rot) für nicht reparierbare Geräte bis 10 (grün) für leicht zu reparierende Geräte reicht (Suovanen, 2024).



Abbildung 12: Reparierbarkeitsindex (iFixit, 2024)

- **10/10:** Geräte in dieser Kategorie sind hervorragend reparierbar. Passende Reparaturanleitungen und Ersatzteile sind verfügbar, was diese Geräte zu optimalen Beispielen für Nachhaltigkeit und Benutzerfreundlichkeit macht.
- **5/10:** Diese Bewertung fungiert als Schwellenwert im Bewertungssystem von iFixit. Geräte mit einer Punktzahl von 5/10 oder höher gelten als eigenständig reparierbar. Werte unterhalb dieser Schwelle deuten darauf hin, dass für eine Reparatur wahrscheinlich professionelle Hilfe notwendig ist.
- **0/10:** Ein Gerät mit dieser Bewertung zeigt an, dass eine Reparatur nicht möglich ist, ohne das Gerät irreparabel zu beschädigen.

Die Bewertung der Reparierbarkeit von Geräten durch iFixit basiert auf einer methodischen Untersuchung verschiedener Aspekte, die die Möglichkeit und den Aufwand einer Reparatur beeinflussen. Die Bewertungskriterien umfassen die Verfügbarkeit von Reparaturanleitungen und Originalersatzteilen, welche jeweils 10%

der Gesamtbewertung ausmachen, sowie das Design des Produkts hinsichtlich seiner Reparaturfreundlichkeit, welches 80% der Bewertung bestimmt.

Das Produktdesign wird anhand der Demontage- und Remontageprozesse bewertet. Geräte mit komplexen, linearen Demontageschritten, die den Zugang zu wichtigen Komponenten erschweren, erhalten eine niedrigere Bewertung. Reparaturfreundliche Geräte zeichnen sich durch wenige Schritte und den direkten Zugang zu wesentlichen Teilen aus (Suovanen, 2024).

EN 45554

Die EN 45554 ist eine europäische Norm, die darauf abzielt, die Reparierbarkeit, Wiederverwendbarkeit und Aufrüstbarkeit von energieverbrauchsrelevanten Produkten systematisch zu bewerten. Diese Norm ist ein zentraler Bestandteil der Bemühungen in Europa, die Nachhaltigkeit von Produkten zu steigern und deren Lebensdauer zu verlängern (Schischke et al., 2022).

Mit einem alphabetischen Bewertungssystem von „A“ bis „E“ und numerischen Werten, die eine präzise Einstufung ermöglichen, schafft die EN 45554 Transparenz für Verbraucher und Anreize für Hersteller ein nachhaltiges Design zu fördern. Zentrales Merkmal der Norm ist die flexible Auswahl von Indikatoren, die je nach Produktgruppe angepasst werden können. Diese Indikatoren gliedern sich in technische, informationsbezogene und ökonomische Kategorien. Technische Indikatoren wie die Demontagetiefe oder Art der Befestigungselemente bewerten, wie reparaturfreundlich ein Produkt konstruiert ist. Informationsbezogene Indikatoren berücksichtigen die Verfügbarkeit von Reparaturanleitungen und Diagnosetools, während ökonomische Indikatoren den Vergleich zwischen Reparatur- und Ersatzkosten sowie die Verfügbarkeit von Dienstleistern analysieren. Die Gewichtung einzelner Indikatoren variiert je nach Produktart, da nicht alle Kriterien für jedes Produkt gleichermaßen relevant sind (Ritthoff et al., 2021).

Durch diese Methodik bietet die EN 45554 Herstellern klare Leitlinien für nachhaltiges Produktdesign und schafft für Verbraucher eine verlässliche Grundlage zur Bewertung der Langlebigkeit und Reparierbarkeit. Insgesamt unterstützt die Norm die Kreislaufwirtschaft und hilft dabei, die Lebensdauer von Produkten zu verlängern, was sowohl ökologischen als auch ökonomischen Nutzen bringt (Schischke et al., 2022).

4.5.3 Quantitative Bewertungsmethoden

Die quantitative Methode stellt das höchste Komplexitätsniveau der Bewertungsansätze dar und verwendet technische sowie umweltbezogene Indikatoren, um die Reparierbarkeit eines Produkts detailliert und messbar zu erfassen. Dieser Ansatz umfasst präzise Messungen und Berechnungen, wie beispielsweise die Ermittlung der Demontagezeit oder der Anzahl erforderlicher

Arbeitsschritte für den Austausch bestimmter Komponenten. Quantitative Ansätze ermöglichen eine fundierte Analyse der technischen und ökologischen Komplexität eines Produkts. Durch die Integration mehrerer Indikatoren entsteht ein Gesamtindex, der das Maß der Reparierbarkeit abbildet (Vanegas et al., 2017).

Ease of Disassembly Metric

Die "Ease of Disassembly Metric" (eDiM) ist eine quantitative Methode, die auf die Bewertung der Zeitdauer und der damit verbundenen Schwierigkeit der Demontage und Remontage eines Produktes abzielt (Pena et al., 2016).

In der eDiM-Methode werden spezifisch die Zeiten für das Lösen von Befestigungselementen sowie die Durchführung der Demontage und Remontage betrachtet. Für die Demontage- und Montageprozesse werden detaillierte Tätigkeitsbeschreibungen erstellt und mit Referenzzeiten versehen, die den notwendigen Aufwand für diese Operationen quantifizieren. Diese Referenzzeiten basieren auf der "Maynard Operation Sequence Technique" (MOST), die darauf ausgerichtet ist, für diverse manuelle Tätigkeiten standardisierte Zeitwerte bereitzustellen. Die mittels MOST ermittelten Zeiten repräsentieren die Leistung einer durchschnittlichen Fachkraft unter standardisierten Arbeitsbedingungen und adäquater Aufsicht (Pena et al., 2016).

Die Demontagezeit wird gemäß der eDiM-Methode berechnet, wobei die relevanten Daten in zwei Hauptabschnitten eines Kalkulationsblattes erfasst werden, das in Tabelle 4 abgebildet ist.

Komponentencode	Demontagefolge der Komponenten	Demontagefolge der Befestigungselemente	Verbindungsart	Anzahl der Befestigungen	Anzahl der Manipulationen	Identifizierbarkeit (0,1)	Art des Werkzeugs
1							
2							
3							
::							
::							
N							

Tabelle 4: eDiM-Kalkulationstabelle Dokumentation

Die ersten acht Spalten (1 bis 8) des Blattes, wie in Tabelle 4 ersichtlich, dienen der Eingabe grundlegender Produktinformationen, die die detaillierten Schritte des Demontageprozesses folgendermaßen beschreiben:

1. **Komponentencode:** Dieser Parameter dient als Kennzeichnung jeder spezifischen Komponente eines Produkts innerhalb eines Demontageprozesses.
2. **Demontagefolge der Komponenten:** Dieser Parameter erfasst die sequenzielle Anordnung der Komponenten, die während des Demontageprozesses entfernt werden.
3. **Demontagefolge der Befestigungselemente:** Dieser Parameter dokumentiert sämtliche Befestigungselemente, die einem Bauteil zugeordnet sind, wobei ein Bauteil mehrere und unterschiedliche Befestigungselemente aufweisen kann.
4. **Verbindungsart:** Gibt den Typ der verwendeten Verbindungselemente an.
5. **Anzahl der Befestigungen:** Gibt die Anzahl der verwendeten Befestigungen an.
6. **Anzahl der Manipulationen:** Dieser Parameter bezieht sich auf die Anzahl der manuellen Eingriffe, die für jeden Arbeitsschritt erforderlich sind.
7. **Identifizierbarkeit:** Bewertung der Sichtbarkeit von Befestigungselementen zur Erleichterung ihrer Identifikation, wobei zwischen sichtbar (0) und verdeckt (1) unterschieden wird.
8. **Art des Werkzeugs:** Der Typ des Werkzeugs, welches benötigt wird, um die Demontage durchzuführen (Jef et al., 2018).

Auf Grundlage der in den ersten acht Spalten erfassten Basisinformationen werden im zweiten Abschnitt, wie in Tabelle 5 dargestellt, die geschätzten Standardzeiten anhand der MOST-Referenzwerte dokumentiert, um eine finale Demontagezeit zu ermitteln.

Werkzeugwechsel (s)	Werkzeugpositionierung(s)	Demontage MOST-Sequenz	Demontage TMU	Demontage (s)	eDiM (s)

Tabelle 5: eDiM-Kalkulationstabelle Berechnung

9. **Werkzeugwechsel:** Die für den Wechsel der Werkzeuge erforderliche Zeit in Sekunden.
10. **Werkzeugpositionierung:** Zeigt die Zeit in Sekunden, die für die Positionierung des Werkzeugs benötigt wird.

- 11. Demontage MOST-Sequenz:** Diese Spalte beinhaltet die kodierten Anweisungen basierend auf der MOST, die die Sequenz der Demontageaktionen detailliert beschreibt.
- 12. Demontage TMU:** TMU steht für Time Measurement Units. Diese Spalte gibt die geschätzte Zeit in TMUs an, die benötigt wird, um die jeweilige Demontageaktion auszuführen.
- 13. Demontage:** Zeigt die tatsächliche Zeit in Sekunden, die basierend auf den TMUs für den jeweiligen Demontageschritt benötigt wird. Diese wird durch Umrechnung der TMU in real verbrauchte Zeit erhalten.
- 14. eDiM:** Die Gesamtzeit für die Demontageschritte in einer Zeile ergibt sich aus der Summe der Zeiten innerhalb dieser Zeile (Jef et al., 2018).

Zur Veranschaulichung der Berechnungsmethode wird beispielhaft die eDiM-Methode, wie in Tabelle 6 ersichtlich, angewandt, um die Zeit für das Lösen einer Schraube mit einem Schraubenzieher aus einem Gerät zu bestimmen.

Werkzeugwechsel (s)	Werkzeugpositionierung(s)	Demontage MOST-Sequenz	Demontage TMU	Demontage (s)	eDiM (s)
1,44	2,52	$5 * L1 + A1B0G1 + A1B0P1 $	90,00	3,24	7,2

Tabelle 6: eDiM-Berechnungsbeispiel

Der Prozess des Wechsels zu einem Schraubenzieher dauert 1,44 Sekunden. Anschließend benötigt das Positionieren des Schraubenziehers an der Schraube weitere 2,52 Sekunden. Die Demontage selbst folgt einer spezifischen MOST-Sequenz, die aus fünf Wiederholungen des Basis-MOST-Codes |L1| besteht, um das Werkzeug zu drehen. Danach folgt der Code |A1B0G1|, der das Anwenden von Druck und die Kontrolle über das Werkzeug darstellt, sowie der Code |A1B0P1| für das präzise Positionieren des Werkzeugs an der Schraube.

Die gesamten Time Measurement Units (TMUs) für diesen Vorgang belaufen sich auf 90,0 TMUs, was umgerechnet 3,24 Sekunden entspricht, basierend auf einem Umrechnungsfaktor von 0,036 Sekunden pro TMU. Die gesamte Zeit, die gemäß der eDiM für den vollständigen Vorgang des Lösen einer Schraube benötigt wird, beträgt 7,20 Sekunden (Pena et al., 2016; Jef et al., 2018).

4.6 Komponenten eines Bewertungssystems

Ein Bewertungssystem zur Beurteilung der Reparierbarkeit besteht laut den Untersuchungen von Bracquené et al. (2018), Mauro et al. (2019) und Ritthoff et al. (2021) aus mehreren fundamentalen Komponenten:

- a) Prioritäre Bauteile,
- b) Indikatoren für Reparatur und Aufrüstung,
- c) Einen Bewertungsrahmen, welcher die Ergebnisse an den Verbraucher kommuniziert.

4.6.1 Prioritäre Bauteile

Bei der Bewertung der Reparierbarkeit komplexer Produkte, die aus vielen unterschiedlichen Komponenten bestehen, ist die Festlegung von prioritären Teilen entscheidend. Prioritäre Teile, auch als vorrangige Teile bezeichnet, repräsentieren zentrale Elemente eines Produkts. Folgende Aspekte werden als entscheidend betrachtet:

- i. Ein prioritäres Bauteil muss funktionell wichtig sein; es spielt daher eine entscheidende Rolle für die Gesamtfunktionalität des Produkts.
- ii. Es besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass das Bauteil ausfällt oder aufgerüstet werden muss (Ritthoff et al., 2021).

Der Akku zählt neben dem Touchscreen und der Rückseite zu den prioritären Bauteilen eines Smartphones. (Mauro et al., 2019) Die Funktion des Akkus ist entscheidend für die Gesamtfunktionalität des Geräts, da er die Energieversorgung sicherstellt und somit eine zentrale Rolle in der Nutzbarkeit und Leistungsfähigkeit des Smartphones spielt. Darüber hinaus zeigt eine Verbraucherumfrage der Organización de Consumidores y Usuarios aus dem Jahr 2018, dass der Akku mit 42% aller gemeldeten Defekte das häufigste Problem bei Smartphones darstellt (Los Móviles Acumulan El 51 % De Las Quejas De Obsolescencia Prematura, 2018).

4.6.2 Indikatoren für Reparatur und Aufrüstbarkeit

Die Reparierbarkeit eines Produkts ist ein theoretisches Konzept, das über messbare Indikatoren konkretisiert werden muss, um seine praktische Anwendbarkeit zu bewerten. In der wissenschaftlichen Literatur werden diese Indikatoren in zwei Hauptkategorien eingeteilt: zum einen jene, die sich auf das Produktdesign beziehen, wie beispielsweise die zerstörungsfreie Demontage; zum anderen jene, wie die Verfügbarkeit von Reparaturinformationen (Bracquené et al., 2018).

Ein zentraler technischer Parameter zur Bewertung der Reparierbarkeit ist die Zerlegbarkeit eines Produkts, definiert als die nicht-destruktive Demontage eines

Produkts in seine Bestandteile, die so gestaltet ist, dass sie eine anschließende Wiederausammensetzung und Wiederverwendung ermöglicht. Dieser Prozess wird in der Literatur unterschieden in vollständige Zerlegung, die das gesamte Produkt betrifft und die selektive Zerlegung, die sich auf bestimmte Materialien oder Teile beschränkt (Cordella et al., 2020). Die Leichtigkeit der Zerlegung kann durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden, darunter die Anzahl, Art und Anordnung der Bauteile, deren Zugänglichkeit, der Bedarf an spezialisierten Werkzeugen, sowie Zeit- und ergonomische Anforderungen (Mauro et al., 2019).

Um einen Überblick über die Relevanz und Häufigkeit dieser Indikatoren zu erhalten, wurden die Literaturquellen K1-K3 auf das Vorkommen von Indikatoren untersucht. Die Ergebnisse dieser Sichtung sind in der Abbildung 13 dargestellt. Die Kategorie K4 wurde nicht in die Auflistung mit hineingenommen, da sich diese Literatur nur mit dem Indikator Demontagezeit befasst.

	Literatur	Demontagetiefe	Demontageart	Remontage	Art der Befestigungselemente	Anzahl der Befestigungselemente	Sichtbarkeit der Befestigungselemente	Werkzeugart	Anzahl Werkzeuge	Anzahl Werkzeugwechsel	Modularität	Qualifikationsniveau	Arbeitsumgebung	Arbeitssicherheit	Fehlerdiagnose u. Schnittstelle	Standardteile	Verfügbarkeit Reparaturinformationen	Ersatzteilverfügbarkeit	Ersatzteilkosten	Ersatzteillieferzeit	Verfügbarkeit Softwareupdate/Firmware	Datenlöschung	Passwortzurücksetzung	Reset/Wiederherstellen	Werkzeinstellung	Rückgabeoptionen
Bewertungs-systeme	ONR 192102:2014	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☑	☐	☐
	EN 45554	☑	☑	☑	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	iFixit	☑	☑	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	Französischer Reparaturindex	☑	☐	☑	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	eDiM	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
K1	(Bracquené et al., 2018)	☑	☑	☑	☑	☐	☐	☑	☑	☑	☑	☐	☐	☐	☑	☑	☑	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐
	(Mauro et al., 2019)	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☑	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐
	(Ritthoff et al., 2021)	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☑	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐
K2	(Cordella et al., 2020)	☑	☑	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐
	(Schischke et al., 2022)	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	(Flipsen et al., 2019)	☑	☑	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	(Europäische Kommission, 2023a)	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	(Europäische Kommission, 2023b)	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	(Prakash et al., 2016)	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	(Barros & Dimla, 2023)	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	(Mauro et al., 2020)	☑	☑	☐	☑	☑	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
K3	(Rodríguez et al., 2023)	☑	☑	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☑	☑	☐	☐	☑	☑	☑	☑	☐	☐
	(Rodríguez et al., 2024)	☑	☑	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☑	☑	☑	☑	☐	☐
	(Dangal et al., 2022)	☑	☑	☑	☑	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	(Flipsen et al., 2016)	☑	☑	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	(Cordella et al., 2018)	☑	☑	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	(Rodríguez & Favi, 2023)	☑	☑	☑	☑	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	(Rodríguez & Favi, 2022)	☑	☐	☐	☑	☑	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	(Bovea & Pérez-Belis, 2018)	☑	☐	☑	☑	☑	☑	☐	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	(Ministère de la Transition écologique, 2022)	☑	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐
	(Pena et al., 2016)	☑	☑	☐	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	(Vicente et al., 2019)	☑	☑	☐	☑	☑	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	(Bracquené et al., 2020)	☑	☑	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	(Bovea et al., 2016)	☑	☐	☑	☑	☐	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	(Giudice & Kassem, 2009)	☑	☑	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Abbildung 13: Identifizierte Indikatoren aus der Literatur (eigene Darstellung)

Die Häufigkeit des Auftretens von Indikatoren in der Literatur wird in Abbildung 14 zusammengefasst. Diese Darstellung veranschaulicht, wie oft bestimmte Indikatoren

in den untersuchten Quellen erwähnt wurden und gibt so einen quantitativen Überblick über die Relevanz einzelner Kriterien.

