

Abschlussbericht BWPLUS - ZiProMo

Zirkuläre Produktion urbaner Mobilitätslösungen - Potentialanalyse E-Scooter

von

Chantal Rietdorf, Valentin Honold, Tom Grom, Michael Rentschler, Sophia Giunta, Ali Bozkurt, Merlin Stölzle

Universität Stuttgart
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP)
Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT)
Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)

Förderkennzeichen: BWCE24108

Laufzeit: 01.01.2024 - 31.07.2024

Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

September 2024



Baden-Württemberg
Ministerium für Umwelt, Klima
und Energiewirtschaft

Kurzfassung

Der öffentliche Diskurs über innovative Mobilitätskonzepte wie E-Scooter ist zwiegespalten: Einerseits bieten sie Lösungsansätze für städtische Herausforderungen wie Platzmangel und Umweltbelastungen, andererseits stehen sie vor erheblichen Problemen, insbesondere aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer und fehlender nachhaltiger Konzepte für den Umgang mit ausgedienten Fahrzeugen. Das vorliegende Projekt zielte darauf ab, die Relevanz der Kreislaufführung von E-Scootern im Kontext Baden-Württembergs zu bewerten. Ausgangspunkt der Untersuchung waren die Produktdesign- und End-of-Use-Phase. Für die Designphase wurde ein Konzept entwickelt, um die Kreislaufgerechtigkeit der E-Scooter und ihrer Komponenten zu bewerten und deren Eignung für die Kreislaufführung festzustellen. In der End-of-Use-Phase stand die Analyse der Rückführlogistik im Vordergrund, um Anforderungen an ein effektives Rückführungssystem zu definieren. Ergänzend wurden in allen Lebenszyklusphasen Aspekte wie regulatorische Rahmenbedingungen, ökologische Faktoren und zirkuläre Geschäftsmodelle berücksichtigt, um ein umfassendes Bild der Kreislaufführung zu gewinnen. Interviews mit Akteuren halfen zudem, Treiber und Hindernisse zu identifizieren. Die Kreislaufführung bietet Potenzial, Umweltbelastungen zu verringern und Ressourcen durch Wiederverwendung und Recycling effizienter zu nutzen. Jedoch stehen eine unzureichende Infrastruktur, niedrige Rücklaufmengen und regulatorische Hürden einer wirtschaftlich tragfähigen Umsetzung im Weg. Um dieses Potenzial auszuschöpfen, sind der Aufbau eines funktionierenden Rückführnetzwerks, die Harmonisierung gesetzlicher Vorgaben sowie Anreize für reparaturfreundliches Design und langlebige Produkte entscheidend.

Inhalt

Kurzfassung.....	ii
Inhalt.....	iii
Abbildungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	vi
Abkürzungsverzeichnis.....	vii
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	1
1.3 Vorgehen.....	2
2 Konzept zur Bewertung der Kreislaufgerechtigkeit in den frühen Phasen der Produktentwicklung.....	3
2.1 Übergeordnetes Ziel des Arbeitspakets.....	3
2.2 Recherche zu Produktmerkmalen von Kreislaufgerechtigkeit.....	3
2.3 Design for Circular Economy.....	4
2.3.1 Ableitung von übergeordneten Kategorien und Definition von Design for Circular Economy.....	4
2.3.2 Zuordnung von Merkmalen und Kreislaufstrategien.....	5
2.3.3 Definition von Design for Circular Economy.....	6
2.4 Entwicklung eines Methodenkonzepts.....	6
2.4.1 Anforderungsableitung aus Interviews.....	6
2.4.2 Methodenkonzept.....	6
2.5 Evaluation des Methodenkonzepts am Beispiel einer E-Scooter-Batterie.....	7
3 Prognose und Logistik.....	9
3.1 Identifikation der beteiligten Akteure in der Reverse Supply Chain.....	9
3.2 Definition von Up-/Recycling-Strukturen und Konzept für die Netzwerkplanung.....	10
3.3 Prognosemodell zukünftiger Rückläufer als Grundlage für umfangreiche Simulation	14
3.4 Grundkonzept Entscheidungsmodell am EoU für nutzbare E-Scooter Komponenten	17
4 Regulatorische Rahmenbedingungen.....	19
4.1 Regulatorische Rahmenbedingungen.....	19
4.2 Herausforderungen der Abfallhierarchie.....	20
4.3 Rollen und Verantwortlichkeiten.....	21
4.4 Normen und Standards zur Circular Economy von E-Scootern.....	27
5 Ökologische Betrachtung.....	30
5.1 Identifikation relevanter Ökobilanzen.....	30
5.2 Vergleich der Ökobilanzen.....	31
5.3 Ökologische Optimierungsmaßnahmen.....	33
5.3.1 Einflussfaktoren und Handlungsempfehlungen.....	34

6	Zirkuläre Geschäftsmodelle.....	37
6.1	Literaturrecherche und – Analyse.....	37
6.2	Best Practice Beispiele.....	41
6.3	Experteninterviews.....	44
6.3.1	Analyse durchgeführter Interviews nach Branche.....	44
6.4	Zirkuläre Geschäftsmodelle.....	47
6.5	Vorgehensmodell und Handlungsempfehlungen.....	48
7	Zusammenfassung.....	51
8	Verwertung.....	53
9	Ausblick.....	55
	Literaturverzeichnis.....	56
	Anhang.....	A
9.1	Anhang zu Kapitel 2.....	A
9.2	Anhang zu Kapitel 6.....	E

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstruktur aufgeteilt nach Arbeitspaketen.....	2
Abbildung 2: Methodische Vorgehensweise innerhalb Arbeitspaket 1.....	3
Abbildung 3: Kategorisierungsansatz der DfCE-Merkmale.....	5
Abbildung 4: Zuordnungsmatrix von DfCE-Merkmalen und Kreislaufstrategien.....	6
Abbildung 5: Schematische Darstellung des Methodenansatzes (HoQ).....	7
Abbildung 6: Bewertete Bauteile der E-Scooter-Batterie; entnommen aus Well Done Tips, 2018.....	8
Abbildung 7 Netzwerk mit allen relevanten Akteuren.....	13
Abbildung 8 Up-/Recycling-Hub im urbanen Raum für E-Scooter.....	14
Abbildung 9: Grundkonzept des Entscheidungsmodells im End-of-Life für nutzbare E-Scooter Komponenten.....	18
Abbildung 10: Richtlinien, Verordnungen und Gesetze die im Kontext Kreislaufwirtschaft von E-Scootern relevant sind sowie deren Geltungsbereich (EU oder Deutschland).....	19
Abbildung 11: Zeitstrahl zu den Anforderungen an LV-Batterien gemäß der BattVO; eigene Darstellung in Anlehnung an Öttinger (2023).....	24
Abbildung 12 Vergleich der Treibhausgasemissionen der jeweiligen Szenarien für die 15 analysierten Studien, jeder Punkt in der Abbildung steht dabei für ein Szenario.....	33
Abbildung 13 Einflussfaktoren auf die Umweltwirkungen von E-Scootern nach Lebenszyklusphase.....	33
Abbildung 14 Ausgefülltes Circular Business Model Canvas am Bsp. TierDott (Vizologi, 2024).....	42
Abbildung 15 Ausgefülltes Circular Business Model Canvas am Beispiel Trittbretthelden....	42
Abbildung 16 Ausgefülltes Circular Business Model Canvas am Beispiel Umicore.....	43
Abbildung 17 Anwendungsleitfaden für Methodenentwurf zur Bewertung der Kreislaufgerechtigkeit.....	D
Abbildung 18 Formblatt des Methodenentwurfs.....	E
Abbildung 19 Ausgefülltes zirkuläres Business Modell Canvas für das Geschäftsmodellmuster zirkuläre Beschaffung.....	G
Abbildung 20 Ausgefülltes zirkuläres Business Modell Canvas für das Geschäftsmodellmuster Product-as-a-service.....	H
Abbildung 21 Ausgefülltes zirkuläres Business Modell Canvas für das Geschäftsmodellmuster Reparatur und Refurbishing.....	H
Abbildung 22 Ausgefülltes zirkuläres Business Modell Canvas für das Geschäftsmodellmuster Remanufacturing.....	I
Abbildung 23 Ausgefülltes zirkuläres Business Modell Canvas für das Geschäftsmodellmuster Repurposing.....	I
Abbildung 24 Ausgefülltes zirkuläres Business Modell Canvas für das Geschäftsmodellmuster Recycling.....	J