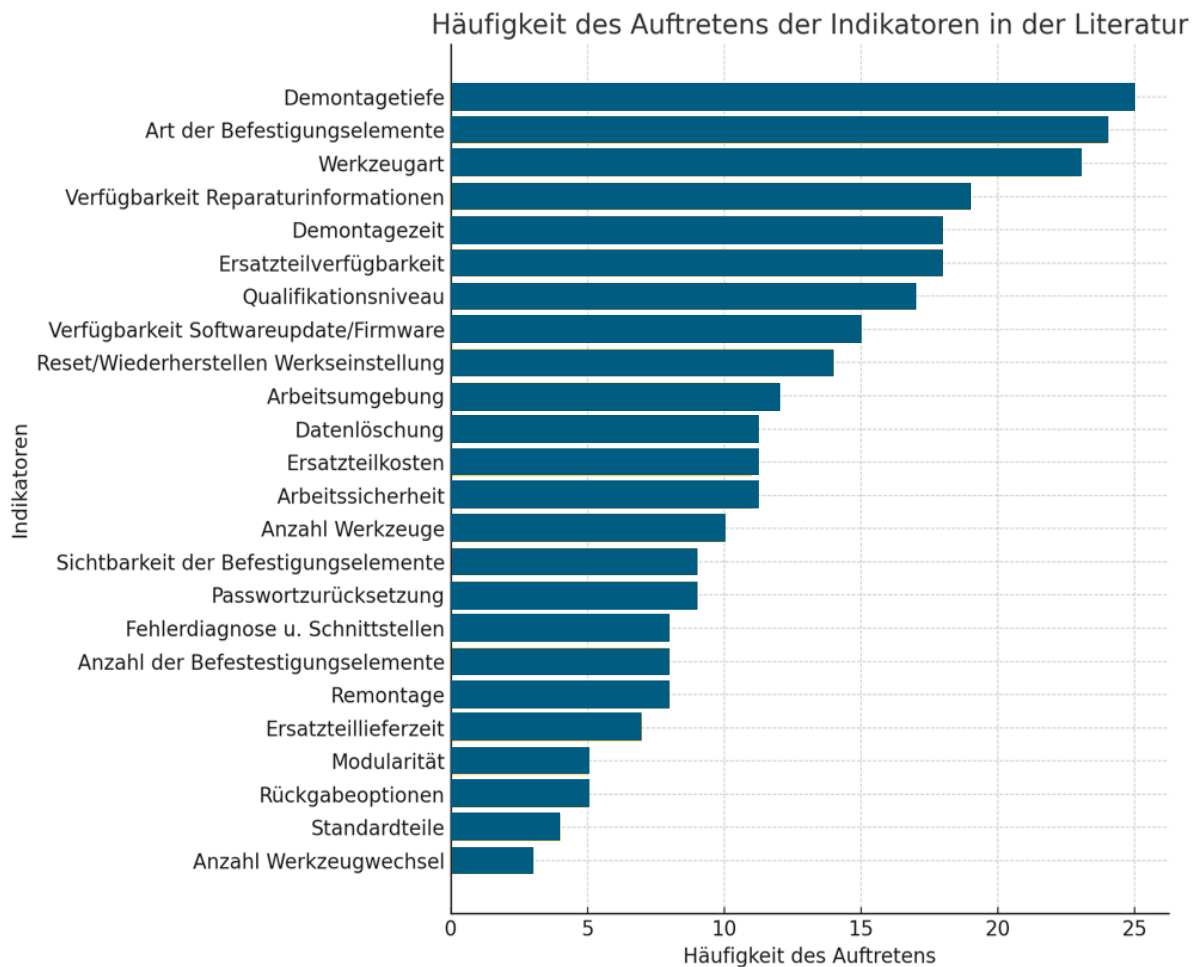


Abbildung 14: Häufigkeit des Auftretens der Indikatoren

Die Recherche zeigt, dass Indikatoren wie Demontagetiefe, Art der Befestigungselemente, Werkzeugart, Verfügbarkeit von Reparaturinformationen, Ersatzteilverfügbarkeit und Demontagezeit am häufigsten in der Literatur genannt werden. Diese Indikatoren gelten somit als zentrale Kriterien, da sie in zahlreichen Studien hervorgehoben werden und ihre wiederholte Erwähnung die Relevanz dieser Faktoren für Bewertung der Reparierbarkeit von Produkten unterstreicht.

Zusätzlich zu den technischen Parametern spielen auch wirtschaftliche Aspekte eine Rolle, wie etwa die absoluten Preise und die Kosten für Ersatzteile und Arbeitsaufwand. Diese wirtschaftlichen Faktoren sind entscheidend dafür, ob Reparaturen oder Aufrüstungen unter realen Marktbedingungen als wirtschaftlich sinnvoll angesehen werden können (Ritthoff et al., 2021).

In weiterer Folge wird bei der Entwicklung des Bewertungsmodells auf wirtschaftliche Aspekte verzichtet. Die detaillierte Erfassung und Analyse dieser finanziellen Variablen würde den Umfang der Arbeit erheblich erweitern, da dies eine fortlaufende

Überwachung der Marktpreise sowie eine komplexe Berechnung der Arbeitskosten für jede Reparatur oder Aufrüstung erfordern würde. Auch das Kriterium der Ersatzteilverfügbarkeit wird bewusst nicht in die Bewertung einbezogen, da das Modell sich ausschließlich auf die technische Demontierbarkeit des Akkus fokussiert. Die Verfügbarkeit von Ersatzteilen ist zweifellos ein relevanter Faktor für die Reparaturfähigkeit eines Produkts im umfassenderen Sinne, jedoch spielt sie für die rein technische Analyse der Akkudemontage eine untergeordnete Rolle. Ziel des Modells ist es, objektiv zu bewerten, wie gut oder schlecht ein Akku ohne Rücksicht auf externe Faktoren entfernt werden kann. Daher liegt der Fokus stattdessen auf technischen Parametern, die eine stabilere und objektivere Grundlage für die Bewertung der Demontierbarkeit von Akkus bietet.

4.6.3 Bewertungsrahmen

Unabhängig vom Bewertungssystem ist ein klar sichtbares Label erforderlich, das die erreichte Bewertung der Reparierbarkeit eines Produkts transparent für potenzielle Käufer kommuniziert (Ritthoff et al., 2021). Verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten für solch ein Label bieten unterschiedliche Vorteile:

- **Binär (reparierbar – nicht reparierbar):** Ein binäres Labelsystem kommuniziert lediglich, ob ein Produkt reparierbar ist oder nicht, ohne graduelle Abstufungen anzugeben. Dies könnte für Käufer interessant sein, die einfach wissen möchten, ob eine Reparatur grundsätzlich möglich ist.
- **Ampel (grün – orange – rot):** Ein Ampelsystem ist intuitiv verständlich und kann durch die Analogie zum bekannten Energieeffizienzlabel schnell erfassen, ob Produkte leicht, mittel oder schwer reparierbar sind. Dieses System bietet jedoch eine begrenzte Differenzierung zwischen den Produkten.
- **Alphabetisch (A, B, C):** Ein alphabetisches System könnte ähnlich wie das Label für Energieeffizienz aufgebaut sein, könnte aber auch zu Verwirrungen führen, da die Bedeutung der Buchstaben nicht sofort offensichtlich ist.
- **Numerisch (0-1, 1-10, 0-100):** Ein numerisches Labelsystem ermöglicht zwar eine differenzierte Beurteilung der Produkte, jedoch kann die Detailtiefe der Punkteskala über das praktisch Wahrnehmbare hinausgehen. Eine minimale Differenz in der Punktzahl zwischen zwei Produkten muss nicht notwendigerweise einen erkennbaren Unterschied in der praktischen Anwendbarkeit oder Qualität widerspiegeln (Mauro et al., 2019).

5 Entwicklung eines Bewertungsmodells

Die Entwicklung eines Bewertungsmodells für die Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones ist von erheblicher Bedeutung. Die Relevanz eines solchen Bewertungsmodells ist vor allem auf die besondere Herausforderung der Demontierbarkeit von Akkus in modernen Smartphones zurückzuführen. Smartphones sind zunehmend komplex aufgebaut, was die effiziente und zerstörungsfreie Entnahme des Akkus erschwert. Der Akku ist eine zentrale Komponente, deren Austauschfähigkeit entscheidend für die Verlängerung der Lebensdauer des gesamten Geräts und somit für eine nachhaltigere Nutzung ist (Cordella et al., 2020). Akkus sind zudem häufig der Hauptgrund für Produktdefekte, weshalb die einfache Entnahme und der Austausch des Akkus essenziell sind, um die geplante Obsoleszenz zu verhindern und eine ressourcenschonendere Nutzung zu gewährleisten (Tröger et al., 2017). Wenn Akkus nicht entfernt werden können und Smartphones auf Deponien landen, entstehen erhebliche Umweltauswirkungen. Lithium-Ionen-Akkus enthalten giftige Chemikalien, die bei unsachgemäßer Entsorgung in die Umwelt gelangen können und sowohl Böden als auch Grundwasser verunreinigen. Darüber hinaus können Akkus leicht zu brennen beginnen, insbesondere wenn sie beschädigt werden, was ein erhebliches Risiko für Brände darstellt und die Freisetzung gefährlicher Stoffe in die Atmosphäre fördert. Eine effektive Entnahme und das Recycling von Akkus sind daher nicht nur ökologisch sinnvoll, sondern tragen auch zur Reduktion von Schadstoffen und zur Schonung der Umwelt bei (Kurth et al., 2018).

Verwendete Ansätze der Literatur	iFixit	(Cordella et al., 2020)	(Schischkeet al., 2022)	(Flipsen et al., 2019)	(Europäische Kommission, 2023a)	(Europäische Kommission, 2023b)	(Prakash et al., 2016)	(Roithner et al., 2021)	(Barros & Dimla, 2023)	(Mauro et al., 2020)
Qualitativ	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Semi-quantitativ	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☒
Quantitativ	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐

Abbildung 15: Identifizierte Indikatoren für Smartphones

Die durchgeführte SLR zeigt, wie in Abbildung 15 dargestellt, dass bestehende Bewertungsansätze für Smartphones keine spezifische Kombination von quantitativen und semi-quantitativen Indikatoren berücksichtigen. Ein Beispiel hierfür ist der iFixit-Ansatz, der eine allgemeine Bewertung der Reparaturfähigkeit eines Smartphones bietet, jedoch keine detaillierten Aufschlüsse über die Demontierbarkeit spezifischer Komponenten wie des Akkus gibt. Dies stellt eine Einschränkung dar, da die Akkudemontierbarkeit entscheidend für die Lebensdauer des Geräts und die Wiederverwertbarkeit der Materialien ist. Zusätzlich trägt die Demontierbarkeit des Akkus dazu bei, Recycling zu ermöglichen und Umweltauswirkungen zu minimieren.

In der Praxis werden jedoch genau diese beiden Ansätze benötigt, um die Demontierbarkeit von Akkus adäquat zu bewerten.

Die quantitative Bewertung ermöglicht eine präzise Messung der Demontagezeiten und des Arbeitsaufwands, was für die Standardisierung und Vergleichbarkeit der Ergebnisse unverzichtbar ist (Vanegas et al., 2017). Semi-quantitative Indikatoren wie die Verfügbarkeit von Reparaturinformationen und die Art der Befestigungselemente bieten hingegen die notwendige Flexibilität, um auch kontextabhängige und qualitative Unterschiede zu berücksichtigen, die für die tatsächliche Umsetzbarkeit der Reparatur durch Endnutzer entscheidend sind (Mauro et al. 2019).

Ein Bewertungssystem, das sich speziell auf die Demontierbarkeit von Akkus in Smartphones fokussiert, ist daher ein wichtiger Beitrag zur Schaffung transparenter und standardisierter Kriterien für die Reparierbarkeit von Smartphones. Durch die systematische Berücksichtigung von fünf wesentlichen Indikatoren - Demontagetiefe, Art der Befestigungselemente, Werkzeuge, Verfügbarkeit von Reparaturinformationen und Demontagezeit - kann das Modell dazu beitragen, die Reparaturfähigkeit von Smartphones objektiv und vergleichbar zu bewerten.

Die Relevanz des Modells wird insbesondere durch die zunehmenden regulatorischen Anforderungen unterstrichen, wie beispielsweise die Einführung eines Reparierbarkeitsindex in der EU, der Transparenz und Nachhaltigkeit fördert. Ein solches Modell bietet eine evidenzbasierte Grundlage, um die Demontierbarkeit und damit die potenzielle Lebensdauer von Smartphones zu verbessern, was einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung von Elektroschrott und zur Förderung einer Kreislaufwirtschaft leistet.

5.1 Demontagetiefe

Die Demontagetiefe definiert die Anzahl der notwendigen Arbeitsschritte zur Demontage eines Bauteils innerhalb eines Produkts und ist ein entscheidender Indikator für die Bewertung der Reparierbarkeit von Geräten. Diese Anzahl reflektiert den Aufwand, der notwendig ist, um an prioritäre Teile zu gelangen und sie gegebenenfalls auszutauschen (Cordella et al., 2018). Ein Schritt besteht aus einem Vorgang, der mit der Entfernung eines Teils und/oder mit einem Werkzeugwechsel endet. Die Demontagetiefe wird auf der Ebene jedes prioritären Teils bewertet und gibt damit Aufschluss über die Komplexität der Reparaturarbeiten (Europäische Kommission, 2023c).

Der Demontagebaum visualisiert die Reihenfolge und die Abhängigkeiten der einzelnen Schritte, die für den Zugang zu kritischen Komponenten notwendig sind. In einem schlecht reparierbaren Gerät manifestiert sich dies durch einen langen, linearen Reparaturpfad, der durchlaufen werden muss, bevor der Akku erreicht werden kann.

Dies impliziert, dass alle anderen Komponenten in sequenzieller Ordnung entfernt werden müssen, was den Reparaturprozess erheblich verlangsamt.

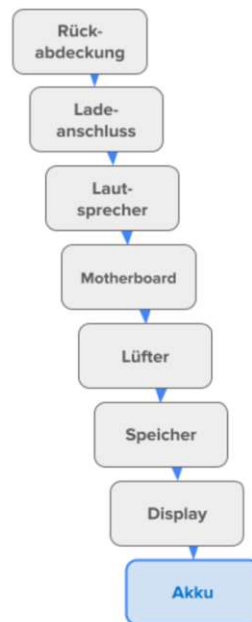


Abbildung 16: Linearer Demontagebaum (iFixit, 2024)

Im Gegensatz dazu zeichnet sich ein reparaturfreundliches Gerätedesign durch einen flachen Demontagebaum aus, in dem wichtige Komponenten unabhängig voneinander zugänglich sind. Dies ermöglicht eine schnelle und einfache Reparatur, da für den Austausch oder die Reparatur eines bestimmten Teils nicht zahlreiche andere Komponenten entfernt werden müssen. Ein solches Design minimiert den benötigten Zeitaufwand und die Anzahl der Werkzeuge, die für eine Reparatur erforderlich sind (Suovanen, 2024).

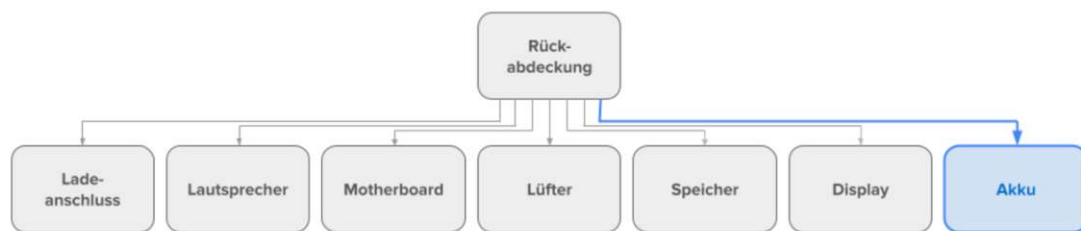


Abbildung 17: Flacher Demontagebaum (iFixit, 2024)

Zur präzisen und vergleichbaren Bewertung der Reparierbarkeit wird die ermittelte Anzahl der Arbeitsschritte in definierte Bewertungsklassen kategorisiert. Diese Klassen variieren von sehr einfach, charakterisiert durch wenige Schritte, bis zu sehr komplex, was viele Schritte erfordert. Die Klassen werden mittels einer Skala von A bis E eingeteilt, wobei jeder Klasse ein Punktwert von 0 bis 10 zugeordnet wird. Diese differenzierte Einteilung ermöglicht es, die Geräte gemäß ihrer Reparaturfreundlichkeit zu ordnen und bietet eine Analogie zur EU-Energieeffizienzkennzeichnung, die

Produkte nach Reparaturfreundlichkeit bis Mitte 2025 ebenfalls in Klassen von A bis E einteilen will.

Basierend auf der Analyse einer Stichprobe von 19 Smartphones (Apple, Samsung, Huawei) und mit einem Fokus auf prioritären Bauteilen wurde festgestellt, dass die Anzahl der Demontageschritte, je nach Modell, für den Akku zwischen 2 und 46 variiert, wobei der Medianwert bei 28 liegt (iFixit, 2019). In Tabelle 2 wird die Punktevergabe für die Anzahl der Arbeitsschritte wie folgt festgelegt:

Indikator	Bewertungsklasse	Anzahl der Arbeitsschritte x	Punkte
Demontagetiefe	A	$x \leq 2$	10
	B	$2 < x \leq 10$	8
	C	$10 < x \leq 20$	5
	D	$20 < x \leq 35$	3
	E	$x > 35$	0

Tabelle 2: Anzahl der Arbeitsschritte

Der Wert der Bewertungsklasse A wurde, wie oben beschrieben auf $x \leq 2$ festgelegt. Bei ausgewählten Gerätemodellen, die mit einer Klickverbindung an der Rückseite konstruiert sind, lässt sich der Akkuwechsel in lediglich zwei Schritten durchführen: Zunächst wird die Abdeckung geöffnet und anschließend der Akku entfernt. Diese Verfahrensweise charakterisiert vor allem ältere oder speziell entwickelte Modelle, die auf eine vereinfachte Wartung und erhöhte Benutzerfreundlichkeit ausgerichtet sind.

5.2 Art der Befestigungselemente

Die Art der Befestigungselemente eines Produkts ist maßgeblich für die Bewertung der Möglichkeiten zur Reparatur, Wiederverwendung oder Aufrüstung. Der Indikator „Befestigungselement“ analysiert, wie zwei verbundene Komponenten voneinander separiert werden können. Entscheidende Kriterien bei der Bewertung dieser Verbindungselemente sind deren Reversibilität und die Möglichkeit zur Wiederverwendung (Mauro et al., 2020).

Verbindungselemente wie Schrauben oder Klickverbindungen sind vorteilhaft für die Reparierbarkeit. Es gibt jedoch auch Befestigungsmethoden, wie Verklebungen oder Verschweißungen, die nicht rückgängig gemacht werden. Daher müssen verschiedene Befestigungsarten in den Bewertungsklassen berücksichtigt werden (Mauro et al., 2020).

In der Norm EN 45554 ist ein entsprechender Indikator für Befestigungselemente definiert, der die Kategorien A bis C umfasst, um eine vollständige Abdeckung möglicher Szenarien zu gewährleisten. Kategorie A steht für wiederverwendbare Verbindungen und wird mit 10 Punkten bewertet, während Kategorie B für entfernbare,

aber nicht wiederverwendbare Verbindungen steht und 5 Punkte erhält. Verbindungen, die weder entfernbar noch wiederverwendbar sind, fallen unter Kategorie C und erhalten in diesem Bewertungssystem null Punkte, was den Austausch von Teilen als unmöglich kennzeichnet (Ritthoff et al., 2021).

Es ist zu beachten, dass bei Vorhandensein verschiedener Arten von Verbindungselementen während der Demontage die ungünstigste Verbindung für die Gesamtbewertung ausschlaggebend ist.

Indikator	Bewertungsklasse	Art der Verbindung	Punkte
Befestigungsart	A	Wiederverwendbar	10
	B	Entfernbar	5
	C	Nicht wiederverwendbar/entfernbar	0

Tabelle 3: Art der Verbindung

5.3 Werkzeuge

Der Indikator Werkzeuge bewertet die Art der Werkzeuge, die notwendig sind, um Befestigungen zu lösen und betrachtet insbesondere die Verfügbarkeit dieser Werkzeuge für verschiedene Nutzergruppen. Eine Reparatur ist für die meisten Beteiligten durchführbar, wenn die erforderlichen Werkzeuge öffentlich zugänglich sind. Werden spezielle, nur bestimmten Zielgruppen zugängliche Werkzeuge benötigt, kann dies die Reparaturmöglichkeiten einschränken (Mauro et al., 2019).

Die Bewertungsklassen A bis E spezifizieren die Zugänglichkeit und Verfügbarkeit der Werkzeuge, entsprechend den in der EU (2023/1617) festgelegten Ökodesign-Anforderungen für Smartphones sowie den Spezifikationen der Norm EN 45554:

- **Klasse A – Keine Werkzeuge benötigt:** Dies stellt das ideale Szenario für die Demontage dar. Es sind keine Werkzeuge erforderlich, um die Reparatur oder Aufrüstung durchzuführen.
- **Klasse B – Einfache Werkzeuge:** Reparaturen sind mit Standardwerkzeugen möglich, die für Privatpersonen im Handel erhältlich sind oder die mit dem Produkt geliefert werden. Zu diesen einfachen Werkzeugen zählen unter anderem verschiedene Typen von Schraubenziehern für Schlitz-, Kreuzschlitz- und Torxschrauben (ISO2380, ISO8764, ISO10664), Innensechskantschlüssel (ISO2936), Ring-Maulschlüssel (ISO7738), diverse Zangen (Kombinations-, Abisolier- und Crimpzangen, Wasserpumpen- und Festklemmzangen), sowie Seitenschneider (ISO5749), Hebeleisen, Universalmesser, Pinzetten, Vergrößerungsgläser und Spatel.