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Recherchierte DfCE-Sammlungen.....	4
Tabelle 2 Beispiel für die Kategorisierung der DfCE-Merkmale.....	5
Tabelle 3: Darstellung der verschiedenen Akteure und ihrer logistischen Anforderungen.....	10
Tabelle 4 Prognose Batterieaufkommen für E-Scooter.....	15
Tabelle 5: Parameter für die Ermittlung des Alterungszustands und Lebensdauer von LV-Batterien.....	17
Tabelle 6 Kerninhalte der Richtlinien, Verordnungen und Gesetze die im Kontext der Kreislaufführung von E-Scootern relevant sind.....	19
Tabelle 7 Zuordnung der Akteure zur Regulatortik.....	21
Tabelle 8 Horizontale Normen und Standards zur Unterstützung der Kreislaufwirtschaft.....	27
Tabelle 9 Relevante Normen für die R-Strategien refuse, rethink, reduce.....	28
Tabelle 10 Relevante Normen für die R-Strategien reuse, repair, refurbish, remanufacture.	28
Tabelle 11 Relevante Normen für die R-Strategien repurpose und recycle.....	28
Tabelle 12 Übersicht über die identifizierten Ökobilanzen zu E-Scootern und deren Zielsetzung.....	30
Tabelle 13 Übersicht über die Rahmenbedingungen der analysierten Lebenszyklusanalysen	31
Tabelle 14 Übersicht der einbezogenen Quellen der Literaturanalyse zu zirkulären Geschäftsmodellen.....	37
Tabelle 15 Übersicht und Erklärung über die Zirkulären Wertschöpfungsmöglichkeiten und zirkulärer Geschäftsmodellmuster zur Auswahl der Best Practices.....	41
Tabelle 16 Identifizierte Erfolgsfaktoren je Geschäftsmodell.....	43
Tabelle 17 Überblick über Experten der durchgeführten Interviews.....	44
Tabelle 18 Bewertung der Anwendbarkeit zirkulärer Geschäftsmodelle je Akteur.....	48
Tabelle 19 Verwertungsplan der Projektergebnisse.....	53
Tabelle 20: Kontaktierte Akteure in der E-Scooter-Branche.....	E

Abkürzungsverzeichnis

- AbfRRL Abfallrahmenrichtlinie
- ADR Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route)
- BattVO Batterieverordnung
- BGB Bürgerliches Gesetzbuch
- BMC Business Model Canvas
- BMS Batteriemanagementsystem
- CED Kumulierter Energiebedarf (Cumulative Energy Demand)
- DfCE Design for Circular Economy
- DfX Design for X
- EAG Elektro- und Elektronik-Altgeräte
- E-Bike Pedelecs mit Tretunterstützung bis 25 km/h
- ECHA Europäische Chemikalienagentur
- ElektroG, Elektroggesetz
- ElektroStoffV, Elektro- und Elektronikgeräte-Stoff-Verordnung
- EoU End-of-Use (Ende der Nutzung)
- GHG Treibhausgas (Greenhouse gas)
- GRS Gemeinsames Rücknahmesystem Servicegesellschaft mbH
- GWP Treibhausgaspotential (Global Warming Potential)
- HoQ House of Quality
- IATA DGR Regelwerk für den Transport von Gefahrgut im Luftverkehr (International Air Transport Association Dangerous Goods Regulations)
- IMDG Beförderungsvorschrift für gefährliche Güter im Seeschiffsverkehr (International Maritime Dangerous Goods Code)
- LCA Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment)
- LIB Lithium-Ionen-Batterien
- LV Leichte Verkehrsmittel
- ÖkodesignVO Ökodesign Verordnung
- POP Persistente organische Schadstoffe (persistent organic pollutants)
- QFD Quality Function Deployments
- REACH Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)
- RoHS Beschränkung [der Verwendung bestimmter] gefährlicher Stoffe (Restriction of Hazardous Substances)
- WEEE Abfälle von elektrischen und elektronischen Geräten (Waste of Electrical and Electronic Equipment)

1 Einleitung

1.1 Motivation

Mit steigendem Mobilitätsbedürfnis der Bevölkerung gehen im derzeit vorherrschenden Verkehrssystem erhebliche Auswirkungen auf Klima, Umwelt und menschliche Gesundheit einher. So trug im Jahr 2021 der Mobilitätssektor mit knapp 19,5% zu den deutschlandweiten Treibhausgasemissionen bei (wohlgemerkt inklusive Gütertransport) (Umweltbundesamt, 2022). Es besteht die Notwendigkeit, strategische Ansätze zu entwickeln, die dazu beitragen, diese Effekte zu minimieren. Dabei rückt insbesondere die Verringerung der Emissionsintensität im Bereich des Individualverkehrs verstärkt in den Fokus (Banister, 2011).