- **Klasse C – Handelsübliche Werkzeuge:** Diese Kategorie umfasst Werkzeuge, die öffentlich erhältlich sind und weder den einfachen noch den herstellerspezifischen Werkzeugen zugeordnet werden.
- **Klasse D – Herstellerspezifische Werkzeuge:** Diese Werkzeuge sind nicht allgemein erhältlich und es existieren keine Lizenzen zu fairen und diskriminierungsfreien Bedingungen für deren Nutzung. Sie sind speziell für die Reparatur bestimmter Produkte konzipiert und meist nur durch Vertragspartner oder qualifizierte Reparaturdienste erhältlich (Europäische Kommission, 2023b).
- **Klasse E – Kein verfügbares Werkzeug:** In dieser Kategorie ist keine Reparatur mit verfügbaren Standard- oder spezifischen Werkzeugen möglich. Reparaturen sind aufgrund der Unzugänglichkeit der benötigten Werkzeuge praktisch nicht durchführbar (Europäische Kommission, 2023a).

Indikator	Bewertungsklasse	Demontagezeit t in Minuten	Punkte
Demontagezeit	A	$t \leq 2$	10
	B	$2 < t \leq 15$	8
	C	$15 < t \leq 30$	5
	D	$30 < t \leq 60$	3
	E	$t > 60$	0

Tabelle 4: Art des Werkzeugs

Die Bewertung wird durch das am wenigsten vorteilhaft verwendete Werkzeug bestimmt.

5.4 Demontagezeit

Die Demontagezeit stellt einen zentralen Indikator im Rahmen der Bewertung der Reparierbarkeit und Wartbarkeit technischer Geräte dar. Sie misst die erforderliche Zeit, um ein Produkt zu demontieren, was direkt die Kosten und den Aufwand der Instandhaltungsarbeiten beeinflusst. Die Demontagezeit wird durch verschiedene Faktoren bestimmt, darunter die Anzahl der Demontageschritte, die Art und Zugänglichkeit der Befestigungselemente sowie die Art der verwendeten Werkzeuge (Chu et al., 2024). Die Demontagezeit beeinflusst maßgeblich die Arbeitskosten und die Effizienz von Reparaturprozessen. Eine längere Demontagezeit kann direkt zu höheren Arbeitskosten führen, da mehr Zeit für die Durchführung der Reparatur oder Wartung aufgewendet werden muss (Mauro et al., 2020).

Es wurden zwei Methoden identifiziert, um die Zeitspanne für eine teilweise oder vollständige Demontage zu bestimmen: erstens die direkte Messung und zweitens die Berechnung basierend auf spezifischen Produktparametern wie der eDiM-Methode (Vanegas et al., 2017).

Die Bewertung der Demontagezeit wird in zwei Abschnitte unterteilt, wobei jedem eine unterschiedliche Gewichtung zukommt.

Der erste Abschnitt der Bewertung basiert auf der direkten Messung der effektiven Demontagezeit. Diese Zeitspanne erstreckt sich vom Beginn der ersten manuellen Handlung bis zum Abschluss des letzten Schrittes der Entnahme des Akkus aus dem Gerät (Chu et al., 2024).

Eine Analyse einer Stichprobe verschiedener Smartphones ergab, dass die Demontagezeiten für den Akku zwischen einer und 120 Minuten variieren, mit einem Median von 30 Minuten (iFixit, 2019).

Indikator	Bewertungsklasse	Demontagezeit t in Minuten	Punkte
Demontagezeit	A	$t \leq 2$	10
	B	$2 < t \leq 15$	8
	C	$15 < t \leq 30$	5
	D	$30 < t \leq 60$	3
	E	$t > 60$	0

Tabelle 5: Demontagezeit t in Minuten

Die Kategorisierung der Demontagezeiten variiert von „sehr schnell“ bei einer Zeitdauer von maximal zwei Minuten ($t \leq 2$) bis zu „sehr langsam“, wenn die Demontagezeit sechzig Minuten überschreitet ($t > 60$).

Im zweiten Abschnitt erfolgt die Berechnung der Demontagezeit auf Grundlage der eDiM-Methode. Dabei wird nicht nur die tatsächliche Demontagezeit mit der berechneten Referenzzeit verglichen, sondern die eDiM-Methode dient auch zur detaillierten Dokumentation jedes einzelnen Arbeitsschritts. Liegt die tatsächliche Demontagezeit unterhalb der mittels eDiM-Methode berechneten Zeit, werden 10 Punkte vergeben. Übersteigt die tatsächliche Demontagezeit die berechnete Zeit, erfolgt keine Punktevergabe.

Indikator	Bewertungsklasse	eDiM	Punkte
eDiM	A	unterhalb der Referenzzeit	10
	B	über der Referenzzeit	0

Tabelle 6: eDiM

5.5 Reparaturinformationen

Der Indikator „Reparaturinformationen“ evaluiert die Bereitstellung von essenziellen Reparatur- und Wartungsinformationen durch den Hersteller für Endnutzer, welche kritisch für die Ausführung von Reparaturen sind. Die Bewertung basiert primär darauf,

ob die Anleitungen vollständig sind und öffentlich ohne Kosten zugänglich gemacht werden. Reparaturanleitungen müssen frei verfügbar sein, entweder direkt auf der Website des Herstellers oder über einen deutlich sichtbaren Link. Sie dürfen nicht hinter einer Paywall verborgen oder nur nach einer Registrierung zugänglich sein.

Zur Erreichung der vollen Punktzahl müssen die Reparaturinformationen zudem folgende Kriterien erfüllen:

- Umfassende Anleitungen für den Austausch aller kritischen Komponenten und die
- Auflistung der benötigten Werkzeuge (Suovanen, 2024).

Ohne die Verfügbarkeit kostenloser Reparaturinformationen werden keine Punkte vergeben und Geräte können maximal 8,5 von 10 möglichen Punkten im Akkudemontierbarkeitsindex erreichen.

Indikator	Bewertungsklasse	Reparaturinformationen	Punkte
Reparaturinformationen	A	vollständig verfügbar	10
	B	nicht frei zugänglich	0

Tabelle 7: Reparaturinformationen

5.6 Berechnungsmethode Akkudemontierbarkeitsindex

Jede Kategorie trägt einen prozentualen Anteil zur Gesamtbewertung bei. Die Punkte jeder Kategorie werden mit dem zugehörigen Gewichtungsfaktor multipliziert, um den Beitrag jeder Kategorie zur Gesamtpunktzahl zu ermitteln. Insgesamt sind bei jeder Unterkategorie 10 Punkte zu erreichen.

Die Gewichtung der Bewertungskategorien basiert auf der Delegierten Verordnung (2023/1669) und der iFixit-Methodik. Dabei wurden gezielte Anpassungen vorgenommen, um den spezifischen Anforderungen an die Demontierbarkeit von Akkus in Smartphones gerecht zu werden. Während die Verordnung eine allgemeine Bewertung der Reparierbarkeit vorschlägt, legt das hier entwickelte Modell den Fokus stärker auf die technische Demontierbarkeit. Es berücksichtigt dabei zusätzliche Indikatoren, wie die Demontagezeit und die eDiM-Methode.

Die Gewichtung der Demontagetiefe und der Reparaturinformationen wurden direkt aus der EU-Verordnung übernommen, da diese in der Delegierten Verordnung (2023/1669) als zentrale Parameter für die Reparierbarkeit festgelegt sind.

Die Kategorien Verbindungsart und Werkzeuge, die in der Verordnung einen geringeren Anteil haben, werden in diesem Modell gleichmäßig auf jeweils 20% gesetzt. Die Kategorie Demontagezeit, die sich aus der tatsächlichen Demontagezeit

(15%) und einer Referenzzeit (5%) zusammensetzt, wird in der EU-Verordnung nicht hervorgehoben, erhält jedoch in diesem Bewertungssystem eine Gewichtung von 20%.

- **Demontagetiefe:** 25%
- **Verbindungsart:** 20%
- **Werkzeuge:** 20%
- **Demontagezeit:** 20%
 - **Tatsächliche Demontagezeit:** 15%
 - **eDiM:** 5%
- **Reparaturinformation:** 15%

Die Gesamtpunkteanzahl errechnet sich folgendermaßen:

Gesamtpunkteanzahl

$$= (P_{DT} \times G_{DT}) + (P_{VA} \times G_{VA}) + (P_{WZ} \times G_{WZ}) + (P_{DZ} \times G_{DZ}) \\ + (P_{EDIM} \times G_{EDIM}) + (P_{RI} \times G_{RI})$$

Dabei steht:

- **P** für die Punktezahl in der jeweiligen Kategorie
- **G** für die Gewichtung der jeweiligen Kategorie
- **DT** für Demontagetiefe
- **VA** für Verbindungsart
- **WZ** für Werkzeuge
- **DZ** für Demontagezeit
- **EDIM** für eDiM-Methode
- **RI** für Reparaturinformation

Die Bewertungsskala für die Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones wurde in Anlehnung an das bekannte Energieeffizienzlabel der EU entwickelt. Der Akkudemontierbarkeitsindex ermöglicht es, die Leichtigkeit der Reparatur eines Geräts auf einer klar definierten und verständlichen Skala zu quantifizieren. Die Skala ist in fünf Kategorien unterteilt, die von „am besten demontierbar“ bis „am wenigsten demontierbar“ reichen und jeweils spezifische Punktbereiche von 0 bis 10 umfassen.

- **Kategorie A - Exzellent:** 8,6 bis 10 Punkte
- **Kategorie B - Sehr gut:** 6,7 bis 8,59 Punkte
- **Kategorie C - Gut:** 5,1 bis 6,69 Punkte
- **Kategorie D - Ausreichend:** 3,5 bis 5,09 Punkte
- **Kategorie E - Mangelhaft:** 0 bis 3,49 Punkte

A
B
C
D
E

Die erste Kategorie A basiert auf einem Prinzip, das direkt aus der iFixit-Berechnungsmethodik (Suovanen, 2024) übernommen wurde: Eine „am besten

demontierbar“ Bewertung ist nur dann möglich, wenn eine Reparaturanleitung öffentlich und kostenlos zugänglich ist. Dies hat iFixit so festgelegt, um sicherzustellen, dass Nutzer in der Lage sind, eigenständig und ohne Hürden Reparaturen durchführen zu können. Die restliche Punkteverteilung orientiert sich an der Delegierten Verordnung (2023/1669), welche eine maximale Punktezahl von 5 Punkten für die Bewertung der Reparierbarkeit festlegt. Um diese Systematik in das entwickelte Bewertungssystem zu integrieren, wurde die Punktevergabe der Verordnung entsprechend proportional skaliert.

6 Demonstrationsphase

In der Demonstrationsphase wird das entwickelte Bewertungsmodell zur Demontierbarkeit von Akkus in Smartphones in der Praxis getestet. Ziel ist es, die Anwendbarkeit und Aussagekraft des Modells zu verifizieren, indem die Demontage von Akkus aus zehn verschiedenen Smartphones detailliert untersucht wird. Dabei wird jedes Gerät separat betrachtet und der Demontageprozess wird anhand zuvor definierter Kriterien bewertet. Die einzelnen Schritte der Demontage werden dabei genau dokumentiert, um sowohl die Vergleichbarkeit als auch die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Die praktische Demonstration trägt zur Beantwortung der Forschungsfrage SQ3 bei und unterstützt das Erreichen des Forschungsziels O4, indem die Praxistauglichkeit des Modells sowie dessen Aussagekraft in realen Anwendungsfällen evaluiert werden.

Die eDiM wird auf Basis von Reparaturanleitungen erstellt. Dabei werden primär Reparaturanleitungen des Herstellers herangezogen. Falls solche nicht verfügbar sind, wird auf alternative Quellen wie die Reparaturanleitungen von Plattformen wie iFixit oder iDoc zurückgegriffen.

Die ausgewerteten eDiM-Tabellen sowie die ausgefüllten Bewertungsschemata für jedes analysierte Smartphone sind im Anhang dieser Arbeit dargestellt.

6.1 Smartphoneauswahl

Die untersuchten Smartphones wurden vom Demontage- und Recyclingzentrum (DRZ) Wien zur Verfügung gestellt. Diese Zusammenarbeit ermöglichte eine praxisnahe Untersuchung einer repräsentativen Auswahl an Smartphones unterschiedlicher Hersteller und Baujahre.

Sony Xperia XA

Das Sony Xperia XA (2016) erzielt im Akku-Demontierbarkeitsindex die Kategorie "C" mit einer Punktzahl von 5,3. Positiv hervorzuheben sind die geringe Demontagetiefe (10 Demontageschritte), die Verwendung einfacher Werkzeuge und eine Demontagezeit von knapp über 5 Minuten, die unterhalb der Referenzzeit liegt. Allerdings erschwert die verklebte Rückseite den Zugang zum Inneren des Geräts. Zusätzlich wirkt sich das Fehlen frei zugänglicher Reparaturinformationen negativ auf die Bewertung aus.

Samsung Galaxy A02s

Das Samsung Galaxy A02s (2021) erreicht im Akku-Demontierbarkeitsindex die Bewertung "E" mit einer Gesamtpunktzahl von 2,85. Prinzipiell könnte das Ergebnis

besser ausfallen, da in der Theorie nur 17 Demontageschritte und etwa 5,5 Minuten benötigt werden, um den Akku zu erreichen. Allerdings wurde die Demontage erheblich durch den stark verklebten Akku beeinträchtigt. Beim Versuch, den Akku zu entfernen, verbogen sich sowohl das Gehäuse als auch der Akku. Erst nach einer 40-minütigen Lagerung im Tiefkühler konnte der Kleber porös gemacht und der Akku entfernt werden.

iPhone 6s

Das iPhone 6s (2015) erreicht im Akku-Demontierbarkeitsindex die Kategorie "D" mit einer Gesamtpunktzahl von 3,55. Die Bewertung wird durch die hohe Demontagetiefe (23 Demontageschritte), die nicht wiederverwendbaren Verbindungen und das Fehlen frei zugänglicher Reparaturinformationen deutlich eingeschränkt. Zudem sind sowohl der Akku als auch das Display verklebt, was die Demontage erschwert.

Samsung Galaxy Alpha

Das Samsung Galaxy Alpha (2016) zeichnet sich durch eine hohe Akkudemontagefreundlichkeit aus. Die Rückseite ist mit 16 leicht lösbaren Snapfits befestigt und der Akku kann in weniger als 10 Sekunden ohne Werkzeuge entnommen werden. Trotz der einfachen Demontage und des schnellen Akkutauchs wird das Gerät aufgrund fehlender offizieller Reparaturanleitungen mit der Note "B" bewertet.

Huawei P9 Lite

Das Huawei P9 Lite (2019) erreicht im Akku-Demontierbarkeitsindex die Kategorie "E" mit einer Gesamtpunktzahl von 2,35, was auf erhebliche Schwächen in der Reparierbarkeit hinweist. Der Hauptgrund für die niedrige Bewertung ist der stark verklebte Akku, der weder durch Erhitzen noch durch Abkühlen entfernt werden konnte. Während der Demontage hat sich der Akku so stark verbogen, dass ein sicherer Austausch unmöglich war.

LG G6

Das LG G6 (2017) erreicht im Akku-Demontierbarkeitsindex die Kategorie "D" mit einer Gesamtpunktzahl von 3,55. Ein wesentlicher Nachteil ist die stark verklebte Rückseite, die die Demontage erschwert. Obwohl die Nutzung einfacher Werkzeuge und eine Demontagezeit von 15 Minuten positiv bewertet wurden, verhindern die nicht wiederverwendbaren Verbindungen und das Fehlen frei zugänglicher Reparaturinformationen eine bessere Bewertung.

iPhone 5

Das iPhone 5 (2012) erreicht im Akku-Demontierbarkeitsindex die Kategorie "C" mit einer Punktzahl von 6,05, was auf eine durchschnittliche Reparierbarkeit hinweist. Positiv hervorzuheben ist, dass vollständig auf den Einsatz von Klebeverbindungen verzichtet wurde. Zudem kann die Demontage mit einfachen Werkzeugen durchgeführt werden und dauert zirka 12 Minuten. Insgesamt weist das iPhone 5 solide Reparaturmerkmale auf, bietet jedoch Raum für Optimierungen, um eine höhere Reparaturfreundlichkeit zu erreichen.

Fairphone 3

Das Fairphone 3 (2019) überzeugt mit Bestnoten in allen Kategorien und herausragender Akkudemontierbarkeit. Die Rückseite ist mit 22 leicht lösbaren Snapfits befestigt und der Akku lässt sich ohne Werkzeuge in wenigen Sekunden entnehmen. Im Gegensatz zum Samsung Galaxy Alpha bietet das Fairphone 3 zudem alle notwendigen Reparaturanleitungen, weshalb es die Bestnote „A“ erhält.

Huawei P30 Lite

Das Huawei P30 Lite (2019) erzielt im Akku-Demontierbarkeitsindex die Bewertung "E" mit einer Gesamtpunktzahl von 3,1. Der größte Nachteil ist die vollständig verklebte Rückseite aus Glas. Dadurch wird der Demontageprozess erheblich erschwert und zeitaufwändig macht. Für die Demontage waren zudem 18 Schrauben zu lösen, was zusätzlich Zeit in Anspruch nahm. Positiv hervorzuheben ist die innovative Lasche am Akku, die ein einfaches Entfernen ohne großen Aufwand ermöglicht. Trotz dieser benutzerfreundlichen Lösung wird die Bewertung durch die verklebte Rückseite und die anspruchsvolle Demontage beeinträchtigt.

Oneplus 6

Das OnePlus 6 (2018) erreicht im Akku-Demontierbarkeitsindex die Kategorie "D" mit einer Punktzahl von 3,6. Zwar zeigt das Gerät gute Ergebnisse bei der Demontagetiefe (14 Demontageschritte) und der Nutzung einfacher Werkzeuge, jedoch wird die Reparierbarkeit durch die verklebte Rückseite eingeschränkt. Mit einer Demontagezeit von 18 Minuten und nicht frei zugänglichen Reparaturinformationen zeigt das OnePlus 6 insgesamt eine geringe Reparaturfreundlichkeit.

6.2 Auswertung der Ergebnisse der Akkudemontage

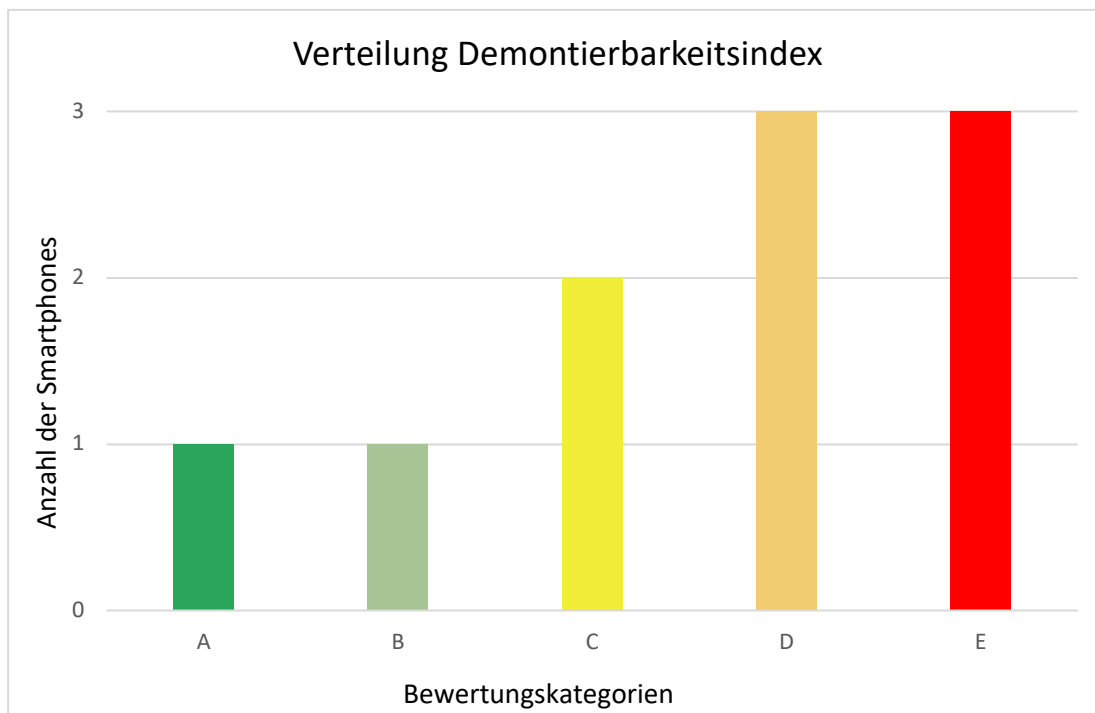


Tabelle 8: Verteilung der Bewertungen (eigene Darstellung)

Das Balkendiagramm (Tabelle 8) zeigt die Verteilung der Bewertungen der zehn untersuchten Smartphones anhand ihres Akku-Demontierbarkeitsindex. Die Auswertung verdeutlicht, dass nur ein Gerät die Bestnote A erreicht hat, was auf eine herausragende Reparaturfreundlichkeit hinweist. In der Kategorie B befindet sich lediglich ein Gerät, welches eine gute Demontierbarkeit aufweist. Zwei Geräte wurden in die Kategorie C eingestuft. Der größte Anteil entfällt jedoch auf die Kategorien D und E mit jeweils drei Geräten, die deutliche Schwächen bei der Demontierbarkeit aufweisen. Diese Verteilung macht deutlich, dass die Mehrheit der untersuchten Smartphones (6 von 10) in den unteren Bewertungskategorien liegt, was auf erhebliche Herausforderungen bei der Demontage und Reparatur hinweist.

Die durchschnittliche Demontagezeit pro Smartphone betrug 23 Minuten und 52 Sekunden, während die durchschnittliche Anzahl der Demontageschritte bei 16,6 lag.

6.3 Herausforderungen bei der Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones

Die Reparierbarkeit, insbesondere die Möglichkeit zur Akkudemontage, wird durch eine Vielzahl technischer Barrieren eingeschränkt. Basierend auf den praktischen Erkenntnissen, die bei der Demontage von zehn Smartphones gewonnen wurden, konnten wesentliche Herausforderungen identifiziert werden.

6.3.1 Klebeverbindungen

Der verstärkte Einsatz von Klebeverbindungen in Smartphones stellt eine zentrale Herausforderung für die Akkudemontage dar. Klebeverbindungen werden zunehmend verwendet, um eine schlankere und robustere Bauweise zu ermöglichen, da sie eine feste und langlebige Verbindung zwischen den Bauteilen schaffen. Jedoch bringen sie erhebliche Einschränkungen bei der Zugänglichkeit zu wesentlichen Komponenten wie dem Akku mit sich (Lang & Klemm, 2019).

Ein Problem bei der Nutzung von Klebeverbindungen ist, dass der direkte Zugang zum Inneren des Smartphones erschwert wird. Häufig müssen verklebte Displays oder Rückseiten zunächst entfernt werden, bevor der Akku erreicht werden kann. Dies stellt eine Hürde dar, da diese Komponenten besonders empfindlich sind. Displays sind anfällig für Schäden durch mechanische Belastungen oder ungleichmäßige Wärmeverteilung, während Rückseiten, die oft aus gehärtetem Glas bestehen, trotz ihrer Robustheit leicht brechen können. Die Trennung der Klebeverbindungen erfordert spezielle Techniken, die sowohl zeitaufwendig als auch risikobehaftet sind. In den meisten Fällen ist es notwendig, den Kleber zunächst durch Erhitzen zu lösen, um seine Haftkraft zu reduzieren. Alternativ kann der Kleber durch Abkühlung porös und brüchig gemacht werden. Diese zusätzlichen Schritte verlängern die Reparaturzeit und erfordern ein hohes Maß an Präzision (Cordella et al, 2020).

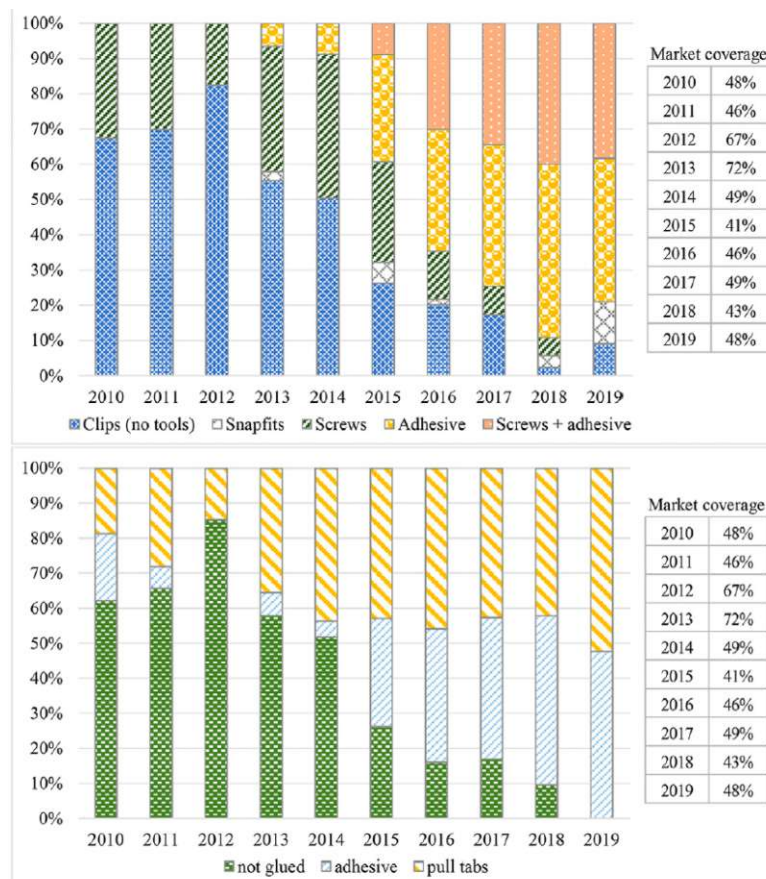


Abbildung 18: Entwicklung der Verbindungstechniken (Cordella et al., 2020)

Abbildung 18 veranschaulicht die Entwicklung der Verbindungs- und Befestigungstechniken für Gehäuse (oben) und Akkus (unten) bei den meistverkauften Smartphones in Europa zwischen 2010 und 2019. Sie zeigt eine deutliche Zunahme der Verwendung von Klebeverbindungen im Laufe des Jahrzehnts. Während mechanische Befestigungen wie Clips oder Snapfits zu Beginn des Zeitraums dominierten, stieg der Anteil von Klebeverbindungen ab 2015 signifikant an. Seit 2016 stellen Klebeverbindungen die häufigste Befestigungsmethode dar, während der Anteil nicht verklebter Verbindungen stark zurückging. Dieser Wandel spiegelt eine Veränderung der Prioritäten der Hersteller wider, die zugunsten eines kompakteren Designs auf eine leichtere Demontierbarkeit verzichten. Diese Entwicklung zeigt sich auch bei der Analyse der zehn demontierten Smartphones: Bei nur drei Geräten war keine Klebeverbindung bei der Akkudemontage zu lösen. Diese Modelle stammen aus den Jahren 2012 und 2016 sowie das Fairphone 3 aus dem Jahr 2019.

Das Fairphone 3 repräsentiert eine Ausnahme in der Branche, da das Unternehmen Fairphone eine modulare Bauweise und eine einfache Demontage als zentrale Prinzipien seiner Produktgestaltung verfolgt. Diese Philosophie zielt darauf ab, die Lebensdauer der Geräte durch eine vereinfachte Reparatur zu verlängern und so die Nachhaltigkeit im Elektroniksektor zu fördern. Fairphone stellt dabei Reparaturfreundlichkeit und Umweltbewusstsein in den Mittelpunkt, was das Unternehmen zu einem Vorreiter im Bereich nachhaltiger Smartphone-Designs macht. (Wir Sind Fairphone. Zurück in Die Zukunft., 2024)

6.3.2 Linearer Demontagebaum

Auffallend bei der Demontage moderner Smartphones waren die linearen Demontagebäume, die die Reparierbarkeit negativ beeinflussten. Diese Struktur erfordert, dass mehrere Bauteile in einer festgelegten Reihenfolge entfernt werden müssen, um Zugang zu zentralen Komponenten wie dem Akku zu erhalten. Solche Designs steigern die Komplexität und Dauer des Demontageprozesses deutlich und widersprechen den Grundsätzen einer modularen Bauweise, die auf einfache und schnelle Reparaturen abzielt.

Ein anschauliches Beispiel hierfür ist das Huawei P30 Lite. Die Entfernung des Akkus erforderte einen aufwendigen Demontageprozess. Zunächst musste die Rückseite entfernt werden, gefolgt von der Abdeckung des Kameramoduls, der Lautsprechereinheit und weiteren Bauteilen. Darüber hinaus war das Lösen von insgesamt 18 Schrauben notwendig, was den Prozess zusätzlich verlängerte. Diese ineffiziente Bauweise resultiert aus der linearen Anordnung der Bauteile, bei der kein direkter Zugang zur Zielkomponente besteht. Die Folge ist eine unnötig verlängerte Demontagezeit und ein erhöhtes Risiko für Fehler oder Beschädigungen an empfindlichen Bauteilen während des Prozesses.

6.3.3 Fehlende Reparaturanleitungen

Die Bereitstellung von Reparaturinformationen ist ein zentraler Faktor für die Reparierbarkeit von Smartphones. Erst seit 2020 stellen führende Hersteller wie Apple und Samsung offizielle Reparaturanleitungen für ihre Geräte zur Verfügung. Bei der praktischen Untersuchung der Smartphones im Rahmen dieser Arbeit konnte lediglich auf eine einzige offizielle Reparaturanleitung zurückgegriffen werden. Lediglich das Fairphone 3 zeichnete sich durch die Bereitstellung vollständiger und umfassender Reparaturinformationen aus. Die späte Einführung offizieller Reparaturanleitungen durch die großen Hersteller stellt insbesondere für ältere Modelle ein Problem dar. Für Geräte, die vor 2020 auf den Markt gebracht wurden, fehlen offizielle Reparaturanleitungen vollständig. Das erschwert Reparaturen, insbesondere bei Smartphones mit komplexen Demontagebäumen, verklebten Komponenten oder schwer zugänglichen Bauteilen. In der Praxis sind Reparaturen auf Plattformen wie iFixit oder iDoc angewiesen, die jedoch nicht für alle Modelle umfassende Anleitungen anbieten.

6.3.4 Defekte Displays und Rückseiten

Defekte Displays oder Rückseiten, insbesondere wenn sie gesprungen oder beschädigt sind, stellen in der Praxis eine Herausforderung für die Reparatur von Smartphones dar. In vielen Fällen wird ein Saugnapf benötigt, um gezielten Druck auf das Display oder die Rückseite des Smartphones auszuüben. Dadurch kann ein kleiner Spalt zwischen der jeweiligen Komponente und dem Gehäuse geschaffen werden, der den Zugang zum Inneren des Geräts erleichtert. Bei beschädigten oder gebrochenen Oberflächen ist dies jedoch äußerst schwierig, da der Saugnapf aufgrund der Unebenheiten nicht haften kann. Um dieses Problem zu lösen, muss ein Klebestreifen auf die beschädigte Oberfläche aufgebracht, um eine glatte und haftfähige Fläche für den Saugnapf zu schaffen. Darüber hinaus weisen gebrochene Displays oder Rückseiten oft scharfe Kanten auf, die ein erhöhtes Verletzungsrisiko darstellen. Daher ist das Tragen von Handschuhen dringend empfohlen, um Schnittverletzungen während der Demontage zu vermeiden.

6.4 Fazit

Ab dem 18. Februar 2027 treten die Anforderungen des Artikels 11 der neuen Batterieverordnung in Kraft, die eine signifikante Veränderung in der Konstruktion und Herstellung von Smartphones verlangen. Laut Verordnung gilt eine Gerätebatterie nur dann als „leicht zu entfernen“, wenn sie mit handelsüblichen Werkzeugen – oder, falls erforderlich, mit kostenlos bereitgestellten Spezialwerkzeugen – aus einem Gerät entnommen werden kann. Wesentlich ist hierbei, dass die Demontage ohne den Einsatz von Wärmeenergie, Lösungsmitteln oder herstellerspezifischen Werkzeugen

möglich sein muss (2023/1542). Diese Vorgaben schließen explizit den Einsatz von Klebeverbindungen aus, da sie weder einfach lösbar noch nachhaltig oder benutzerfreundlich sind.

Die in Abbildung 18 dargestellte Analyse der Entwicklung der Verbindungstechniken zeigt jedoch deutlich, dass Klebeverbindungen aktuell eine dominierende Methode darstellen. Insbesondere ab 2015 sind Klebeverbindungen in fast jedem untersuchten Smartphone-Modell präsent, sei es als alleinige Befestigung oder in Kombination mit anderen Befestigungsmechanismen wie Schrauben. Dies stellt eine erhebliche Herausforderung für Endnutzer dar, da die Entfernung solcher Akkus häufig den Einsatz von Wärme, Lösungsmitteln oder anderen Hilfsmitteln erfordert – Maßnahmen, die laut der Verordnung ab 2027 nicht mehr zulässig sein werden.

Die Entwicklung über die Jahre verdeutlicht zudem, dass der Anteil einfacher Befestigungsmethoden wie Clips oder Snapfits, die ohne Kleber oder komplizierte Werkzeuge auskommen, stetig abgenommen hat. Der verstärkte Einsatz von Klebeverbindungen deutet auf eine Entwicklung hin, die die Reparatur und das Recycling zunehmend erschwert.

Die neuen gesetzlichen Vorgaben zwingen Hersteller dazu, ihre Designstrategien grundlegend zu überdenken. Der Verzicht auf Klebeverbindungen und die Einführung von einfacher zugänglichen, modularen Befestigungsmethoden wie Schrauben oder Snapfits wären essenzielle Schritte, um die Anforderungen zu erfüllen. Die Herausforderung besteht nicht nur in der technischen Umsetzung, sondern auch in der Balance zwischen Reparaturfreundlichkeit, Produktionskosten und weiteren Designanforderungen wie Wasser- und Staubdichtigkeit.

Abzuwarten bleibt, wie schnell und in welchem Umfang die Hersteller diese neuen Standards umsetzen werden. Angesichts der aktuellen Trends in der Konstruktion ist klar, dass erhebliche Investitionen in die Forschung und Entwicklung nötig sind, um den Anforderungen des Artikels 11 gerecht zu werden.

7 Expert:innenvalidierung

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden semi-strukturierte Interviews mit Expert:innen durchgeführt, um das entwickelte Bewertungssystem zur Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones zu evaluieren. Ziel dieser Interviews war es, die Aussagekraft, Anwendbarkeit und Vollständigkeit des Systems zu überprüfen. Durch den gezielten Einsatz semi-strukturierter Interviews wurde eine strukturierte, aber zugleich flexible Datenerhebung ermöglicht.

7.1 Semi-strukturierte Interviews

Die Methode des semi-strukturierten Interviews gehört zu den qualitativen Forschungsmethoden und wird häufig in Studien eingesetzt, um detaillierte und kontextbezogene Daten zu erheben (Mayring, 2000). Im Gegensatz zu standardisierten Interviews, die streng strukturiert sind, kombiniert das semi-strukturierte Interview einen vorab entwickelten Leitfaden mit einer offenen Gesprächsführung. Diese Kombination aus Struktur und Flexibilität macht das semi-strukturierte Interview zu einer effektiven Methode, um nicht nur spezifische Fragen zu beantworten, sondern auch während des Interviews neue Erkenntnisse zu generieren. Zudem ermöglicht die flexible Gesprächsführung, gezielt auf den Interviewpartner einzugehen und dessen Erfahrungen in die Analyse einzubeziehen (Qu & Dumay, 2011).

Im Zuge der Evaluierung wurden zwei Expert:innen befragt, wobei ein Interview online und das andere in Präsenz durchgeführt wurde. Beide Interviews wurden aufgezeichnet, um sie anschließend der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2000) zu unterziehen. Zu Beginn der Interviews wurden die Motivation dieser Arbeit sowie das zugrunde liegende Bewertungsmodell ausführlich vorgestellt und erläutert. Der Hauptteil der Interviews bestand aus einer semi-strukturierten Befragung der Expert:innen auf Basis eines zuvor entwickelten Interviewleitfadens:

- **Einleitung**
 1. In welchem Kontext beschäftigen Sie sich beruflich oder projektbezogen mit der Demontage von Akkus aus Smartphones oder Elektrokleingeräte?
 2. Welche Herausforderungen und Hürden haben Sie in der Praxis bei der Demontage von Akkus aus Smartphones festgestellt und welche Aspekte erweisen sich dabei als besonders problematisch?
- **Vollständigkeit des Bewertungssystems**
 3. Deckt das Bewertungssystem Ihrer Meinung nach alle relevanten Aspekte und Indikatoren ab, um die Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones umfassend zu bewerten? Falls nicht, sollten Bereiche, Indikatoren oder die Gewichtung einzelner Indikatoren ergänzt oder angepasst werden?

- **Anwendbarkeit in der Praxis**
 4. Welche Herausforderungen sehen Sie bei der praktischen Anwendung des Modells?
 5. Gibt es Ihrer Meinung nach Einschränkungen bei der Anwendung in der Praxis?
- **Aussagekraft des Bewertungssystems**
 6. Inwiefern liefert das Bewertungssystem Ihrer Meinung nach verlässliche und aussagekräftige Ergebnisse zur Beurteilung der Demontierbarkeit?
 7. Welche Stärken, Schwächen und Optimierungspotentiale sehen Sie für das Bewertungssystem?
 8. Sehen Sie Potenzial in diesem Bewertungssystem, es so zu skalieren und auf weitere priorisierte Bauteile auszuweiten, um künftig eine ganzheitliche Bewertung des gesamten Smartphones zu ermöglichen?
- **Abschluss**
 9. Haben Sie abschließende Fragen, Anmerkungen oder Empfehlungen?

7.2 Auswertung und Diskussion der ExpertInneninterviews

Im nachfolgenden Abschnitt erfolgen die Auswertung und die Diskussion der erhobenen Interviewdaten. Zur eindeutigen Zuordnung der Aussagen der befragten Personen wird die Codierung „I#“ verwendet.

Frage 1: In welchem Kontext beschäftigen Sie sich beruflich oder projektbezogen mit der Demontage von Akkus aus Smartphones oder Elektrokleingeräte?

Eine der befragten Expert:innen ist im Bereich zirkulärer Geschäftsmodelle und der Kreislaufwirtschaft tätig und fokussiert sich auf die Entwicklung strategischer Konzepte zur nachhaltigen Ressourcennutzung (I1). Die zweite Expert:in leitet ein sozial gefördertes Recycling- und Demontagezentrum, in dem Elektrogeräte in Einzelteile zerlegt werden (I2).

Frage 2: Welche Herausforderungen und Hürden haben Sie in der Praxis bei der Demontage von Akkus aus Smartphones festgestellt und welche Aspekte erweisen sich dabei als besonders problematisch?

- **Herausforderungen bei verklebten Akkus:** Es wurde betont, dass verklebte Akkus eine besondere Hürde darstellen. Solche Geräte werden aufgrund der Komplexität nicht im eigenen Betrieb zerlegt, sondern an externe Firmen weitergegeben. Im Betrieb werden lediglich leicht zu entnehmende Akkus entfernt. Sobald eine aufwändigere Demontage erforderlich ist, wie bei fest verbauten oder verklebten Akkus, muss die weitere Verarbeitung ausgelagert werden, da dies sowohl die technischen als auch die personellen Kapazitäten

übersteigt. Die Demontage erfordert zudem geschultes Personal, wodurch der Zeitaufwand erheblich steigen würde (I2).

Frage 3: Deckt das Bewertungssystem Ihrer Meinung nach alle relevanten Aspekte und Indikatoren ab, um die Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones umfassend zu bewerten? Falls nicht, sollten Bereiche, Indikatoren oder die Gewichtung einzelner Indikatoren ergänzt oder angepasst werden?