In urbanen Zentren nehmen entsprechend innovative Mobilitätskonzepte zunehmend an Relevanz zu. Hier liegt der Fokus auf der Schaffung niederschwelliger Lösungen für den Individualverkehr (Gebhardt et al., 2021), da sich Herausforderungen nicht nur durch erhöhte Umweltbelastung, sondern ebenfalls durch hohe Verkehrsdichte und das rapide Wachstum des Fahrzeugbestands ergeben. In diesem Zusammenhang gewinnen E-Scooter als vielversprechende Alternativen zu Autos für Kurzstrecken im urbanen Raum an Bedeutung. Laut Degele et al. (2018), werden E-Scooter hauptsächlich für Strecken zwischen 1 und 6 km genutzt, vor allem in Großstädten und Metropolen zeigen sich hierbei enorme Potenziale, denn Autofahrten übersteigen diese Distanz im urbanen Raum oftmals nicht (Tung, 2022). Dabei kann die Substitution von Autofahrten durch E-Scooter in einer Verringerung von Lärm und Umweltverschmutzung sowie der Vermeidung von Verkehrsstaus resultieren (Degele et al., 2018; Held, 2020). Gleichzeitig geht die Nutzung von E-Scootern auch mit diversen Problemen und Herausforderungen einher. Diese betreffen bspw. die Herstellung der Batteriesysteme, die begrenzte Fahrleistung und kurze Lebensdauer. Aktuelle E-Scooter-Generationen haben eine Lebensdauer von etwa 2 Jahren (Cazzola & Crist, 2020). Diese Geräte inklusive der enthaltenen Lithium-Ionen-Batterien (LIB) werden zum größten Teil in China produziert und nach Europa transportiert. Im deutschen Anwendungskontext mit einer durchschnittlichen Tagesfahrleistung von 10,2 km werden die E-Scooter täglich von Servicefahrzeugen eingesammelt, was zusätzliche Transportemissionen verursacht (Severengiz, Finke, Schelte, & Wendt, 2020). Eine weitere Herausforderung stellt die Gefahr durch Vandalismus dar, dem E-Scooter häufig ausgesetzt sind. Diese Handlungen führen zu erheblichen Schäden und beeinträchtigen die Langlebigkeit der Geräte (Gössling, 2020). Entsprechend muss ein detaillierter Fokus auf den End-of-Use (EoU) dieser Fahrzeuge gelegt werden, um zu prüfen, inwiefern eine Kreislaufführung des Gesamtprodukts oder einzelner Komponenten die Umweltwirkung des Gesamtsystems verringern kann.

1.2 Zielsetzung

Innovative Mobilitätskonzepte wie E-Scooter gewinnen zunehmend an Bedeutung für die urbane Fortbewegung. Die kurze Lebensdauer dieser Fahrzeuge stellt jedoch Herausforderungen in den Bereichen Batteriemangement, Recycling und Entsorgung dar. Ziel des Projekts ist es, einen Ansatz zu entwickeln, der sowohl die Kreislaufführung von E-Scootern als auch die Nachhaltigkeit von Mikromobilitätssystemen verbessert. Das Projekt umfasst eine Potenzialanalyse in Zusammenarbeit mit E-Scooter-Herstellern und -Betreibern, um zukünftige Forschungsaktivitäten gezielt zu steuern. Ein Bewertungskonzept wird entwickelt, um die Eignung einzelner Komponenten der Produktarchitektur eines Modells für verschiedene Kreislaufstrategien zu untersuchen. Zudem werden alternative Anwendungsfälle und notwendige Aufbereitungsprozesse identifiziert, um eine erfolgreiche Rückführung in die Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen. Dies liefert einen Überblick über den aktuellen Stand der Kreislauffähigkeit und gibt Handlungsempfehlungen für die Produktentwicklung künftiger Rollergenerationen. Zusätzlich wird ein Konzept für ein Prognosemodell der zukünftigen Rücklaufmengen in Baden-Württemberg erstellt und Anforderungen an die rückwärtsgerichtete Lieferkette definiert. Der sich wandelnde regulatorische Rahmen, insbesondere bezüglich der Lithium-Ionen-Batterien (LIB), wird ebenfalls berücksichtigt. Parallel dazu erfolgt eine systematische Literaturanalyse, um

Aussagen über die ökologische Vorteilhaftigkeit der Kreislaufführung von E-Scootern zu treffen und Optimierungspotenziale zu identifizieren.

1.3 Vorgehen

Das Projekt gliedert sich in fünf inhaltliche Arbeitspakete. Abbildung 1 zeigt die Projektstruktur. Das Vorgehen orientiert sich an den Lebenszyklusphasen von E-Scootern, wobei zwei der vier Phasen, nämlich die Konzeptionsphase sowie die End-of-Use (EoU)-Phase, im Fokus stehen. Dies wird damit begründet, dass anhand dieser eine erste fundierte produktspezifische Abschätzung über die Sinnhaftigkeit einer Kreislaufführung abgeleitet werden kann. Die hierfür entsprechend notwendigen Informationen werden im Rahmen der nachfolgend beschriebenen Arbeitspakete erarbeitet. Weitere Befähiger einer Kreislaufwirtschaft, die u.a. der Herstellungs- und Nutzungsphase zuzuordnen sind, sollen erst dann im Detail untersucht und ausgearbeitet werden, wenn in einer ersten Analyse ein Nutzenpotenzial nachgewiesen wurde. Dieser erste Schritt soll durch das beantragte Projekt geleistet werden.

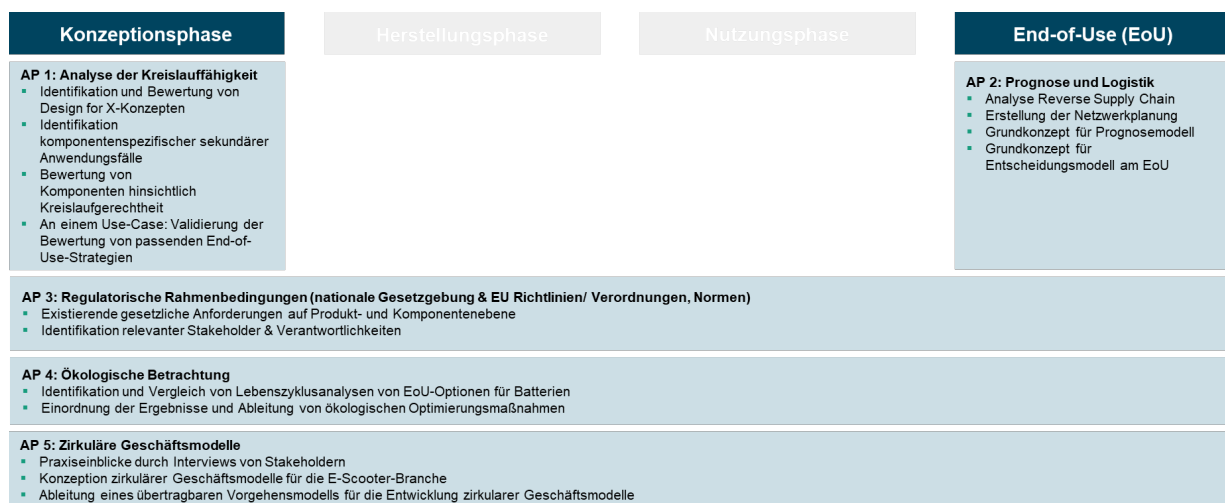


Abbildung 1: Projektstruktur aufgeteilt nach Arbeitspaketen

Die angestrebten Ergebnisse jedes Arbeitspakets sind nachfolgend skizziert:

1. Analyse der Kreislauffähigkeit: Auf Basis einer allgemeinen Definition von "Design for Circular Economy" (DfCE) wird eine Bewertungsmetrik zur Evaluation der Kreislaufgerechtigkeit von Bauteilen entwickelt.
2. Prognose und Logistik: Die Rückwärtslogistik von E-Scootern wird umfassend analysiert, wobei auch die logistischen Anforderungen in der Netzwerkplanung definiert, ein Prognosemodell für zukünftige Rückläufer entwickelt und ein Grundkonzept für ein Entscheidungsmodell am Ende des Lebenszyklus erstellt werden.
3. Regulatorische Rahmenbedingungen: Alle relevanten gesetzlichen Anforderungen werden vollständig analysiert und dokumentiert. Zudem werden die beteiligten Stakeholder identifiziert und ihre Verantwortlichkeiten definiert.
4. Ökologische Betrachtung: Auf Grundlage durchgeführter Ökobilanzen werden ökologische Optimierungspotenziale identifiziert, und eine Vorgehensweise zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit verschiedener Studien wird entwickelt.
5. Entwicklung zirkulärer Geschäftsmodelle: Es werden zirkuläre Geschäftsmodelle für die E-Scooter-Branche konzipiert und ein allgemein übertragbares Vorgehensmodell für deren Entwicklung abgeleitet