- **Fehlende Indikatoren:** Modularität wurde als potenzieller Indikator diskutiert, jedoch als nicht zwingend notwendig eingeschätzt, da Akkus üblicherweise einzeln ausgetauscht werden können (I1). Die Verfügbarkeit und Kosten von Ersatzteilen wurden als wichtige Aspekte für zirkuläre Geschäftsmodelle benannt, jedoch nicht als essenzielle Ergänzung für das technische Bewertungssystem (I1, I2).
- **Gewichtung der Indikatoren:** Die Demontagezeit wurde intensiv diskutiert. Die Expert:innen wiesen darauf hin, dass sie eng mit der Demontagetiefe zusammenhängt (I1, I2). Die Diskussion zeigte, dass eine hohe Anzahl an Demontageschritten nicht zwangsläufig Rückschlüsse auf die tatsächliche Demontagedauer zulässt. Die Art der Verbindungen (z. B. Schrauben vs. Klebeverbindungen) beeinflusst die Zeit, so dass die Demontagezeit als eigenständiger Indikator sinnvoll bleibt.
- **Verständlichkeit für AnwenderInnen:** Die Berechnung der Demontagezeit und deren Gewichtung wurden als nachvollziehbar bewertet (I1, I2). Es wurde angemerkt, dass die eDiM-Methode, für Personen ohne technischen Hintergrund schwer verständlich sein könnte (I1).

Die Analyse zeigt, dass das Bewertungssystem die wesentlichen technischen Indikatoren zur Beurteilung der Demontierbarkeit von Akkus umfasst, jedoch Optimierungspotentiale bestehen. Während Modularität, Ersatzteilkosten und Ersatzteilverfügbarkeit als sinnvolle Ergänzungen diskutiert wurden, ist ihre Integration aufgrund der primären technischen Fokussierung nicht zwingend notwendig.

Frage 4,5: Welche Herausforderungen sehen Sie bei der praktischen Anwendung des Modells? Gibt es Ihrer Meinung nach Einschränkungen bei der Anwendung in der Praxis?

- **Variabilität der Demontagezeit:** Es wurde hervorgehoben, dass die Demontagezeit stark variieren kann, abhängig von der Erfahrung und den Fähigkeiten der ausführenden Personen. Beispielsweise könnte eine Demontage von geübtem Fachpersonal wesentlich schneller durchgeführt werden als von ungeschulten Anwender:innen. Dadurch können Schwierigkeiten bei der Ermittlung robuster Vergleichswerte für die Bewertung entstehen (I1).

- **Einsatzpotential im B2B-Sektor:** Für Unternehmen, insbesondere im B2B-Bereich (Business-to-Business), wurde das Modell als nützlich bewertet, um Reparaturkosten und Arbeitszeiten präzise kalkulieren zu können (I1).
- **Fehlende wirtschaftliche Perspektive:** Weiters wurde angemerkt, dass das Modell keine expliziten wirtschaftlichen Indikatoren wie Ersatzteilkosten, Reparaturkosten oder Restwert beinhaltet. Diese könnten für Unternehmen entscheidend sein, um das Bewertungssystem effektiv in ihre Prozesse zu integrieren (I1, I2).
- **Zielgruppenspezifische Relevanz:** Das Bewertungssystem ist besonders wertvoll für Konsument:innen mit Interesse an Nachhaltigkeit. Es hilft insbesondere jenen, die ein Gerät selbst reparieren oder sich vor dem Kauf über die Reparaturfähigkeit informieren möchten. Gleichzeitig könnte das System auch für weniger informierte Konsument:innen nützlich sein, da es durch die einfache Kennzeichnung (A-E) eine Orientierungshilfe bietet. Dies würde es auch technisch weniger versierten Personen ermöglichen, auf einen Blick die Reparaturfreundlichkeit eines Geräts zu beurteilen (I2).

Frage 6: Inwiefern liefert das Bewertungssystem Ihrer Meinung nach verlässliche und aussagekräftige Ergebnisse zur Beurteilung der Demontierbarkeit?

- **Positiver Gesamteindruck:** Das Bewertungssystem wird als verlässlich und aussagekräftig eingeschätzt, da es auf klar definierten Indikatoren basiert (I1, I2). Sowohl aus wirtschaftlicher Perspektive (I1), als auch von technischer Seite (I2) wurde es als durchdacht und schlüssig bewertet.

Frage 7: Welche Stärken, Schwächen und Optimierungspotentiale sehen Sie für das Bewertungssystem?

- **Das Bewertungssystem kann eine Doppelfunktion erfüllen:** Das Bewertungssystem bietet eine detaillierte technische Analyse für B2B sowie eine einfache, visuelle Orientierungshilfe für B2C (Business-to-Consumer). Im B2B-Bereich bietet das Modell Unternehmen die Möglichkeit, Reparaturkosten und Arbeitszeiten präziser zu kalkulieren. Allerdings wurde das Fehlen wirtschaftlicher Indikatoren wie Ersatzteilkosten oder Restwerte kritisiert, die für eine betriebswirtschaftliche Nutzung essenziell wären (I1). Für Endnutz:innen bietet die einfach verständliche Bewertungsskala einen klaren Vorteil, da die Reparaturfreundlichkeit auf einen Blick ersichtlich ist (I2).
- **Herausforderung durch Variabilität:** Wie schon in der Beantwortung der Fragen 4 und 5, wurde auf die Variabilität der Demontagezeiten hingewiesen.
- **Notwendigkeit eines breiteren Datenpools:** Es wurde betont, dass die Aussagekraft des Bewertungssystems von der Größe und Vielfalt des zugrundeliegenden Datenpools abhängt. Um dauerhaft verlässliche und

repräsentative Ergebnisse zu erzielen, müssten eine Vielzahl von Geräten analysiert und in das System integriert werden (I2).

- **Laufende Anpassungen und Updates:** Das Bewertungssystem wurde als ein dynamisches Werkzeug betrachtet, das laufend aktualisiert und angepasst werden muss, um die Aussagekraft und Verlässlichkeit langfristig zu gewährleisten (I2).

Frage 8: Sehen Sie Potenzial in diesem Bewertungssystem, es so zu skalieren und auf weitere priorisierte Bauteile auszuweiten, um künftig eine ganzheitliche Bewertung des gesamten Smartphones zu ermöglichen?

- **Ganzheitlicher Reparierbarkeitsindex:** Die Vision eines umfassenden Reparierbarkeitsindex für Smartphones wurde von beiden Expert:innen als spannend und umsetzbar beschrieben. Eine solche Skala würde eine standardisierte Bewertung der Reparierbarkeit ermöglichen, wodurch sich jedes Smartphone transparent und nachvollziehbar vergleichen lassen würde (I1, I2).

Frage 9: Haben Sie abschließende Fragen, Anmerkungen oder Empfehlungen?

- **Interesse von Interessensvertretungen und NGOs:** Es wurde darauf hingewiesen, dass Interessensvertretungen wie die European Refurbishment Association (Eurefas) großes Interesse an den Ergebnissen des Bewertungssystems zeigen könnten. Diese Organisationen könnten das System nicht nur als Basis für politische Initiativen wie "Right to Repair" nutzen, sondern auch für die Weiterentwicklung eines einheitlichen Reparaturstandards in Europa (I1).

Diskussion

Die folgende Diskussion erweitert die Analyse der Expert:inneninterviews:

Verlässlichkeit und Aussagekraft des Bewertungssystems:

Die Expert:innen bewerten das Bewertungssystem insgesamt als durchdacht und konsistent (I1, I2). Es basiert auf klar definierten Indikatoren und ermöglicht eine systematische Erfassung der Demontierbarkeit, was zu einer objektiven und vergleichbaren Bewertung unterschiedlicher Smartphone-Modelle führt. Das entspricht auch den Anforderungen an ein standardisiertes Bewertungssystem (Bracquené et al., (2018); Mauro et al., (2019); Ritthoff et al., (2021)). Es sorgt für mehr Transparenz und erleichtert den Vergleich verschiedener Geräte. Dennoch weisen die Expert:innen auf einige Herausforderungen hin, die die Aussagekraft beeinflussen können. Eine zentrale Problematik stellt die Variabilität der Demontagezeit dar (I1, I2). Die Geschwindigkeit der Demontage hängt stark von den Fähigkeiten der ausführenden Person ab, was zu Schwankungen in den Ergebnissen führen kann.

Besonders im B2B-Bereich, wo geschultes Personal arbeitet, könnten diese Schwankungen weniger ins Gewicht fallen als im B2C-Bereich, wo Laien mit weniger Erfahrung mehr Zeit benötigen.

Ein weiterer Punkt ist die Notwendigkeit eines breiteren Datenpools (I2). Die Verlässlichkeit des Systems steigt mit der Anzahl der analysierten Geräte. Gegenwärtig basiert die Bewertung auf einer begrenzten Stichprobe von zehn Geräten. Eine kontinuierliche Erweiterung des Datensatzes durch zusätzliche Smartphones unterschiedlicher Baujahre und Hersteller könnte die Aussagekraft verbessern und eine höhere Repräsentativität gewährleisten.

Anwendbarkeit in der Praxis:

Im B2B-Bereich könnte das technische Bewertungsinstrument Reparaturdienstleister und Unternehmen unterstützen, die gebrauchte oder defekte Smartphones ankaufen und instand setzen. Insbesondere für Unternehmen, die in großem Maßstab mit der Wiederaufbereitung arbeiten, kann das System hilfreich sein, Reparaturkosten und Arbeitszeiten präzise zu kalkulieren (I1). Im B2C-Bereich fungiert das Bewertungssystem als visuelle Orientierungshilfe für KonsumentInnen. Die Einführung des Label-Systems nach dem Vorbild der EU-Energieeffizienzkennzeichnung (A–E) ermöglicht Verbraucher:innen eine schnelle Einschätzung der Akkudemontierbarkeitsfähigkeit. Dies ist insbesondere für nachhaltigkeitsbewusste Käufer:innen von Vorteil, die Geräte mit guter Demontierbarkeit bevorzugen.

Allerdings sehen die Expert:innen eine Einschränkung in der wirtschaftlichen Perspektive (I1, I2). Das Bewertungssystem berücksichtigt primär technische Aspekte der Demontierbarkeit, während wirtschaftliche Faktoren wie Ersatzteilkosten, Reparaturkosten und Restwert nicht einbezogen werden. Gerade im B2B-Bereich sind diese Parameter entscheidend für Investitionsentscheidungen. Eine Erweiterung des Modells um wirtschaftliche Indikatoren könnte die Praktikabilität für Unternehmen erheblich steigern (I1).

Optimierungspotenziale und Weiterentwicklung des Bewertungssystems:

Ein wesentliches Optimierungspotenzial liegt in der laufenden Anpassung und Aktualisierung des Modells (I2). Expert:in I2 weist darauf hin, dass sich Demontageprozesse durch neue Werkzeuge, Materialien und Befestigungsmethoden stetig verändern. Das bedeutet, dass das Bewertungssystem regelmäßig überprüft und angepasst werden muss, um seine Aussagekraft zu erhalten.

Darüber hinaus wurde die Erweiterbarkeit des Bewertungssystems auf weitere prioritäre Komponenten diskutiert. Die Idee eines ganzheitlichen Reparierbarkeitsindex für Smartphones wurde als zukunftsweisend bewertet (I1, I2). Das würde eine umfassendere Einschätzung der Reparaturfreundlichkeit ermöglichen

und Konsument:innen eine fundierte Entscheidungshilfe bieten, die über den Akku hinausgeht.

Fazit

Die Diskussion zeigt, dass das entwickelte Bewertungssystem eine verlässliche und praxisnahe Methodik zur Bewertung der Akkudemontierbarkeit bietet. Während die Expert:innen die technischen Indikatoren als solide einstufen, sehen sie Optimierungspotenziale in der Erweiterung des Datenpools, der Berücksichtigung wirtschaftlicher Faktoren und der kontinuierlichen Anpassung des Modells an neue Entwicklungen.

Langfristig könnte das System sowohl für Unternehmen als auch für Verbraucher:innen eine wertvolle Orientierungshilfe sein. Insbesondere in Verbindung mit den regulatorischen Anforderungen und den Nachhaltigkeitszielen bietet das Bewertungssystem eine vielversprechende Grundlage, um die Transparenz und Reparaturfähigkeit von Smartphones zu verbessern. Die Weiterentwicklung hin zu einem ganzheitlichen Reparierbarkeitsindex könnte die Akzeptanz und Anwendbarkeit des Modells weiter steigern und einen Beitrag zur Förderung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft leisten.

8 Diskussion und Ausblick

Dieses abschließende Kapitel bietet eine Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse dieser Diplomarbeit und adressiert die in Kapitel 1.2 gestellten Forschungsfragen. Darauf aufbauend werden die gewonnenen Erkenntnisse kritisch reflektiert und die methodischen sowie inhaltlichen Limitationen der Arbeit erläutert. Abschließend werden potenzielle Weiterentwicklungen für das entwickelte Bewertungsmodell aufgezeigt.

8.1 Diskussion der Ergebnisse

Mit einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 2,7 Jahren zählen Smartphones zu den kurzlebigsten EEE der Industrie (Tröger et al., 2017). Um diesem Trend entgegenzuwirken und die Nachhaltigkeit sowie die Kreislaufwirtschaft zu fördern, wurde die EU-Batterieverordnung eingeführt (Europäische Union, 2023). Aktuelle Smartphone-Designs zeichnen sich durch eine kompakte Bauweise aus, wobei Akkus zunehmend verschraubt, verklebt und schwer zugänglich sind. Hersteller setzen verstärkt auf Klebeverbindungen, um Geräte kompakt zu gestalten, was jedoch die Austauschbarkeit und Reparierbarkeit erheblich erschwert (Parchomenko et al., 2023). Mit dem Artikel 11 der EU-Batterieverordnung wird ein regulatorischer Rahmen geschaffen, der vorschreibt, dass Akkus „mit handelsüblichen Werkzeugen“ entnehmbar sein müssen, ohne den Einsatz von Spezialwerkzeugen, herstellerspezifischen Werkzeugen, Wärmeenergie oder Lösungsmitteln (Europäische Union, 2023). Diese Vorgabe markiert einen bedeutenden Schritt hin zu einer verbesserten Reparaturfreundlichkeit. In diesem Zusammenhang gewinnt die Bewertung der Akkudemontage zunehmend an Relevanz, um Verbraucher:innen transparente Informationen zur Reparierbarkeit eines Geräts bereitzustellen.

Die Zielsetzung dieser Arbeit war unter anderem die Beantwortung der Hauptforschungsfrage MQ:

- Wie kann die Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones bewertet werden, um die Kreislaufwirtschaft in der Elektronikindustrie zu fördern?

Um die Beantwortung dieser Hauptforschungsfrage zu unterstützen, wurden drei Subforschungsfragen SQ1-SQ3 formuliert:

- SQ1: Inwieweit beeinflusst die EU-Batterieverordnung die Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones?
- SQ2: Welche Kriterien sind für die Bewertung der Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones relevant?
- SQ3: Welche technischen Hürden bestehen derzeit bei der Demontage von Akkus aus Smartphones?

Im Zuge der Untersuchung der Subforschungsfrage SQ1 und des Forschungsziels O1 wurde die EU-Batterieverordnung umfassend analysiert. Der Fokus lag sowohl auf den allgemeinen Neuerungen als auch auf dem Artikel 11, der insbesondere für Akkudemontage von Relevanz ist.

Zur Beantwortung der Subforschungsfrage SQ2 wurde eine systematische Literaturrecherche gemäß der Methode von Kitchenham & Charters (2007) durchgeführt. Dabei wurden zunächst relevante Schlüsselbegriffe identifiziert und mithilfe Boolescher Operatoren zu einem Suchstring kombiniert. Zudem wurden Ein- und Ausschlusskriterien definiert (Kapitel 4.3). Anschließend erfolgte eine umfassende Datenbanksuche, um einen ersten Überblick über die relevante Literatur zu erhalten. Zur systematischen Filterung der identifizierten Quellen wurde das Trichterprinzip angewendet, wodurch die Anzahl relevanter Studien schrittweise reduziert wurde (Booth et al., 2016). Nach dem Screening kam der Forward Search Ansatz nach Webster & Watson (2002) zum Einsatz, um durch Zitieranalyse weitere relevante Quellen zu identifizieren. Insgesamt konnten 44 wissenschaftliche Quellen als relevant eingestuft werden.

In einem weiteren Schritt wurde die Literatur thematisch in vier Hauptgruppen kategorisiert (Kapitel 4.4):

- K1: Wesentliche Kriterien eines Bewertungssystems zur Reparierbarkeit
- K2: Bewertungsmodelle und Indikatoren für die Reparierbarkeit von Smartphones
- K3: Bewertungsmodelle und Indikatoren für die Reparierbarkeit von Elektro- und Elektronikgeräten (EEE)
- K4: Berechnung der Demontagezeit mit Fokus auf die eDiM-Methode

Auf Basis dieser Kategorisierung konnten die zentralen Indikatoren identifiziert werden. Da es sich um ein rein technisches Bewertungssystem handelt, wurden ausschließlich technische Parameter berücksichtigt. Schließlich wurden die relevantesten Indikatoren herausgearbeitet und in das entwickelte Bewertungsmodell integriert. Somit wurde die Subforschungsfrage SQ2 beantwortet und gleichzeitig wurden die Forschungsziele O2 und O3 erreicht.

Die Subforschungsfrage SQ3, sowie das Erreichen des Forschungsziels O4 wurde mit Hilfe eines Experiments beantwortet. Dazu wurde der Akkudemontageprozess bei 10 Smartphones detailliert dokumentiert und analysiert. Jedes der zehn untersuchten Smartphones wurde anhand des Akkudemontierbarkeitsindex bewertet und einer Kategorie von A bis E zugeordnet. Die Analyse des Demontageprozesses ermöglichte die Identifikation der zentralen Herausforderungen (Kapitel 6.3). Zur Evaluierung des Modells wurden zwei semistrukturierte Expert:inneninterviews durchgeführt und nach der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2000) ausgewertet (Kapitel 7.2).

Auf Basis dieser Ergebnisse konnte die Hauptforschungsfrage MQ unter Einbeziehung der Subforschungsfragen SQ1–SQ3 vollständig beantwortet werden. Die vorliegende Arbeit zeigt auf, wie die Demontierbarkeit von Akkus aus Smartphones systematisch bewertet werden kann, um die Kreislaufwirtschaft in der Elektronikindustrie gezielt zu fördern.

Im Rahmen der Diskussion der Ergebnisse wurde insbesondere die Bedeutung offizieller Reparaturanleitungen kritisch betrachtet. Während Hersteller wie Apple oder Samsung erst seit 2020 offizielle Reparaturinformationen bereitstellen, beschränken sich diese meist auf Flaggschiff-Modelle. Ältere oder günstigere Geräte werden oft nicht durch offizielle Anleitungen abgedeckt, obwohl einige von ihnen eine hohe Reparaturfreundlichkeit aufweisen. Ein Beispiel hierfür ist das im Experiment demontrierte Samsung Galaxy Alpha (2016), das trotz fehlender offizieller Reparaturanleitungen eine äußerst einfache und schnelle Akkudemontage ermöglicht, denn der Akku kann innerhalb weniger Sekunden ohne Werkzeuge entfernt werden. Dennoch erhielt dieses Gerät im entwickelten Bewertungsmodell aufgrund der fehlenden Reparaturanleitung nur die Bewertung "B", obwohl es in allen anderen Kategorien die Bestnote erreichte. Dies verdeutlicht einerseits, dass Reparaturanleitungen ein essenzieller Bestandteil der Bewertung sind. Andererseits zeigt das Beispiel, dass ein Gerät nicht zwangsläufig über eine offizielle Reparaturanleitung verfügen muss, um eine hohe Reparierbarkeit aufzuweisen. Die Gewichtung dieses Faktors sollte daher in zukünftigen Forschungsarbeiten weiter untersucht und gegebenenfalls differenzierter betrachtet werden, denn insbesondere im Zusammenhang mit dem „Recht auf Reparatur“, das vorschreibt, dass Hersteller Reparaturinformationen verpflichtend zur Verfügung stellen müssen.