2 Konzept zur Bewertung der Kreislaufgerechtigkeit in den frühen Phasen der Produktentwicklung

2.1 Übergeordnetes Ziel des Arbeitspakets

Das Ziel von Arbeitspaket 1 war der Entwurf einer Methode zur Bewertung der Kreislaufgerechtigkeit von Produkten in den frühen Phasen der Produktentwicklung. Abbildung 2 zeigt die grafische Darstellung der Vorgehensweise zur Erreichung:



Abbildung 2: Methodische Vorgehensweise innerhalb Arbeitspaket 1

Für die Bewertung von Kreislaufgerechtigkeit ist die Definition und das Wissen über Kreislaufgerechtigkeit eine notwendige Basis. Als Grundlage wurden in der Literatur existierende „Design for X“-Merkmale (DfX) kreislaufgerechter Produkte herangezogen. Hierfür wurde zu Beginn eine ausführliche Literaturrecherche zur Identifikation aller relevanten Produktmerkmale in Bezug auf die Kreislaufgerechtigkeit durchgeführt. Um diese für eine spätere Bewertung nutzen zu können, mussten die Merkmale hinsichtlich des Anwendungsbereichs, des Konkretisierungsgrads und vorhandener Überschneidungen konsolidiert werden. Anschließend fand die Zuordnung der Merkmale zu Kreislaufstrategien statt. Auf Basis der vorangegangenen Arbeitsschritte wurde der Entwurf einer Bewertungsmethode ausgearbeitet. Die Basis der Methode bildet dabei das Vorgehen innerhalb des Quality Function Deployments (QFD) (Hering & Schloske, 2022). Die Methode wurde abschließend am Beispiel des Scooter-Akkus auf Durchführbarkeit evaluiert.

2.2 Recherche zu Produktmerkmalen von Kreislaufgerechtigkeit

Aufgrund der in der Literatur bereits ausführlich erforschten Merkmale kreislaufgerechter Produkte (zumeist im Rahmen von „DfX“-Ansätzen) wurden diese der Definition von Kreislaufgerechtigkeit zu Grunde gelegt. Kreislaufgerechtigkeit beschreibt demnach die Summe und den Erfüllungsgrad relevanter kreislaufgerechter Produktmerkmale.

Allerdings fehlte die ganzheitliche Zusammenfassung unterschiedlicher DfX-Ansätze über verschiedene kreislaufwirtschaftliche Anwendungsbereiche und Autoren hinweg. Für die umfassende Sammlung von für die Kreislaufwirtschaft relevanten Produktmerkmalen wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Die Recherche hatte das Ziel, vorhandene Sammlungen von Merkmalen zu finden. Die Ableitung eigener DfCE-Merkmale auf Basis der Literatur fand im Rahmen der Untersuchung nicht statt.

Die Recherche wurde in englischer Sprache innerhalb der beiden Forschungsdatenbanken Scopus und Web of Science durchgeführt. Der verwendete Suchbegriff setzte sich aus Synonymen für „Richtlinie“ sowie mit Kreislaufwirtschaft in Verbindung gebrachte Begriffe zusammen:

Zusammengesetzter Suchbegriff:

("design for" OR "design guideline") AND ("circularity" OR "circular economy" OR disassembl* OR reassembl* OR remanufaktur* OR repurpos* OR reus* OR repair OR refurbish* OR recycl* OR

"end-of-life" OR "end of life")

Mit der Einschränkung auf Beiträge der letzten 6 Jahre ließen sich so ca. 3000 Treffer identifizieren, die im darauffolgenden auf Relevanz überprüft wurden. Dabei wurde ein dreistufiges Ausschlussverfahren angewendet, bei dem in der ersten Stufe Titel und Keywords, in der Zweiten das Abstract und in der Dritten der gesamte Inhalt überprüft wurden. Schlussendlich konnten folgende DfCE-Sammlungen (Tabelle 1) identifiziert werden, die mit Kreislaufgerechtigkeit in Verbindung gebracht werden konnten:

Tabelle 1 Recherchierte DfCE-Sammlungen

Quelle	Titel
Albæk et al., 2020	<i>Circularity evaluation of alternative concepts during early product design and development</i>
Belli & Quella, 2021	<i>Ecodesign, Design for Reuse</i>
Berwald et al., 2021	<i>Design for circularity guidelines for the EEE sector</i>
Bovea & Pérez-Belis, 2018	<i>Identifying design guidelines to meet the circular economy principles: A case study on electric and electronic equipment</i>
Lascurain et al., 2019	<i>Identification of key aspects of circular economy for inclusion in life cycle design</i>
Favi et al., 2019	<i>A design for disassembly tool oriented to mechatronic product de-manufacturing and recycling</i>
Gullo & Dixon, 2021	<i>Design for Maintainability</i>
Hilton & Thurston, 2019	<i>Design for remanufacturing</i>
Kang et al.	<i>Design of household appliances considering remanufacturing: a case study</i>
Leal et al., 2020	<i>Design for and from recycling: A circular ecodesign approach to improve the circular economy</i>
Ortner et al., 2022	<i>Computational optimization for circular economy product design</i>
Shahbazi & Jonbrink, 2020	<i>Design Guidelines to Develop Circular Products: Action Research on Nordic Industry</i>
Tischner & Hora, 2019	<i>Sustainable electronic product design</i>
Zhang et al., 2019	<i>Identification of product's design characteristics for remanufacturing using failure modes feedback and quality function deployment</i>

Insgesamt konnten ca. 200 unabhängige DfCE-Merkmale festgestellt werden, die im weiteren Verlauf des Arbeitspakets als Grundlage dienen.

2.3 Design for Circular Economy

Im Folgenden wird die Herleitung einer Definition für Kreislaufgerechtigkeit („Design for Circular Economy“) dargestellt.