Die Demontagezeit wurde für die Bewertung der Akkudemontierbarkeit intensiv diskutiert, da sie direkt die Benutzerfreundlichkeit und Reparierbarkeit eines Smartphones beeinflusst. Im Rahmen der Expert:innen-Interviews wurde die Frage erörtert, ob die Demontagezeit als eigenständiger Indikator betrachtet werden sollte, oder ob sie bereits in der Demontagetiefe enthalten ist. Ein Gegenargument zur eigenständigen Betrachtung war, dass eine hohe Anzahl an Demontageschritten tendenziell eine längere Demontagezeit implizieren könnte. Jedoch zeigte sich in der praktischen Anwendung des Experiments, dass Demontagezeit und Demontagetiefe zwei unabhängige Variablen sind, die unterschiedliche Aspekte der Reparierbarkeit erfassen. Ein Beispiel verdeutlicht dies: In der eDiM-Methode wird für das Erhitzen eines 5cm langen Klebestreifens eine Zeit von 30 Sekunden angesetzt. Ist jedoch eine komplette Gehäuserückseite verklebt, verlängert sich die tatsächliche Demontagezeit erheblich, obwohl dies nur als ein einziger Demontageschritt gezählt wird.

Dieses Beispiel zeigt, dass die Demontagetiefe allein keine verlässliche Aussage über den tatsächlichen Zeitaufwand zulässt. Während wenige Schritte lange Zeit

beanspruchen können, können umgekehrt viele kleine Schritte in kurzer Zeit durchführbar sein. Deshalb ist die separate Erfassung der Demontagezeit wichtig, um Verbraucher:innen eine realistische Einschätzung zu ermöglichen.

Darüber hinaus wurden weitere Indikatoren diskutiert, wie die Arbeitsumgebung oder das Qualifikationsniveau der ausführenden Person. Diese externen Einflussgrößen wurden jedoch bewusst aus der Bewertung ausgeschlossen. Das entwickelte Bewertungsmodell fokussiert sich primär auf die Perspektive von Verbraucher:innen, die sich darauf verlassen müssen, dass eine Akkudemontage ohne spezialisiertes Fachwissen und unter realistischen Alltagsbedingungen mit handelsüblichen Werkzeugen möglich ist. Dieser praxisorientierte Ansatz ist besonders im Kontext der EU-Batterieverordnung (2023/1542) von hoher Relevanz, da diese vorschreibt, dass Akkus leicht und ohne den Einsatz von Spezialwerkzeugen, herstellerspezifischen Hilfsmitteln oder zusätzlicher Wärmeenergie entnehmbar sein müssen.

Zur Sicherstellung der Objektivität und Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde zudem die eDiM-Methode angewendet, welche die Demontageschritte systematisch erfasst. Dadurch konnte eine standardisierte und reproduzierbare Messung der Demontagezeit erreicht werden. Zudem wurde die Relevanz der gewählten Indikatoren durch die Expert:innenvalidierung zusätzlich bestätigt. Die Expert:innen bewerten die Auswahl als zweckmäßig und nachvollziehbar.

8.2 Limitationen und Ausblick

Diese Diplomarbeit liefert wertvolle Erkenntnisse zur Bewertung der Akkudemontierbarkeit von Smartphones, weist jedoch Limitationen auf. Die Untersuchung basiert auf einer begrenzten Stichprobe von zehn Smartphones, weshalb die Generalisierbarkeit der Ergebnisse eingeschränkt ist. Zudem wurden ausschließliche technische Indikatoren betrachtet, während ökonomische Faktoren nicht berücksichtigt worden sind. Eine erweiterte Datenbasis sowie die Einbeziehung zusätzlicher Indikatoren könnten die Aussagekraft der Ergebnisse weiter steigern.

Das entwickelte Bewertungssystem für die Akkudemontierbarkeit bietet eine strukturierte Grundlage zur Beurteilung der Reparier- und Recyclingfähigkeit und trägt zur Förderung der Kreislaufwirtschaft bei. Die Möglichkeit, die Reparatur- und Recyclingfähigkeit von Akkus objektiv zu bewerten, gewinnt zunehmend an Relevanz, nämlich nicht nur für Hersteller und Regulierungsbehörden, sondern auch speziell für Verbraucher:innen. Eine solche Bewertung kann potenziell eine Kaufentscheidung unterstützen, indem sie eine Orientierung hinsichtlich der Reparierbarkeit bietet.

Die Notwendigkeit solcher Bewertungsmethoden wird durch die gesetzlichen Vorgaben weiter untermauert. Insbesondere die EU-Batterieverordnung fordert eine höhere Reparier- und Recyclingfreundlichkeit von Batterien, um die Nachhaltigkeit in

der Produktgestaltung zu fördern. Da Akkus bislang häufig schwer zugänglich sind, ist ihre Wiederverwertung oft mit erheblichen Herausforderungen verbunden. Zudem ist eine effiziente Kreislaufwirtschaft entscheidend, um die Sammel- und Recyclingquoten zu steigern. Trotz bestehender Maßnahmen besteht in vielen Ländern – darunter auch Österreich – weiterhin Handlungsbedarf, um die zukünftigen EU-Zielvorgaben zu erfüllen (Kapitel 3.3).

Zukünftige Forschungsarbeiten können darauf aufbauen, das Bewertungssystem durch zusätzliche Indikatoren zu erweitern und größere Datenmengen in die Analyse einzubeziehen.

Insgesamt zeigt diese Arbeit, dass eine systematische Bewertung der Akkudemontierbarkeit ein wichtiger Baustein für die Förderung der Kreislaufwirtschaft ist. Die Kombination aus rechtlichen Vorgaben, technischer Innovation und steigender Verbrauchertransparenz kann langfristig dazu beitragen, die Nachhaltigkeit in der Elektronikindustrie zu verbessern und die Umweltauswirkungen von Elektroschrott zu minimieren.

9 Literaturverzeichnis

Andrae, A., Samuli Vaija, M. & Halgand, S. (2020). Method for determining the Circularity Score of ICT goods. In International Journal Of Advanced Research in Engineering & Management (IJAREM).

https://www.researchgate.net/publication/338901542_Method_for_determining_the_Circularity_Score_of_ICT_goods

Baldé, C. P., Wagner, M., Iattoni, G., Kuehr, R., United Nations University (UNU), & United Nations Institute for Training and Research (UNITAR). (2020). In-depth review of the WEEE collection rates and targets in the EU-28, Norway, Switzerland, and Iceland. United Nations University (UNU) / United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) - co-hosting the SCYCLE Programme, Bonn, Germany.

https://www.scycle.info/wp-content/uploads/2020/11/In-depth-review_WEEE-Collection-Targets-and-Rates_UNITAR_2020_Final.pdf

Booth, A., Sutton, A. & Papaioannou, D. (2016). Systematic Approaches to a Successful Literature Review. SAGE Publications Limited.

Bovea, M. D., & Pérez-Belis, V. (2018). Identifying design guidelines to meet the circular economy principles: A case study on electric and electronic equipment. Journal of Environmental Management, 228, 483–494.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.014>

Bracquené, E., Brusselaers, J., Dams, Y., Peeters, J., De Schepper, K., Duflou, J., & Dewulf, W. (2018). Repairability criteria for energy related products: Study in the BeNeLux context to evaluate the options to extend the product lifetime. In Final Report [Report]. https://www.benelux.int/files/7915/2896/0920/FINAL_Report_Benelux.pdf

Bracquené, E., Peeters, J., Alfieri, F., Sanfélix, J., Duflou, J., Dewulf, W., & Cordella, M. (2020). Analysis of evaluation systems for product repairability: A case study for washing machines. Journal of Cleaner Production, 281, 125122.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125122>

Braun, M. R., Gries, C. I., & Wernick, C. (2022). Politische und regulatorische Ansätze zur Verlängerung der Nutzungsdauer von Smartphones (No. 486). WIK Diskussionsbeitrag.

Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. (2005). Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Abfallvermeidung, Sammlung und Behandlung von elektrischen und elektronischen Altgeräten (Elektroaltgeräteverordnung – EAG-VO), BGBl. II Nr. 121/2005. <https://www.ris.bka.gv.at>

Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. (2002). Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich. (2002). Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG 2002) und Änderung des Kraftfahrzeuggesetzes 1967 und des Immissionsschutzgesetzes – Luft, BGBl. I Nr. 102/2002. <https://www.ris.bka.gv.at>

Chu, X., Li, L., Zhao, F., Sutherland, J. W. & Yin, F. (2024). Disassembly time estimation for used smartphones based on Maynard operation sequence technology. *Computers & Industrial Engineering*, 193, 110291. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110291>

Cordella, M., Alfieri, F., Clemm, C., & Berwald, A. (2020). Durability of smartphones: A technical analysis of reliability and repairability aspects. *Journal of Cleaner Production*, 286, 125388. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125388>

Cordella, M., Sanfelix, J. & Alfieri, F. (2018). Development of an Approach for Assessing the Repairability and Upgradability of Energy-related Products. *Procedia CIRP*, 69, 888–892. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.080>

Dangal, S., Faludi, J. & Balkenende, R. (2022). Design Aspects in Repairability Scoring Systems: Comparing Their Objectivity and Completeness. *Sustainability*, 14(14), 8634. <https://doi.org/10.3390/su14148634>

Dangal, S., Van den Berge, R., Arcos, B. P., Faludi, J. & Ruud, B. (2021). Perceived Capabilities and Barriers for Do-It-Yourself Repair. <https://doi.org/10.31880/10344/10261>

De Fazio, F., Bakker, C., Flipsen, B., & Balkenende, R. (2021). The Disassembly Map: A new method to enhance design for product repairability. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128552. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128552#>

Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH. (o. D.). Was unsere getrennte Sammlung von Elektroaltgeräten alles bewirkt: Infos zur Sammlung und zur Kreislaufwirtschaft. In Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH.

EU Ecolabel - Home. (2024, October 10). Environment. https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/eu-ecolabel_en

Europäische Kommission. (2023a). VERORDNUNG (EU) 2023/1670 DER KOMMISSION zur Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an Smartphones, Mobiltelefone, die keine Smartphones sind, schnurlose Telefone und Slate-Tablets gemäß der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Änderung der Verordnung (EU) 2023/826 der Kommission. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1670/oj?locale=de>

Europäische Kommission. (2023b). DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) 2023/1669 DER KOMMISSION zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2017/1369 des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Energieverbrauchskennzeichnung von Smartphones und Slate-Tablets. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1669>

Europäische Kommission. (2023c). RICHTLINIE DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über gemeinsame Vorschriften zur Förderung der Reparatur von Waren und zur Änderung der Verordnung (EU) 2017/2394 und der Richtlinien (EU) 2019/771 und (EU) 2020/1828. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:cdbeaa83-c94e-11ed-a05c-01aa75ed71a1.0023.02/DOC_1&format=PDF

Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union. (2023). Verordnung (EU) 2023/1542 vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG. Amtsblatt der Europäischen Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542>

Favi, C., Germani, M., Mandolini, M., & Marconi, M. (2016). Includes knowledge of dismantling centers in the early design phase: a knowledge-based design for disassembly approach. *Procedia CIRP*, 48, 401–406. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.242>

Favi, C., Marconi, M., Germani, M., & Mandolini, M. (2018). A design for disassembly tool oriented to mechatronic product de-manufacturing and recycling. *Advanced Engineering Informatics*, 39, 62–79. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.11.008>

Flipsen, B., Bakker, C. & Van Bohemen, G. (2016). Developing a reparability indicator for electronic products. *Electronics Goes Green* 2016+. <https://doi.org/10.1109/egg.2016.7829855>

Flipsen, B., Huisken, M., Opsomer, T. & Depypere, M. (2019). Smartphone Reparability Scoring: Assessing the Self-Repair Potential of Mobile ICT Devices. PLATE. <https://research.tudelft.nl/en/publications/smartphone-reparability-scoring-assessing-the-self-repair-potenti>

Franceschini, F., Galetto, M. & Maisano, D. (2007). Management by Measurement. In Springer eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73212-9>

Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, 28(1), 75–105. <https://doi.org/10.2307/25148625>

Hoepke, S. (2023, 3. Januar). Ausrangierte Handys und Akkus: Feuerquelle in der Schublade. *Kurier*. <https://kurier.at/wirtschaft/ausrangierte-handys-und-akkus-feuerquelle-in-der-schublade/402279440>

Huysman, S., Sala, S., Mancini, L., Ardente, F., Alvarenga, R. A., De Meester, S., Mathieux, F., & Dewulf, J. (2014). Toward a systematized framework for resource efficiency indicators. *Resources Conservation and Recycling*, 95, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.10.014>

International Electrotechnical Commission. (2012). IEC TR 62635:2012 [Guidelines for end-of-life information provided by manufacturers and recyclers and for recyclability rate calculation of electrical and electronic equipment].

IVy. (2023). EU legt neue Regeln für Smartphone-Reparaturen fest – Das neue Batteriegesetz (BattG). <https://www.batteriegesetz.de/eu-legt-neue-regeln-fuer-smartphone-reparaturen-fest/>

Jef, P., Paolo, T., Fulvio, A., Paul, V., Damian, C. & Joost, D. (2018). eDIM: further development of the method to assess the ease of disassembly and reassembly of products: Application to notebook computers. JRC TEchnical Reports. <https://doi.org/10.2760/864982>

Kaupe, V., Feldmann, C., & Lucas, M. (2021). Forschungsmethodik. In Springer eBooks (pp. 13–14). https://doi.org/10.1007/978-3-658-32346-2_3

Kirchherr, J., Reike, D. & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions. Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3037579>

Kitchenham BA & S. Charters. (2007). Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in

Kurth, P., Oexle, A. & Faulstich, M. (2017). Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Springer-Verlag.

L'indicateur de réparabilité - ADEME. (2023). ADEME - Particulier. <https://epargnonsnosressources.gouv.fr/indice-de-reparabilite/>

Lang, K.-D. & Klemm, C. (2019). Stärkere Verankerung der Ressourceneffizienz und Abfallvermeidung in produktpolitischen Instrumenten: Abschlussbericht. In Umweltbundesamt. Umweltbundesamt.

Leistungsfähigkeit, industrie-und FTI-politische Förderung. WIFO Studies.

Los móviles acumulan el 51 % de las quejas de obsolescencia prematura. (2018). [www.ocu.org](https://www.ocu.org/consumo-familia/derechos-consumidor/noticias/obsolescencia-prematura).
<https://www.ocu.org/consumo-familia/derechos-consumidor/noticias/obsolescencia-prematura>

Lu, Y., Pei, W., & Peng, K. (2023). State of the art of automatic disassembly of WEEE and perspective towards intelligent recycling in the era of Industry 4.0. *the International Journal of Advanced Manufacturing Technology/International Journal, Advanced Manufacturing Technology*, 128(7–8), 2825–2843.
<https://doi.org/10.1007/s00170-023-12043-3>

Mandolini, M., Favi, C., Germani, M., & Marconi, M. (2017). Time-based disassembly method: how to assess the best disassembly sequence and time of target components in complex products. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1–4), 409–430. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1201-5>

Martens, H. & Goldmann, D. (2016). Recyclingtechnik. In Springer eBooks.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-02786-5>

Mauro, C., Felice, A. & Vicente, S. F. J. (2019). Analysis and development of a scoring system for repair and upgrade of products. JRC Technical Reports.
<https://doi.org/10.2760/725068>

Mauro, C., Felice, A. & Vicente, S. F. J. (2020). Guidance for the Assessment of Material Efficiency: Application to Smartphones. Joint Research Centre.
<https://doi.org/10.2760/037522>

Mayring, P. (2000). Qualitative Inhaltsanalyse.

Ministère de la Transition écologique & CGDD/SEVS/SDE. (2022). Instructions manual for the display and the calculation of the reparability index of electrical and electronic equipments.
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/220523_instructions%20manual%20-%20reparability%20index%20-%20final%20V3.0.pdf

Moraga, G., Huysveld, S., Mathieux, F., Blengini, G. A., Alaerts, L., Van Acker, K., De Meester, S., & Dewulf, J. (2019). Circular economy indicators: What do they measure? *Resources Conservation and Recycling*, 146, 452–461.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045>

Neubauer, C. N., Bernhardt, A. B., Brandstätter, C. B. & Broneder, C. B. (2023). Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich: Statusbericht 2023 für das Referenzjahr 2021. In Bundesministerin für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.

New proposals to make sustainable products the norm. (2022, March 30). European Commission - European Commission. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_2013

Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft: Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie. (2022). Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.

Parchomenko, A., De Smet, S., Pals, E., Vanderreydt, I., & Van Opstal, W. (2023). The circular economy potential of reversible bonding in smartphones. *Sustainable Production and Consumption*, 41, 362-378.

Pawlik, V. P. (2024, 22. Februar). Statistiken zu Elektro- und Elektronikaltgeräten. Statista. <https://de.statista.com/themen/8463/elektroschrott/#topicOverview>

Peppers, 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.

Pena, P. V., Peeters, J., Cattrysse, D., Duflou, J., Tecchio, P., Mathieux, F. & Ardente, F. (2016). Study for a method to assess the ease of disassembly of electrical and electronic equipment. Method development and application to a flat panel display case study. JRC Technical Reports. <https://doi.org/10.2788/489828>

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>

Reinstaller, A., Meyer, I., & Peneder, M. (2022). Transformation zur Kreislaufwirtschaft.

Ritthoff, M., Müller, A., Hopfensack, L., Brüning, R., Wolf, J. & Piehl, F. (2021). Methoden und Normen zur Bewertung der Reparierbarkeit von Elektro- und Elektronikgeräten: Stärkung der Materialeffizienz unter der Ökodesign-Richtlinie. In Umweltbundesamt.