2.3.1 Ableitung von übergeordneten Kategorien und Definition von Design for Circular Economy

Die Recherche der DfCE-Merkmale zeigte insbesondere, dass der Konkretisierungsgrad über die recherchierten Sammlungen, aber auch innerhalb einzelner Sammlungen, eine Diskrepanz aufweist, die es schwierig macht, Merkmale zu vergleichen und logisch zu verknüpfen. So reichten die DfCE-Merkmale von spezifischen Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Verwendung bestimmter Kunststoffe bis hin zu sehr allgemeinen Produkteigenschaften wie einer Modularität jedoch ohne einen Hinweis zur genauen Umsetzung. Abbildung 3 zeigt eine schematische Kategorisierung der Merkmale nach dem Konkretisierungsgrad:

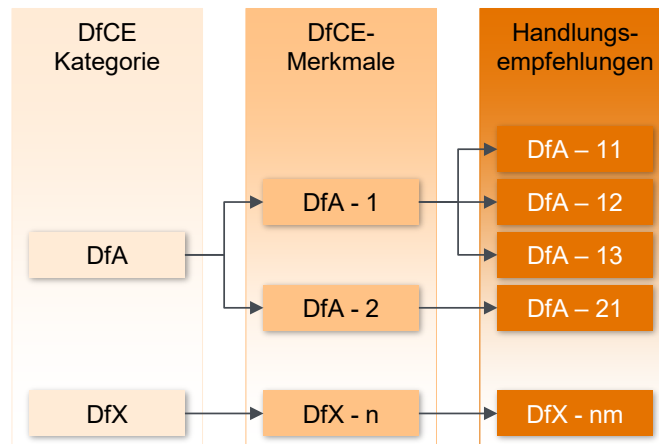


Abbildung 3: Kategorisierungsansatz der DfCE-Merkmale

Die Kategorien wurden dabei anhand der recherchierten Merkmale festgelegt. Hierzu wurden im ersten Schritt konkrete Handlungsempfehlungen aus den recherchierten Merkmalen extrahiert. Diese wurden als konkrete Anweisungen zur Umsetzung übergeordneter DfCE-Merkmale verstanden. Die verbleibenden Merkmale wurden anschließend nach festgestelltem logischem Zusammenhang in eine von den Merkmalen abgeleitete übergeordnete „DfCE“-Kategorie und in konkretere DfCE-Merkmale eingeteilt. Letzteren wurden abschließend jeweils die zuvor extrahierten Handlungsempfehlungen zugeteilt.

Tabelle 2 Beispiel für die Kategorisierung der DfCE-Merkmale

DfCE-Kategorie	DfCE-Merkmal	Handlungsempfehlung
Design für Trennbarkeit	Vermeidung permanenter Fixierung	Vermeidung von Klebeverbindungen Vermeidung von Schweißverbindungen
	Vermeidung permanenten Materialeinschlusses	Vermeidung von in Kunststoff gegossene Metallteile Vermeidung Guss-Verbundteilen aus verschiedenen Materialien ...
	Verwendung von Standard-Materialien	...
Design für Standardisierung	Verwendung standardisierter Verbindungselemente	Verwendung von Schrauben mit den gleichen Abmessungen Verwendung genormter Schrauben

So konnte unter den Merkmalen eine nach logischem Zusammenhang und Konkretisierungsgrad hierarchische Struktur etabliert werden. Tabelle 2 illustriert die Struktur anhand eines konkreten Beispiels. Die vollständige Einteilung ist in Anhang 9.1 zu finden.

2.3.2 Zuordnung von Merkmalen und Kreislaufstrategien

Bei Sammlungen die allgemeine Gestaltungsmerkmale für kreislaufgerechte Produkte zusammentragen (Albæk et al., 2020; Berwald et al., 2021; Ortner et al., 2022; Shahbazi & Jonbrink, 2020) ist eine Zuordnung der Merkmale zu detaillierten Kreislaufstrategien zumeist gegeben. Jedoch ist häufig keine eindeutige Zuordnung von einem spezifischen Merkmal zu einer spezifischen Kreislaufstrategie möglich. Am Beispiel von „Design for Separability“ wird deutlich,

dass Merkmale dieser DfCE-Kategorie auf alle Strategien zutreffen, die eine Trennung von Bauteilen oder Materialien vorsehen. Entsprechend mussten spezifischere Sammlungen, die auf die Umsetzung spezieller Kreislaufstrategien ausgerichtet sind, auf die Eignung für weitere Kreislaufstrategien geprüft und zugeordnet werden. Aufgrund des hierdurch entstehenden komplexen Zusammenhangs zwischen Merkmalen und Kreislaufstrategien erschien die Zuordnung innerhalb einer Matrix zielführend. Abbildung 4 zeigt die schematische Zuordnung:

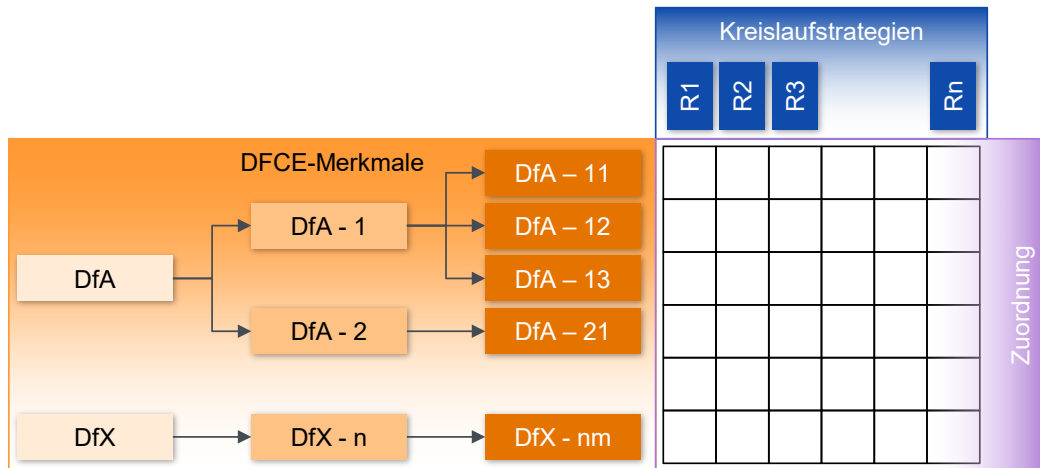


Abbildung 4: Zuordnungsmatrix von DfCE-Merkmalen und Kreislaufstrategien

Als Grundlage der Kreislaufstrategien dient das Rahmenwerk von Blomsma et al. (2019), welches auf den etablierten "R-Strategien" nach Kirchherr et al. (2017) basiert, diese jedoch feingliedriger darstellt und somit eine differenziertere Zuordnung zu Strategien innerhalb der Kreislaufwirtschaft zulässt. Die vollständige Zuordnung ist in Anhang 9.1 zu finden.

2.3.3 Definition von Design for Circular Economy

Aufgrund des stark vernetzten Zusammenhangs zwischen Gestaltungsmerkmalen und Kreislaufstrategien, ist eine eindeutige Zuordnung von bestimmten Merkmalen zu bestimmten Strategien und somit eine simple Definition der Kreislaufgerechtigkeit von Produkten nicht möglich. Hervorzuheben ist, dass eine Verknüpfung von DfCE-Merkmalen und Kreislaufstrategien zu meist auf dem Konkretisierungsgrad der übergeordneten DfX-Kategorie stattfindet. In wenigen Fällen ändert sich die Zuordnung innerhalb der DfCE-Merkmale in der Ebene darunter. Für eine Definition der Kreislaufwirtschaft sind daher nur die übergeordneten DfX-Kategorien von Bedeutung. Die Zuordnung innerhalb der Matrix stellt daher die Definition von Kreislaufgerechtigkeit basierend auf DfCE-Merkmalen dar und kann im weiteren Verlauf als solche für die Bewertung der Kreislaufgerechtigkeit hinsichtlich unterschiedlicher Kreislaufstrategien genutzt werden.

2.4 Entwicklung eines Methodenkonzepts

2.4.1 Anforderungsableitung aus Interviews

Die zu Verfügung stehenden Interviewpartner stellten keine konkreten Anforderungen an eine Bewertungsmethode. Jedoch wurden zu bewertende Produktmerkmale genannt, die mit den in der Literatur gefundenen DfCE-Merkmalen verglichen werden konnten. Alle genannten Merkmale konnten in der recherchierten Sammlung wiedergefunden werden.

2.4.2 Methodenkonzept

Mithilfe der in Produktmerkmale manifestierten Kreislaufgerechtigkeit können nun Bauteile von E-Scootern durch einen Soll/Ist-Abgleich (DfCE-Merkmale/Ausprägung im jeweiligen Bauteil) hinsichtlich der Kreislaufgerechtigkeit der Gestaltung bewertet werden. Durch die Einteilung der

Merkmale ist eine Bewertung in frühen sowie späteren Phasen der Produktentwicklung möglich. Da sich die DfCE-Merkmale auf einer konzeptionellen Abstraktionsebene befinden, können sie in den frühen Phasen zur Bewertung von Produktkonzepten verwendet werden. In späteren Phasen, in denen das Produkt und Bauteile detaillierter entworfen sind, kann von der Gegenüberstellung mit DfCE-Merkmalen zu einer Gegenüberstellung mit Handlungsempfehlungen übergegangen werden, um so die Bewertung weiter zu konkretisieren. Abbildung 5 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Bewertungsmethode. Der Methodenentwurf basiert grundsätzlich auf einem „House of Quality“ (HoQ), das ein Teil des QFDs (Hering & Schloske, 2022) darstellt und für die Gegenüberstellung von Anforderungen („Was?“) und technischen Merkmalen im Produkt („Wie/Wodurch?“) verwendet wird. Der ursprüngliche Ansatz stellt Abhängigkeiten zwischen dem „Was“ und dem „Wie“ heraus. Allerdings wird die Vergleichsmatrix innerhalb der erarbeiteten Methode als Indikator für die Erfüllung verwendet. So kann untersucht werden, zu welchem Grad ein gegebenes Bauteil (technische Merkmal) eine gegebene Anforderung (Kreislaufgerechtigkeit in Form von DfCE-Merkmalen) erfüllt. Die Beurteilung der Wechselwirkung zwischen einzelnen Bauteilen hilft darüber hinaus bei der Abschätzung von Anpassungsaufwänden bei der Optimierung einzelner Bauteile.

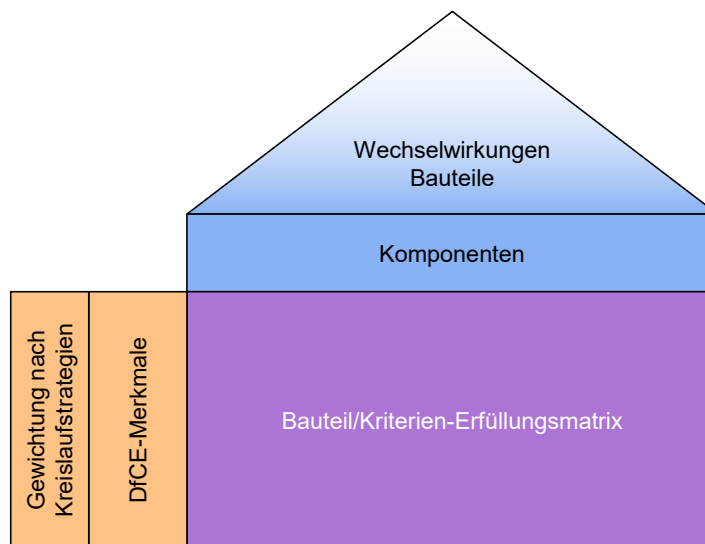


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Methodenansatzes (HoQ)

Die gezielte Bewertung der Gerechtigkeit für einzelne R-Strategien wird durch das Einsetzen der für die jeweilige Strategie relevanten DfCE-Merkmale (Kenntnis darüber aus der Zuordnungsmatrix (siehe Kapitel 2.3) möglich.

Die Methode zeigt eine allgemeine Gerechtigkeit bzgl. einer gewählten R-Strategie aber indiziert zusätzlich auch, welche DfCE-Merkmale Optimierungspotenzial aufweisen. Über die verknüpften Handlungsempfehlungen zu unterschiedlichen Merkmalen können so auch konkrete Hinweise auf die Verbesserung der Gerechtigkeit gewonnen werden.

Ein detaillierter Leitfaden zur Anwendung der Methode findet sich in Anhang 9.1.

2.5 Evaluation des Methodenkonzepts am Beispiel einer E-Scooter-Batterie

Im Rahmen des Arbeitspakets fand abschließend eine Evaluation der allgemeinen Anwendbarkeit des Bewertungskonzepts statt. Hierfür wurden Komponenten einer E-Scooter-Batterie mit dem Bewertungskonzept auf Kreislaufgerechtigkeit untersucht. Als Basis diente der E-Scooter M 365 von Xiaomi.

Anhand eines Videos der Wartung der Batterie (Well Done Tips, 2018) konnten alle Komponenten, die im Zusammenhang mit der Batterie stehen identifiziert und in das Bewertungsschema (siehe Anhang 9.1) eingetragen werden. Hierbei wurde die Gesamt-Baugruppe „Bat-

terie“ in die jeweils kleinsten sinnvollen Komponenten unterteilt. Ebenso war die Identifikation der jeweiligen verwendeten Fügeverfahren bzw. Verbindungstechniken durch das Video möglich.

Abbildung 6 zeigt eine schematische Darstellung der Komponenten:

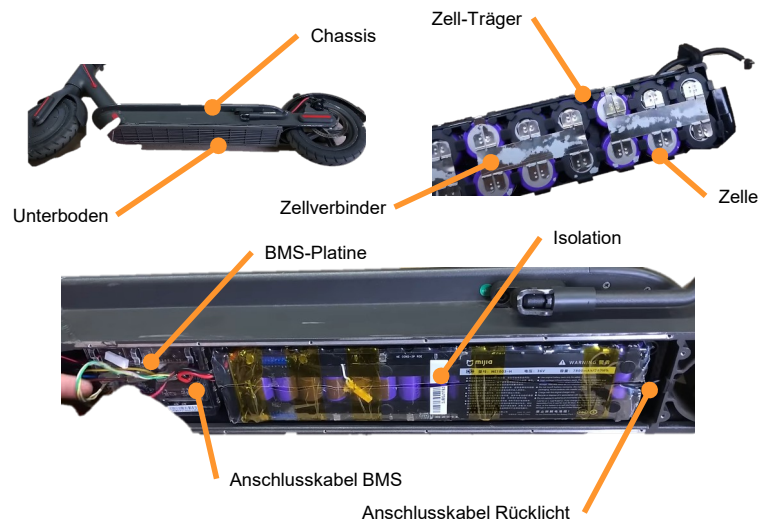


Abbildung 6: Bewertete Bauteile der E-Scooter-Batterie; entnommen aus Well Done Tips, 2018

Die Durchführung des Methodenkonzepts im Rahmen der Evaluation ergab folgende Erkenntnisse zur Anwendung:

Die Nichtberücksichtigung bestimmter DfCE-Merkmale für betrachtete Komponenten muss beachtet werden, um eine Bewertung nicht fälschlich zu beeinflussen. So kann sichergestellt werden, dass einzelne Bauteile auch nur anhand entsprechender DfCE-Merkmale beurteilt werden. DfCE-Merkmale, die das Zusammenspiel einzelner Bauteile innerhalb einer Baugruppe betreffen, dürfen vice versa auch nur mit diesen verglichen werden. Weiterführend betreffen einige Merkmale das Gesamtprodukt, weswegen sich die getrennte Betrachtung zu der der einzelnen Komponenten anbietet. Darüber hinaus sind manche Merkmale nur für manche Komponentengruppen relevant. Ein Beispiel hierfür ist die Umsetzung eines zeitlosen Designs innerhalb nicht sichtbarer Komponenten. Im Anwendungsbeispiel der Komponenten der E-Scooter-Batterie, die sich fast ausschließlich an für den Nutzer und Nutzerin nicht sichtbaren Stellen befindet, kann dieses DfCE-Merkmal für einer Bewertung vernachlässigt werden.