Rodríguez, N. B., & Favi, C. (2022). Eco-design guidelines takeaways from the analysis of product repairability and ease of disassembly: a case study for electric ovens. *Procedia CIRP*, 105, 595–600. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.099>

Rodríguez, N. B., & Favi, C. (2023). Disassembly and Repairability of Mechatronic Products: Insight for Engineering Design. *Journal of Mechanical Design*, 146(2). <https://doi.org/10.1115/1.4064075>

Rodríguez, N. B., Chiastra, L., Peeters, J. R., & Favi, C. (2024). Analysis of repairability index to improve disassemblability and serviceability in cooker hoods. *Procedia CIRP*, 122, 801–806. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.112>

Rodríguez, N. B., Gabriel, C., Gaha, R. & Favi, C. (2023). Analysis of disassembly parameters in repairability scores: limitations for engineering design and suggestions for improvement. *Procedia CIRP*, 116, 738–743. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.124>

Roithner, C., Cencic, O., & Rechberger, H. (2021). Ein neuer Weg zur Bewertung der Recyclingfähigkeit von Produkten mittels Statistischer Entropie: Fallbeispiel Mobiltelefone. *Österreichische Wasser- Und Abfallwirtschaft*, 73(9-10), 377-384. <https://doi.org/10.1007/s00506-021-00783-z>

Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH. (o. D.). Smartphones nachhaltiger nutzen – aber wie? RTR. Abgerufen am 8. Januar 2025, von https://www.rtr.at/TKP/was_wir_tun/telekommunikation/weitere-regulierungsthemen/nachhaltigkeit/Auswirkungen/Auswirkungen.de.html

Schischke, K., Berwald, A., Dimitrova, G., Rückschloss, J., Nissen, N. F., & Schneider-Ramelow, M. (2022). Durability, reparability and recyclability: Applying material efficiency standards EN 4555x to mobile phones and tablet computers. *Procedia CIRP*, 105, 619–624. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.103>

Smartphones and tablets. (2023). Energy Efficient Products. https://energy-efficient-products.ec.europa.eu/product-list/smartphones-and-tablets_en

Software Engineering (Bd. 2). https://www.researchgate.net/profile/barbara-kitchenham/publication/302924724_guidelines_for_performing_systematic_literature_reviews_in_software_engineering

Sonego, M., Echeveste, M. E. S., & Debarba, H. G. (2022). Repair of electronic products: Consumer practices and institutional initiatives. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 556–565. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.031>

Suovanen, J. (2024, April 20). So berechnet iFixit Reparierbarkeit | iFixit Neuigkeiten. iFixit. https://de.ifixit.com/News/85542/wie-die-ifixit-reparierbarkeits-bewertungen-zustande-kommen?_gl=1%2AtpwIzb%2A_ga%2AJDUkb2hKb2hUYWU5b29CYWhzdSRUTFRCcVBhUDNwMEdFN1hPTi9JQ3V2YlIPa1FMMGh0WWp5NFprWHF0NXZB%2A_ga5ZXNWJ73GK%2AMTcxMzYxODM5Mi4xLjEuMTcxMzYyMDQ0Mi4wLjAuMA..&pk_v_id=dead2dbaec85487a171362045667aea5

Suovanen, J. (2024, October 5). So berechnet iFixit Reparierbarkeit. *iFixit*. <https://de.ifixit.com/News/85542/wie-die-ifixit-reparierbarkeits-bewertungen-zustande-kommen>

Team, C. (2023, November 20). Ökodesign für Mobiltelefone, Smartphones und Tablets. CE Engineering. <https://ce-engineering.de/oekodesign-fuer-mobiltelefone-smartphones-und-tablets/>

Tout savoir sur l'indice de réparabilité. (2024). Ministère De L'Économie, Des Finances Et De L'Industrie Et Ministère Chargé Du Budget Et Des Comptes Publics. <https://www.economie.gouv.fr/particuliers/tout-savoir-indice-reparabilite>

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>

Tröger, N., Wieser, H. & Hübner, R. (2017). Smartphones werden häufiger ersetzt als T-Shirts: die Nutzungsmuster und Ersatzgründe von KonsumentInnen bei Gebrauchsgütern. *SSOAR*, 6, 79–102. https://doi.org/10.15501/978-3-86336-914-9_5

Ueda, T., Fukusawa, H., Nakagawa, Y., Nagano, K., Sunahara, N., Yamada, H., Fujisawa, J., Yamada, M., Koyanaka, S., & Oki, T. (2024). Automatic high-speed smartphone disassembly system. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139928. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139928>

Vanegas, P., Peeters, J. R., Cattrysse, D., Tecchio, P., Ardente, F., Mathieux, F., Dewulf, W., & Duflou, J. R. (2017). Ease of disassembly of products to support circular economy strategies. *Resources Conservation and Recycling*, 135, 323–334. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.022>

Vicente, S. F. J., Mauro, C. & Felice, A. (2019). Methods for the Assessment of the Reparability and Upgradability of Energy-related Products: Application to TVs. *JRC Technical Report*. <https://doi.org/10.2760/501525>

Von alten Akkus in neue Batterien. (2023, December 12). Rund Geht's! <https://rundgehts.at/casestudies/von-alten-akkus-in-neue-batterien>

Was hat es mit den IP67- und IP68-Zertifizierungen auf sich? | Samsung Schweiz. (2021, May 11). Samsung Ch. <https://www.samsung.com/ch/support/mobile-devices/was-hat-es-mit-den-ip67-und-ip68-zertifizierungen-auf-sich/>

Webster, J., & Watson, R. T. (2002). Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. *MIS Quarterly*, 26(2), xiii–xxiii. <http://www.jstor.org/stable/4132319>

Wegener, K., Chen, W. H., Dietrich, F., Dröder, K., & Kara, S. (2015). Robot assisted disassembly for the recycling of electric vehicle batteries. *Procedia CIRP*, 29, 716–721. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.051>

Wir sind Fairphone. Zurück in die Zukunft. (2024). Fairphone.
<https://shop.fairphone.com/de/about-us>

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	DSRM-Prozessmodell (Peppers et al., 2007).....	3
Abbildung 2:	Kreislaufwirtschaftsstrategie Österreich (Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft, 2022).....	6
Abbildung 3:	Materialbestandteile von EEE gesamt (Martens & Goldmann, 2016).....	8
Abbildung 4:	Entwicklung der Sammelmassen in Ö in t (Neubauer et al., 2023) ...	9
Abbildung 5:	Unterschied zwischen Nutzungs- und Lebensdauer (Tröger et al., 2017).....	11
Abbildung 6:	Angaben über die Nutzungsdauer von Gebrauchsgütern (in Jahre) (Tröger et al., 2017)	13
Abbildung 7:	Zusammenfassung der SLR	33
Abbildung 8:	Verwendete methodische Ansätze der in der Literatur (eigene Darstellung)	37
Abbildung 9:	Häufigkeit des Auftretens der Bewertungsansätze	38
Abbildung 10:	EU Energielabel (Smartphones and Tablets, 2023)	40
Abbildung 11:	Französischer Reparaturindex (Tout savoir sur l'indice de réparabilité, 2024).....	42
Abbildung 12:	Reparierbarkeitsindex (iFixit, 2024)	43
Abbildung 13:	Identifizierte Indikatoren aus der Literatur (eigene Darstellung)	49
Abbildung 14:	Häufigkeit des Auftretens der Indikatoren.....	50
Abbildung 15:	Identifizierte Indikatoren für Smartphones	52
Abbildung 16:	Linearer Demontagebaum (iFixit, 2024)	54
Abbildung 17:	Flacher Demontagebaum (iFixit, 2024)	54
Abbildung 18:	Entwicklung der Verbindungstechniken (Cordella et al., 2020)	66

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Entwicklung der Inverkehrsetzung und Sammlung von Gerätebatterien in Österreich von 2011 bis 2021 (Neubauer et al., 2023).....	17
Tabelle 2:	Anzahl der Arbeitsschritte.....	55
Tabelle 3:	Art der Verbindung	56
Tabelle 4:	Art des Werkzeugs	57
Tabelle 5:	Demontagezeit t in Minuten	58
Tabelle 6:	eDiM	58
Tabelle 7:	Reparaturinformationen	59
Tabelle 8:	Verteilung der Bewertungen (eigene Darstellung).....	65

12 Abkürzungsverzeichnis

AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Consumer
DRZ	Demontage- und Recyclingzentrum
DSR	Design Science Research
eDiM	Ease of Disassembly Metric
EEE	Elektro- und Elektronikgeräte
EU	Europäische Union
EV	Elektrofahrzeuge
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IVS	Inverkehrsetzung
LiOH	Lithiumlauge
LTM	leichte Transportmittel
MOST	Maynard Operation Sequence Technique
MQ	Mainresearch Question
O	Objectives
SLR	Systematische Literaturrecherche
SQ	Subresearch Question
TMU	Time Measurement Units
VO	Verordnung
WEEE	Elektro- und Elektronikaltgeräte

13 Anhang

Bewertung und eDiM

Samsung Galaxy Alpha

Hersteller	Modell	Baujahr	
Samsung	Galaxy Alpha	2016	
Geräteindikatoren	Gewichtung		
Demontagetiefe	25%		
Verbindungsart	20%		
Werkzeugart	20%		
Demontagezeit	15%		
eDiM	5%		
Reparaturinformation	15%		
Indikatoren	Auswahl	Punkte	Gewichtete Punkte
Demontagetiefe	x≤2	10	2,5
Verbindungsart	Wiederverwendbar	10	2
Werkzeugart	Kein Werkzeug notwendig	10	2
Demontagezeit	t≤2	10	1,5
eDiM	unterhalb der Referenzzeit	10	0,5
Reparaturinformationen	nicht frei zugänglich	0	0
Gesamtpunktzahl	8,5		
Akku-Demontierbarkeitsindex	B		
	A		
	B		
	C		
	D		
	E		

Komponentencode	Demontagefolge der Komponenten	Demontagefolge der Befestigungselemente	Verbindungsart	Anzahl der Befestigungen	Anzahl der Manipulationen	Identifizierbarkeit (0,1)	Art des Werkzeugs	Werkzeugwechsel (s)	Werkzeugpositionierung(s)	Demontage MOST-Sequenz	Demontage TMU	Demontage (s)	eDiM (s)
1	Rückseite	Snapfit	Snapfit an den Rändern lösen	16	0	0	Hand	0	2,52	A1B0G1 + 16 * L1	180,00	6,48	7,92
2	Akku	Loose Fit	Entfernen aus Halterung	1	0	0	Hand	0	2,52	A1B0G1 + A1B0P3	60	2,16	4,68
													12,6

Fairphone 3

Hersteller	Modell	Baujahr	
Fairphone	3	2019	
Geräteindikatoren	Gewichtung		
Demontagetiefe	25%		
Verbindungsart	20%		
Werkzeugart	20%		
Demontagezeit	15%		
eDiM	5%		
Reparaturinformation	15%		
Indikatoren	Auswahl	Punkte	Gewichtete Punkte
Demontagetiefe	x≤2	10	2,5
Verbindungsart	Wiederverwendbar	10	2
Werkzeugart	Kein Werkzeug notwendig	10	2
Demontagezeit	t≤2	10	1,5
eDiM	unterhalb der Referenzzeit	10	0,5
Reparaturinformationen	vollständig verfügbar	10	1,5
Gesamtpunkteanzahl	10		
Akku-Demontierbarkeitsindex	A		
	A		
	B		
	C		
	D		
	E		

Komponentencode	Demontagefolge der Komponenten	Demontagefolge der Befestigungselemente	Verbindungsart	Anzahl der Befestigungen	Anzahl der Manipulationen	Identifizierbarkeit (0,1)	Art des Werkzeugs	Werkzeugwechsel (s)	Werkzeugpositionierung(s)	Demontage MOST-Sequenz	Demontage TMU	Demontage (s)	eDiM (s)
1	Rückseite	Snapfit	Snapfit an den Rändern lösen	22	0	0	Hand	0	2,52	A1B0G1 + 22 * L1	220,00	7,92	9,36
2	Akku	Loose Fit	Entfernen aus Halterung	1	0	0	Hand	0	2,52	A1B0G1 + A1B0P3	60	2,16	4,68
													14,04

OnePlus 6

Hersteller	Modell	Baujahr	
Oneplus	6	2018	
Geräteindikatoren	Gewichtung		
Demontagetiefe	25%		
Verbidnungsart	20%		
Werkzeugart	20%		
Demontagezeit	15%		
eDiM	5%		
Reparaturinformation	15%		
Indikatoren	Auswahl	Punkte	Gewichtete Punkte
Demontagetiefe	10<x≤20	5	1,25
Verbindungsart	Nicht wiederverwendbar/entfernbar	0	0
Werkzeugart	Einfache Werkzeuge	8	1,6
Demontagezeit	15<t≤30	5	0,75
eDiM	über der Referenzzeit	0	0
Reparaturinformationen	nicht frei zugänglich	0	0
Gesamtpunkteanzahl	3,6		
Akku-Demontierbarkeitsindex	D		
	A		
	B		
	C		
	D		
	E		

Komponentencode	Demontagefolge der Komponenten	Demontagefolge der Befestigungselemente	Verbindungsart	Anzahl der Befestigungen	Anzahl der Manipulationen	Identifizierbarkeit (0,1)	Art des Werkzeugs	Werkzeugwechsel (s)	Werkzeugpositionierung(s)	Demontage MOST-Sequenz	Demontage TMU	Demontage (s)	eDiM (s)
1	Rückseite	Kleber	Rückseite ist an der Innenseite an Rändern geklebt	1	0	1	Fön	1,44	2,52	heat up = 277 s + A1B0P1	7694	277	280,96
	Rückseite		Saugnapf wird auf Rückseite angebracht	1	0	0	Saugnapf	1,44	2,52	A1B0G1 + A1B0P3	60	2,16	6,12
	Rückseite	Kleber	Ziehen am Saugnapf, in Spalt zw. Rückseite und Rahmen wird Plektrum gesteckt	1	0	0	Plektrum	1,44	2,52	A1B0G3 + L6 + M16 + A1B0P6	330	11,88	15,84
	Rückseite	Kleber	Plektrum entlang Rahmen/Rückseite führen, um den Kleber zu lösen	1	0	0	Plektrum	0	2,52	9×(L6 + M16 + A1B0P6)	2610	93,96	96,48
2	Chassis	Connector	Connector-Fingerprint zw. Display und Chassis trennen, Display weglegen	1	0	0	Pinzette	1,44	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3 + A1B0P3	150	5,4	9,36
	Chassis	Schrauben	#00 Schrauben	6	0	0	Kreuzschraubenzieher 00	1,44	15,12	5* L1 + A1B0G1 + A1B0P1	540	19,44	36
	Chassis	Loose Fit	Plastikabdeckung des Motherboards entfernen	1	0	0	Pinzette	1,44	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3 + A1B0P1	130	4,68	8,64
3	Akku	Connector	Akkuconnector lösen	1	0	0	Pinzette	0	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3	110	3,96	6,48
	Akku	Kleber	An Lasche ziehen und Akku entfernen	1	0	0	Hand	0	2,52	A1B0G3 + L6 + M16 + A1B0P3	300	10,8	13,32
													473,2

iPhone 5

Hersteller	Modell	Baujahr	
Apple	iPhone 5	2012	
Geräteindikatoren	Gewichtung		
Demontagetiefe	25%		
Verbindungsart	20%		
Werkzeugart	20%		
Demontagezeit	15%		
eDiM	5%		
Reparaturinformation	15%		
Indikatoren	Auswahl	Punkte	Gewichtete Punkte
Demontagetiefe	10<x≤20	5	1,25
Verbindungsart	Wiederverwendbar	10	2
Werkzeugart	Einfache Werkzeuge	8	1,6
Demontagezeit	2<t≤15	8	1,2
eDiM	über der Referenzzeit	0	0
Reparaturinformationen	nicht frei zugänglich	0	0
Gesamtpunkteanzahl	6,05		
Akku-Demontierbarkeitsindex	C		
	A		
	B		
	C		
	D		
	E		

Komponentencode	Demontagefolge der Komponenten	Demontagefolge der Befestigungselemente	Verbindungsart	Anzahl der Befestigungen	Anzahl der Manipulationen	Identifizierbarkeit (0,1)	Art des Werkzeugs	Werkzeugwechsel (s)	Werkzeugpositionierung (s)	Demontage IM/OST-Sequenz	Demontage TMU	Demontage (s)	eDiM (s)
1	Gehäuse	Schraube	3,6mm Pentalobeschraube	2	0	0	Pentalobeschraubenzieher	1,44	5,04	5*[L1] + [A1B0G1] + [A1B0P1]	180,00	6,48	12,96
2	Display		Saugnapf wird auf Display angebracht	1	0	0	Saugnapf	1,44	2,52	[A1B0G1] + [A1B0P3]	60	2,16	6,12
	Display	Klammern	Ziehen am Saugnapf, in Spalt zw. Display und Rahmen wird Plektrum gesteckt	1	0	0	Plektrum	1,44	2,52	[A1B0G3] + [L6] + [M16] + [A1B0P6]	330	11,88	15,84
	Display	Klemme	Plektrum entlang des Displayrands führen, lösen der Klemmen	8	0	0	Plektrum	0	2,52	8×([L6]+[M8]+[A1B0P6])	1680	60,48	63,00
	Display	90° anheben	Display anheben und aufstellen	1	0	0	Hand	0	2,52	[A1B0G3]+[L6]+[P6]	160	5,76	8,28
3	Akkukabelabdeckung	Schraube	1,8 mm Kreuzschlitzschraube	1	0	0	Kreuzschraubenzieher 000	1,44	2,52	5*[L1] + [A1B0G1] + [A1B0P1]	90	3,24	7,2
	Akkukabelabdeckung	Schraube	1,6mm Kreuzschlitzschraube	1	0	0	Kreuzschraubenzieher 000	0	2,52	5*[L1] + [A1B0G1] + [A1B0P1]	90	3,24	5,76
	Akkukabelabdeckung	Loose Fit	Akkukabelabdeckung entfernen	1	0	0	Pinzette	1,44	2,52	[A1B0G3]+[A1B0P3]+[L3]+[A1B0P1]	130	4,68	8,64
4	Akku	Connector	Akkuconnector lösen	1	0	0	Pinzette	0	2,52	[A1B0G3]+[A1B0P3]+[L3]	110	3,96	6,48
5	Displayabdeckung	Schrauben	1,6mm Kreuzschlitzschraube	1	0	0	Kreuzschraubenzieher 000	1,44	2,52	5*[L1] + [A1B0G1] + [A1B0P1]	90	3,24	5,76
	Displayabdeckung	Schrauben	1,2mm Kreuzschlitzschraube	2	0	0	Kreuzschraubenzieher 000	0	5,04	5*[L1] + [A1B0G1] + [A1B0P1]	180	6,48	12,96
	Displayabdeckung	Loose Fit	Displayabdeckung entfernen	1	0	0	Pinzette	1,44	2,52	[A1B0G3]+[A1B0P3]+[L3]+[A1B0P1]	130	4,68	8,64
6	Frontkamera	Connector	Frontkameraconnector lösen	1	0	0	Pinzette	0	2,52	[A1B0G3]+[A1B0P3]+[L3]	110	3,96	6,48
7	LCD	Connector	LCDconnector lösen	1	0	0	Pinzette	0	2,52	[A1B0G3]+[A1B0P3]+[L3]	110	3,96	6,48
8	Digitizer	Connector	Digitizerconnector lösen	1	0	0	Pinzette	0	2,52	[A1B0G3]+[A1B0P3]+[L3]	110	3,96	6,48
9	Display	Loose Fit	Display vom hinteren Gehäuse trennen	1	0	0	Hand	0	2,52	[A1B0G3]+[L3]+[P3]	100	3,6	6,12
10	Akku	Kleber	An Lasche ziehen und Akku entfernen	1	0	0	Hand	0	2,52	[A1B0G3]+[L6]+[M16]+[A1B0P3]	300	10,8	13,32
													200,52

iPhone 6s

Hersteller	Modell	Baujahr	
iPhone	6s	2015	
Geräteindikatoren	Gewichtung		
Demontagetiefe	25%		
Verbidnungsart	20%		
Werkzeugart	20%		
Demontagezeit	15%		
eDiM	5%		
Reparaturinformation	15%		
Indikatoren	Auswahl	Punkte	Gewichtete Punkte
Demontagetiefe	20<x≤35	3	0,75
Verbindungsart	Nicht wiederverwendbar/entfernbar	0	0
Werkzeugart	Einfache Werkzeuge	8	1,6
Demontagezeit	2<t≤15	8	1,2
eDiM	über der Referenzzeit	0	0
Reparaturinformationen	nicht frei zugänglich	0	0
Gesamtpunkteanzahl	3,55		
Akku-Demontierbarkeitsindex	D		
	A		
	B		
	C		
	D		
	E		