Es sollten nur die DfCE-Merkmale beurteilt werden, zu denen auch die dafür benötigten Informationen vorliegen. Beispielsweise konnte der Einsatz von Rezyklaten in Komponenten in der Produktgestaltung innerhalb des Projekts ohne Kenntnis über die genaue Materialauswahl nicht beurteilt werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass durch die generalistische Sammlung von DfCE-Merkmalen die Umsetzung eines jeweiligen Merkmals in einer jeweiligen Komponente hinterfragt und auf Sinnhaftigkeit überprüft werden sollte. Bei der Entwicklung einer gesamtheitlichen Bewertungsmethode muss die Integration einer zielgerichteten Gegenüberstellung von passenden DfCE-Merkmalen zu Baugruppen und Bauteilen vorgesehen werden, um die verwechslungssichere Anwendung, auch von fachfremden Anwendern, garantieren zu können. Die gemeinsame Durchführung des Evaluationsbeispiels im Projektteam bestätigte darüber hinaus jedoch eine verständliche Anwendbarkeit.

3 Prognose und Logistik

Im Rahmen von Arbeitspaket 2 werden die im Anschluss einer Nutzungsphase von Produkten die Wiederverwendbarkeit oder -wertbarkeit der verschiedenen Komponenten und Materialien betrachtet. Hierfür wurde die Reverse Supply Chain mit den relevanten Akteuren näher untersucht.

3.1 Identifikation der beteiligten Akteure in der Reverse Supply Chain

Im Folgenden werden zunächst die verschiedenen Akteure mit ihrer Beziehung zu den anderen Akteuren in einem Netzwerk aus der logistischen Perspektive näher beschrieben.

Zulieferer: Die Tier-1 Zulieferer liefern dem E-Scooter Hersteller die erforderlichen Komponenten für die Produktion von E-Scootern. Dazu gehören Komponenten wie Batterien, Motoren und Gehäuse. Die Tier-2 Zulieferer dagegen liefern dem Komponentenhersteller, die für die Produktion der Komponenten notwendigen Materialien (Spath et al., 2017). (Gutberlet, 2016). Ziel ist es, wertvolle Rohstoffe zurückzugewinnen und die Umweltbelastung durch fachgerechte Entsorgung der E-Scooter zu minimieren

Hersteller: Ein Hersteller ist gemäß Gesetz die Person oder das Unternehmen, das ein Endprodukt, einen Grundstoff oder ein Teilprodukt herstellt oder sich durch das Anbringen seines Namens, seiner Marke oder eines anderen unterscheidungskräftigen Kennzeichens als Hersteller ausgibt. Im Kontext der Batterieverordnung (BattVO) ist der Hersteller auch verantwortlich für das gewerbsmäßige erstmalige Inverkehrbringen von Batterien (BattVO, 2023). Darüber hinaus fertigen Hersteller beispielsweise E-Scooter für Händler und Mobilitätsanbieter und übernehmen im Rahmen von Garantie- und Gewährleistungsansprüchen die Rücknahme und Reparatur defekter Geräte.

Händler: Ein Händler ist nach § 14 BGB (BGB, 1896) eine natürliche oder juristische Person, die im Rahmen ihrer gewerblichen oder selbstständigen beruflichen Tätigkeit, Waren oder Dienstleistungen auf eigene oder fremde Rechnung kauft, verkauft oder vermittelt. Im Kontext von E-Scootern erhält er die Fahrzeuge vom Hersteller und vertreibt diese. Im Falle eines Reparaturbedarfs ist er nach §§ 437, 438 BGB (BGB, 1896) zur Rücknahme verpflichtet und bringt die Ware im Rahmen der Gewährleistung zum Hersteller zurück.

Werkstätten: Werkstätten bieten primär Reparaturen für Mobilitätsalternativen wie Fahrräder und E-Bikes an. Derzeit gibt es jedoch keine spezialisierten Werkstätten, die sich ausschließlich auf E-Scooter konzentrieren. Aktuell übernehmen verschiedene Fahrradwerkstätten auch die Reparatur von E-Scootern. Die zu reparierenden E-Scooter erhalten sie von Endkunden, Händlern sowie von Gemeinden und Kommunen.

Mobilitätsanbieter: Die Mobilitätsanbieter bzw. Sharinganbieter stellen E-Scooter gegen Entgelt zur öffentlichen Nutzung bereit. Darüber hinaus sind sie für den Betrieb, die Wartung und die Verwaltung der E-Scooter verantwortlich (Lime, 2024). Sie arbeiten mit Werkstätten zusammen, um Wartung und Reparaturen durchzuführen.

Logistikdienstleister: Die Logistikdienstleister sind für den gefahrlosen Transport von E-Scootern, Komponenten und Werkstoffen sowie für alle zugehörigen Umschlag-, Lager- und Informationsprozesse verantwortlich (Tempelmeier, 2018). In der Rückführlogistik ist er für die Rücknahme der Produkte, Materialien oder Verpackungen vom jeweiligen Kunden verantwortlich. Aufgrund des Gefahrguts Batterie gelten für sie besondere Anforderungen im Bereich der Verpackung, Lagerung und des Transports. Für den Transport gelten je nach Transportmittel dabei folgende Richtlinie (ZVEI: Die Elektroindustrie, 2020):

- Straße/Schiene: Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route (ADR)

- Seefracht: International Maritime Dangerous Goods Code (IMDG)
- Luftfracht: International Air Transport Association Dangerous Goods Regulations (IATA DGR)

Recycler: Recycler sind dafür verantwortlich, E-Scooter und deren Komponenten am Ende ihrer Lebensdauer zu sammeln, zu zerlegen und umweltgerecht zu recyceln. Sie trennen Materialien, wie Batterien, Metalle und Kunststoffe und sorgen für deren fachgerechte Wiederaufbereitung oder Entsorgung (Gutberlet, 2016). Das Hauptziel besteht darin, wertvolle Rohstoffe zurückzugewinnen und die Umweltbelastung durch die sachgerechte Entsorgung der E-Scooter zu minimieren. Im E-Scooter-Kontext lassen sich Recycler in zwei Gruppen einteilen: Batterierecycler, die sich auf das Recycling von Batterien spezialisieren, und Altgeräterecycler, die für die Entsorgung der restlichen Komponenten zuständig sind.