Komponentencode	Demontagefolge der Komponenten	Demontagefolge der Befestigungselemente	Verbindungsart	Anzahl der Befestigungen	Anzahl der Manipulationen	Identifizierbarkeit (0,1)	Art des Werkzeugs	Werkzeugwechsel (s)	Werkzeugpositionierung (s)	Demontage MOST-Sequenz	Demontage TMU	Demontage (s)	eDiM (s)
1	Gehäuse	Schraube	3,6mm Pentalobeschraube	2	0	0	Pentalobeschraubenzieher	1,44	5,04	5* L1 + A1B0G1 + A1B0P1	180,00	6,48	12,96
2	Display	Kleber	Display ist mit Kleber befestigt, nur beim Homebutton	1	0	0	Föhn	1,44	2,52	heat up = 60 s + A1B0P1	1687	60,72	64,68
	Display		Saugnapf wird auf Display angebracht	1	0	0	Saugnapf	1,44	2,52	A1B0G1 + A1B0P3	60	2,16	6,12
	Display	Kleber/Klemme	Ziehen am Saugnapf, in Spalt zw. Display und Rahmen wird Plektrum gesteckt	1	0	0	Plektrum	1,44	2,52	A1B0G3 + L6 + M16 + A1B0P6	330	11,88	15,84
	Display	Kleber	Plektrum entlang Display/Rahmen führen, um den Kleber zu lösen	1	0	0	Plektrum	0	2,52	9x(L6 + M16 + A1B0P6)	2610	93,96	96,48
	Display	90° anheben	Display anheben und aufstellen	1	0	0	Hand	0	2,52	A1B0G3 + L6 + P6	160	5,76	8,28
3	Akkukabelabdeckung	Schraube	2,9mm Kreuzschlitzschraube	1	0	0	Kreuzschraubenzieher 000	1,44	2,52	5* L1 + A1B0G1 + A1B0P1	90	3,24	7,2
	Akkukabelabdeckung	Schraube	2,2mm Kreuzschlitzschraube	1	0	0	Kreuzschraubenzieher 000	0	2,52	5* L1 + A1B0G1 + A1B0P1	90	3,24	5,76
	Akkukabelabdeckung	Loose Fit	Akkukabelabdeckung entfernen	1	0	0	Pinzette	1,44	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3 + A1B0P1	130	4,68	8,64
4	Akku	Connector	Akkuconnector lösen	1	0	0	Pinzette	0	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3	110	3,96	6,48
5	Displayabdeckung	Schrauben	2,8mm Kreuzschlitzschraube	1	0	0	Kreuzschraubenzieher 000	1,44	2,52	5* L1 + A1B0G1 + A1B0P1	90	3,24	5,76
	Displayabdeckung	Schrauben	1,2mm Kreuzschlitzschraube	3	0	0	Kreuzschraubenzieher 000	0	7,56	5* L1 + A1B0G1 + A1B0P1	270	9,72	17,28
	Displayabdeckung	Loose Fit	Displayabdeckung entfernen	1	0	0	Pinzette	1,44	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3 + A1B0P1	130	4,68	8,64
6	Frontkamera	Connector	Frontkameraconnector lösen	1	0	0	Pinzette	0	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3	110	3,96	6,48
7	LCD	Connector	LCDconnector lösen	1	0	0	Pinzette	0	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3	110	3,96	6,48
8	Digitizer	Connector	Digitizerconnector lösen	1	0	0	Pinzette	0	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3	110	3,96	6,48
9	Display	Loose Fit	Display vom hinteren Gehäuse trennen und ablegen	1	0	0	Hand	0	2,52	A1B0G3 + L3 + P3	100	3,6	6,12
10	Akku	Kleber	Klebestreifen auf Akkuunterseite herausziehen	2	0	0	Pinzette	1,44	5,04	A1B0G3 + L6 + M16 + A1B0P1	560	20,16	26,64
	Akku	Loose Fit	Akku entfernen	1	0	0	Hand	0	1,44	A1B0G1 + L6 + A1B0P3	120	4,32	5,76
													322,1

Sony Xperia XA

Hersteller	Modell	Baujahr	
Sony	Xperia XA	2016	
Geräteindikatoren	Gewichtung		
Demontagetiefe	25%		
Verbidnungsart	20%		
Werkzeugart	20%		
Demontagezeit	15%		
eDiM	5%		
Reparaturinformation	15%		
Indikatoren	Auswahl	Punkte	Gewichtete Punkte
Demontagetiefe	2<x≤10	8	2
Verbindungsart	Nicht wiederverwendbar/entfernbar	0	0
Werkzeugart	Einfache Werkzeuge	8	1,6
Demontagezeit	2<t≤15	8	1,2
eDiM	unterhalb der Referenzzeit	10	0,5
Reparaturinformationen	nicht frei zugänglich	0	0
Gesamtpunkteanzahl	5,3		
Akku-Demontierbarkeitsindex	C		
	A		
	B		
	C		
	D		
	E		

Komponentencode	Demontagefolge der Komponenten	Demontagefolge der Befestigungselemente	Verbindungsart	Anzahl der Befestigungen	Anzahl der Manipulationen	Identifizierbarkeit (0,1)	Art des Werkzeugs	Werkzeugwechsel (s)	Werkzeugpositionierung(s)	Demontage MOST-Sequenz	Demontage TMU	Demontage (s)	eDiM (s)
1	Rückseite	Kleber	Rückseite ist an der Innenseite an Rändern geklebt	1	0	1	Fön	1,44	2,52	heat up = 252 s + A1B0P1	7020	252,7	256,68
	Rückseite		Saugnapf wird auf Rückseite angebracht	1	0	0	Saugnapf	1,44	2,52	A1B0G1 + A1B0P3	60	2,16	6,12
	Rückseite	Kleber	Ziehen am Saugnapf, in Spalt zw. Rückseite und Rahmen wird Plektrum gesteckt	1	0	0	Plektrum	1,44	2,52	A1B0G3 + L6 + M16 + A1B0P6	330	11,88	15,84
	Rückseite	Kleber	Plektrum entlang Rückseite/Rahmen führen, um den Kleber zu lösen, anschließend Rückseite weglegen	1	0	0	Plektrum	0	2,52	9×(L6 + M16 + A1B0P6) + A1B0P3	2650	95,4	97,92
2	Akku	Klebestreifen	Klebestreifen auf dem Akku mit der Lasche lösen	4	0	0	Hand	0	10,1	A1B0G3 + L6 + M16	1040	37,44	47,52
	Akku	Kleber	Mit Spatel Akku heraushebeln	1	0	0	Spatel	1,4	2,52	A1B0G3 +2×(L6 + M16)	480	17,28	10,44
	Akku	Kleber	Akku mit der Hand herausnehmen	1	0	0	Hand	0	1,44	A1B0G1 + L6 + A1B0P3	120	4,32	5,76
													440,3

Huawei P9 Lite

Hersteller	Modell	Baujahr	
Huawei	P9 Lite	2016	
Geräteindikatoren	Gewichtung		
Demontagetiefe	25%		
Verbidnungsart	20%		
Werkzeugart	20%		
Demontagezeit	15%		
eDiM	5%		
Reparaturinformation	15%		
Indikatoren	Auswahl	Punkte	Gewichtete Punkte
Demontagetiefe	20<x≤35	3	0,75
Verbindungsart	Nicht wiederverwendbar/entfernbar	0	0
Werkzeugart	Einfache Werkzeuge	8	1,6
Demontagezeit	t>60	0	0
eDiM	über der Referenzzeit	0	0
Reparaturinformationen	nicht frei zugänglich	0	0
Gesamtpunkteanzahl	2,35		
Akku-Demontierbarkeitsindex	E		
	A		
	B		
	C		
	D		
	E		

Komponentencode	Demontagefolge der Komponenten	Demontagefolge der Befestigungselemente	Verbindungsart	Anzahl der Befestigungen	Anzahl der Manipulationen	Identifizierbarkeit (0..1)	Art des Werkzeugs	Werkzeugwechsel (s)	Werkzeugpositionierung(s)	Demontage MOST-Sequenz	Demontage TMU	Demontage (s)	eDiM (s)
1	Rückseite	Snapfit	Plektrum zw. Rückseite und Rahmen stecken	1	0	0	Plektrum	1,44	2,52	A1B0G3 + L6 + A1B0P6	170	6,12	10,08
	Rückseite	Snapfit	Snapfit an Rückseite lösen	22	0	0	Plektrum	0	2,52	A1B0G3 +22x L3	700,00	25,2	27,72
	Rückseite	Loose Fit	Entfernen aus Halterung	1	0	0	Hand	0	2,52	A1B0G1 + A1B0P1	40	1,44	2,88
2	Lautsprecher	Schrauben	2,9mm Kreuzschlitzschraube #00	3	0	0	Kreuzschraubenzieher 00	1,44	7,56	5* L1 + A1B0G1 + A1B0P1	270	9,72	17,28
	Lautsprecher	Schrauben	3,8mm Kreuzschlitzschraube #00	4	0	0	Kreuzschraubenzieher 00	0	10,08	5* L1 + A1B0G1 + A1B0P1	360	12,96	23,04
	Lautsprecher	Loose Fit	Lautsprecher entfernen	1	0	0	Pinzette	1,44	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3 + A1B0P1	130	4,68	8,64
3	Motherboardabdeckung	Schrauben	2,9mm Kreuzschlitzschraube #00	9	0	0	Kreuzschraubenzieher 00	1,44	22,68	5* L1 + A1B0G1 + A1B0P1	810	29,16	53,28
	Motherboardabdeckung	Connector	Fingerprintconnector lösen	1	0	0	Pinzette	1,44	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3	110	3,96	7,92
	Motherboardabdeckung	Loose Fit	Motherboardabdeckung entfernen	1	0	0	Pinzette	0	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3 + A1B0P1	130	4,68	7,2
4	Akku	Connector	Akkuconnector lösen	1	0	0	Pinzette	0	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3	110	3,96	6,48
	Akku	Kleber	Akku auf Unterseite angeklebt	1	0	0	Fön	1,44	2,52	heat up = 60 s + A1B0P1	1686,7	60,72	64,68
	Akku	Kleber	Mit Spatel Akku heraushebeln	1	1	0	Spatel	1,44	2,52	A1B0G3 +2x(L6 + M16)	480	17,28	21,24
	Akku	Kleber	Akku mit der Hand herausnehmen	1	0	0	Hand	0	1,44	A1B0G1 + L6 + A1B0P3	120	4,32	5,76
													256,2

Huawei P30 Lite

Hersteller	Modell	Baujahr	
Huawei	P30 Lite	2019	
Geräteindikatoren	Gewichtung		
Demontagetiefe	25%		
Verbindungsart	20%		
Werkzeugart	20%		
Demontagezeit	15%		
eDiM	5%		
Reparaturinformation	15%		
Indikatoren	Auswahl	Punkte	Gewichtete Punkte
Demontagetiefe	20<x≤35	3	0,75
Verbindungsart	Nicht wiederverwendbar/entfernbar	0	0
Werkzeugart	Einfache Werkzeuge	8	1,6
Demontagezeit	15<t≤30	5	0,75
eDiM	über der Referenzzeit	0	0
Reparaturinformationen	nicht frei zugänglich	0	0
Gesamtpunkteanzahl	3,1		
Akku-Demontierbarkeitsindex	E		
	A		
	B		
	C		
	D		
	E		

Komponentencode	Demontagefolge der Komponenten	Demontagefolge der Befestigungselemente	Verbindungsart	Anzahl der Befestigungen	Anzahl der Manipulationen	Identifizierbarkeit (0,1)	Art des Werkzeugs	Werkzeugwechsel (s)	Werkzeugpositionierung(s)	Demontage MOSF-Sequenz	Demontage TMU	Demontage (s)	eDiM (s)
1	Rückseite	Kleber	Rückseite ist an der Innenseite an Rändern geklebt	1	0	1	Fön	1,44	2,52	heat up = 270 s + A1B0P1	7546,00	271,66	275,62
	Rückseite	Kleber	Saugnapf wird auf Display angebracht	1	0	0	Saugnapf	1,44	2,52	A1B0G1 + A1B0P3	60	2,16	6,12
	Rückseite	Kleber	Ziehen am Saugnapf, in Spalt zw. Display und Rahmen wird Plektrum gesteckt	1	0	0	Plektrum	1,44	2,52	A1B0G3 + IL6 + IM16 + A1B0P6	330	11,88	15,84
	Rückseite	Kleber	Plektrum entlang Rückseite/Rahmen führen, um den Kleber zu lösen	1	0	0	Plektrum	0	2,52	9×(L6 + IM16 + A1B0P6)	2610	93,96	96,48
	Rückseite	Connector	Connector-Fingerprint zw. Display und Chassis trennen, Rückseite weglegen	1	0	0	Pinzette	1,44	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3 + A1B0P3	150	5,4	9,36
2	Abdeckung Hauptplatine	Schrauben	2,7mm Kreuzschlitzschraube #00	3	0	0	Kreuzschraubenzieher 00	1,44	7,56	5* L1 + A1B0G1 + A1B0P1	90	9,72	18,72
	Abdeckung Hauptplatine	Schrauben	3,3mm Kreuzschlitzschraube #00	7	0	0	Kreuzschraubenzieher 00	0	17,6	5* L1 + A1B0G1 + A1B0P1	630	22,68	40,32
	Abdeckung Hauptplatine	Loose Fit	Displayabdeckung entfernen	1	0	0	Pinzette	1,44	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3 + A1B0P1	130	4,68	8,64
3	Akkuabdeckung	Loose Fit	Displayabdeckung entfernen	1	0	0	Pinzette	0	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3 + A1B0P1	130	4,68	7,2
4	Lautsprecher	Schraube	2,7mm Kreuzschlitzschraube #00	6	0	0	Kreuzschraubenzieher 00	1,44	15,1	5* L1 + A1B0G1 + A1B0P1	540	19,44	36
	Lautsprecher	Schraube	3,3mm Kreuzschlitzschraube #00	2	0	0	Kreuzschraubenzieher 00	0	5,04	5* L1 + A1B0G1 + A1B0P1	180	6,48	11,52
	Lautsprecher	Loose Fit	Displayabdeckung entfernen	1	0	0	Pinzette	1,44	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3 + A1B0P1	130	4,68	8,64
5	Akku	Kleber	An Lasche ziehen und Akku entfernen	3	0	0	Hand	0	7,56	A1B0G3 + L6 + IM16 + A1B0P3	900	32,4	39,96
													574,42

Samsung Galaxy A02s

Hersteller	Modell	Baujahr	
Samsung	Galaxy A02s	2021	
Geräteindikatoren	Gewichtung		
Demontagetiefe	25%		
Verbidnungsart	20%		
Werkzeugart	20%		
Demontagezeit	15%		
eDiM	5%		
Reparaturinformation	15%		
Indikatoren	Auswahl	Punkte	Gewichtete Punkte
Demontagetiefe	10<x≤20	5	1,25
Verbindungsart	Nicht wiederverwendbar/entfernbar	0	0
Werkzeugart	Einfache Werkzeuge	8	1,6
Demontagezeit	t>60	0	0
eDiM	über der Referenzzeit	0	0
Reparaturinformationen	nicht frei zugänglich	0	0
Gesamtpunkteanzahl	2,85		
Akku-Demontierbarkeitsindex	E		
	A		
	B		
	C		
	D		
	E		

Komponentencode	Demontagefolge der Komponenten	Demontagefolge der Befestigungselemente	Verbindungsart	Anzahl der Befestigungen	Anzahl der Manipulationen	Identifizierbarkeit (0,1)	Art des Werkzeugs	Werkzeugwechsel (s)	Werkzeugpositionierung(s)	Demontage MOST-Sequenz	Demontage TMU	Demontage (s)	eDiM (s)
1	Rahmen	Simkartenhalterung entfernen	Federmechanismus	1	0	0	Nadel	1,44	2,52	[A1B0G3] + [L6] + [A1B0P3]	140,00	5,04	9
2	Rahmen	Snapfit	Plektrum zw. Rückseite und Rahmen stecken	1	0	0	Plektrum	1,44	2,52	[A1B0G3] + [L6] + [A1B0P6]	170	6,12	10,08
	Rahmen	Klemme	Plektrum entlang des Displayrands führen	6	0	0	Plektrum	0	2,52	6×([L6]+[M8]+[A1B0P6])	1260	45,36	47,88
	Rückseite	Loose Fit	Rückseite entfernen	1	0	0	Hand	0	2,52	[A1B0G1] + [A1B0P3]	60	2,16	4,68
3	Kameraabdeckung	Schraube	Kreuzschlitzschraube #00	9	0	0	Kreuzschraubenzieher 00	1,44	22,7	5*([L1] + [A1B0G1] + [A1B0P1])	810	29,16	53,28
	Kameraabdeckung	Loose Fit	Kameraabdeckung entfernen	1	0	0	Pinzette	1,44	2,52	[A1B0G3]+[A1B0P3]+[L3]+[A1B0P1]	130	4,68	8,64
4	Hauptbandconnector	Connector	Connector lösen	2	0	0	Pinzette	0	5,04	[A1B0G3]+[A1B0P3]+[L3]	220	7,92	12,96
5	Akku	Connector	Akkuconnector lösen	1	0	0	Pinzette	0	2,52	[A1B0G3]+[A1B0P3]+[L3]	110	3,96	6,48
	Akku	Kleber	Akku auf Unterseite angeklebt	1	0	0	Fön	1,44	2,52	[heat up = 60 s] + [A1B0P1]	1686,67	60,72	64,68
	Akku	Kleber	Mit Spatel Akku heraushebeln	1	1	0	Spatel	1,44	2,52	[A1B0G3]+2×([L6]+[M16])	480	17,28	21,24
	Akku	Kleber	Akku mit der Hand herausnehmen	1	0	0	Hand	0	1,44	[A1B0G1]+[L6]+[A1B0P3]	120	4,32	5,76
													244,7

LG G6

Hersteller	Modell	Baujahr	
LG	G6	2017	
Geräteindikatoren	Gewichtung		
Demontagetiefe	25%		
Verbidnungsart	20%		
Werkzeugart	20%		
Demontagezeit	15%		
eDiM	5%		
Reparaturinformation	15%		
Indikatoren	Auswahl	Punkte	Gewichtete Punkte
Demontagetiefe	20<x≤35	3	0,75
Verbindungsart	Nicht wiederverwendbar/entfernbar	0	0
Werkzeugart	Einfache Werkzeuge	8	1,6
Demontagezeit	2<t≤15	8	1,2
eDiM	über der Referenzzeit	0	0
Reparaturinformationen	nicht frei zugänglich	0	0
Gesamtpunkteanzahl	3,55		
Akku-Demontierbarkeitsindex	D		
	A		
	B		
	C		
	D		
	E		

Komponentencode	Demontagefolge der Komponenten	Demontagefolge der Befestigungselemente	Verbindungsart	Anzahl der Befestigungen	Anzahl der Manipulationen	Identifizierbarkeit (0-1)	Art des Werkzeugs	Werkzeugwechsel (s)	Werkzeugpositionierung (s)	Demontage MOST-Sequenz	Demontage TWU	Demontage (s)	eDiM (s)
1	Rückseite	Kleber	Rückseite ist an der Innenseite an Rändern geklebt	1	0	0	Fön	1,44	2,52	heat up = 265 s + A1B0P1	7381,00	266	269,7
	Rückseite		Saugnapf wird auf Rückseite angebracht	1	0	0	Saugnapf	1,44	2,52	A1B0G1 + A1B0P3	60	2,16	6,12
	Rückseite	Kleber	Ziehen am Saugnapf, in Spalt zw. Rückseite und Rahmen wird Plektrum gesteckt	1	0	0	Plektrum	1,44	2,52	A1B0G3 + L6 + M16 + A1B0P6	330	11,88	15,84
	Rückseite	Kleber	Plektrum entlang Rückseite/Rahmen führen, um den Kleber zu lösen	1	0	0	Plektrum	0	2,52	9x(L6 + M16 + A1B0P6)	2610	93,96	96,48
2	Antennenabschirmung	Schrauben	Kreuzschrauben #000	4	0	0	Kreuzschraubenzieher 000	1,44	10,1	5* L1 + A1B0G1 + A1B0P1	360	12,96	24,48
	Antennenabschirmung	Loose Fit	untere Antennenabschirmung entfernen	1	0	0	Pinzette	1,44	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3 + A1B0P1	130	4,68	8,64
3	Antennenabschirmung	Schrauben	Kreuzschrauben #000	7	0	0	Kreuzschraubenzieher 000	1,44	17,6	5* L1 + A1B0G1 + A1B0P1	630	22,68	41,76
	Antennenabschirmung	Loose Fit	obere Antennenabschirmung entfernen	1	0	0	Pinzette	1,44	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3 + A1B0P1	130	4,68	8,64
4	Akku	Connector	Akkuconnector lösen	1	0	0	Pinzette	0	2,52	A1B0G3 + A1B0P3 + L3	110	3,96	6,48
	Akku	Kleber	Akku auf Unterseite angeklebt	1	0	0	Fön	1,44	2,52	heat up = 60 s + A1B0P1	1686,67	60,72	64,68
	Akku	Kleber	Mit Spatel Akku heraushebeln	1	1	0	Spatel	1,44	2,52	A1B0G3 +2x(L6 + M16)	480	17,28	21,24
	Akku	Kleber	Akku mit der Hand herausnehmen	1	0	0	Hand	0	1,44	A1B0G1 + L6 + A1B0P3	120	4,32	5,76
													569,82