Entsorgungsträger: Entsorgungsträger sind nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz öffentlich-rechtliche Körperschaften, die für die Entsorgung von Abfällen verantwortlich sind. Sie haben die Pflicht, die in ihrem Gebiet anfallenden und überlassenen Abfälle aus privaten Haushalten sowie Abfälle zur Beseitigung aus anderen Herkunftsbereichen zu verwerten oder zu beseitigen. Darüber hinaus kooperieren sie mit Rücknahmesystemen gemäß § 5 BattVO, 2023 indem sie Sammelstellen an Wertstoffhöfen bereitstellen oder die Entsorgungslogistik unterstützen. Im Kontext von E-Scootern arbeiten sie beispielsweise mit Rücknahmesystemen für Batterien, verschiedenen Recyclingunternehmen, Wertstoffhöfen und der Entsorgungslogistik zusammen.

Gemeinden und Kommunen: Diese sind verantwortlich für die Regulierung, Integration und Verwaltung der Kreislaufwirtschaft, und in diesem Fall insbesondere für das Management von E-Scootern in einem bestimmten Gebiet. Zudem ist der Verkäufer von Elektrogeräten verpflichtet, alle zurückgenommenen Batterien ordnungsgemäß zu entsorgen. Daher unterstützen diese lokalen Behörden die entsprechenden Sammelsysteme und -stellen bei der Entsorgungslogistik, was in der Regel über eine Dienstleistung und Systeme wie die GRS oder anderen öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern erfolgt.

3.2 Definition von Up-/Recycling-Strukturen und Konzept für die Netzwerkplanung

In Tabelle 3 werden die verschiedenen Akteure sowie die notwendigen Transportmittel für das Sammeln von E-Scootern und Komponenten aufgelistet. Zusätzlich werden die Annahmerückforderungen und logistischen Anforderungen dargestellt. Bei den logistischen Anforderungen werden neben den logistischen Prozessen auch Regularien wie die neue Batterieverordnung (BattVO, 2023) sowie Sondervorschriften im Bereich Transport und Ergebnisse aus den Interviews mit verschiedenen Akteuren im Bereich E-Scooter herangezogen.

Tabelle 3: Darstellung der verschiedenen Akteure und ihrer logistischen Anforderungen

Akteur	Annahme von	Logistische Anforderungen	
Hersteller	Primär und Sekundärwerkstoffen	Supply Chain Transparenz: Kennzeichnung der Batterie mit Modellbezeichnung sowie Chargen-/Serien oder Produktnummer nach Artikel 38, 39, 41, 42, 45 & 46 BattVO, 2023	Herkunft der Materialien, Zusammensetzung, sowie Informationen über die Behandlungs- Recycling- und Verwertungsverfahren nach Artikel 77 und 78 BattVO, 2023 Bereitstellung von Informationen für Sicherheits- und

			Schutzmaßnahmen (auch am Arbeitsplatz), für die Lagerung und Sammlung von Altbatterien nach Artikel 62, 65 und 66 BattVO, 2023
Händler	E-Scooter, Ersatz- und Verschleißteile	Gewährleistung der Lagerungs- oder Beförderungsbedingungen von Batterien in ihrer Verantwortung nach Artikeln 6 bis 10 und 12, 13 und 14 BattVO, 2023	Sicherheits- und Schutzmaßnahmen (auch am Arbeitsplatz), für die Lagerung und Sammlung von Altbatterien nach Artikel 62, 65 und 66 BattVO, 2023
Gemeinden/ Kommunen	E-Scooter		Management von E-Scootern in einem bestimmten Gebiet
Kunden	E-Scooter	Einfache Entnahme der LV-Batterie während der Lebensdauer nach Artikel 11 BattVO, 2023	
Entsorgungsträger	Batterie	Rücknahmesystem für Altbatterien nach Artikel 5 BattVO, 2023 Koordination und Bereitstellung der Kapazitäten für Wertstoffhöfe	
Logistikdienstleister	E-Scooter, Ersatz- und Verschleißteile, Komponenten	Supply Chain Transparenz: Je nach Vereinbarung übernimmt er die Verantwortung vom Hersteller für die Kennzeichnung der Batterie mit Modellbezeichnung sowie Chargen-/ Serien oder Produktnummer nach Artikel 38, 39, 41, 42, 45 & 46 BattVO, 2023 UN 38.3-Test zur Prüfung, ob Lithium-Batterien und -Zellen gefahrlos versandt werden können. Je nach Vereinbarung übernimmt er Kennzeichnung von Lithium-Ionen-Batterien mit einer Nennenergie von mehr als 100 Wh als Gefahrgut der Klasse 9, einschließlich der Anbringung eines Gefahrgutlabels UN 3480 oder UN	Beachtung von Verpackungsvorschriften: Sonderverpackung bei Batterien > 100 KW und Gesamtgewicht von über 333 kg nach ADR Beachtung der Transportvorschriften (ZVEI: Die Elektroindustrie, 2020) <ul style="list-style-type: none"> • Straße/Schiene: ADR/ RID • Seefracht: IMDG-Code • Luftfracht: IATA DGR <p>Und die Einhaltung spezifischer Regelungen, wie z. B. Obergrenzen und den Umgang mit beschädigten Batterien.</p>

		3481 für Lithium-Ionen-Batterien (ZVEI: Die Elektroindustrie, 2020)	
Recycler	E-Scooter, Batterie, Werkstoffe	Angaben zu den Bestandteilen von Abfällen aus der Batterieherstellung und von Verbraucherabfällen nach Artikel 20 und 21 BattVO, 2023	Sicherheits- und Schutzmaßnahmen (auch am Arbeitsplatz), die für die Lagerung und Sammlung von Altbatterien nach Artikel 62, 65 und 66 BattVO, 2023 führt der Recycler den Transport selbst aus, sind die Regelungen für Logistikdienstleister ebenfalls zu beachten
Zulieferer	Komponenten, primäre- und sekundäre Werkstoffe	Unentgeltliche Bereitstellung aller notwendigen Informationen für Hersteller von Produkten mit den enthaltenen Batterien wie z. B. Rezyklatgehalt nach Artikel 8 BattVO, Beifügen von technischen Unterlagen und Angabe zur enthaltenen Menge an diesen rückgewonnenen Stoffen, Kennzeichnungspflicht nach Artikel 38, 39, 41, 42, 45 & 46 BattVO, 2023	Batterien für leichte Verkehrsmittel (gekapselt, max. 25 kg) Standardisierung von Packs/Batterien Supply Chain Transparenz, Kennzeichnung der Batterie mit Modellbezeichnung sowie Chargen-/Serien oder Produktnummer nach Artikel 38, 39, 41, 42, 45 & 46 BattVO, 2023 Zugang zum Batteriemanagementsystem (BMS) nach Artikel 14 BattVO, 2023 Eignungsprüfung
Werkstätte	E-Scooter, Ersatz- und Verschleißteile	Zugang zum BMS nach Artikel 14 BattVO, 2023	
Werkstoffhersteller	Rezyklate	Mindestrezyklatgehalt nach Artikel 8 BattVO, 2023	
Mobilitätsanbieter	E-Scooter, Ersatz- und Verschleißteile	Flottenmanagement für die Bereitstellung der Services Beachtung von Verpackungsvorschriften: Sonderverpackung bei Batterien > 100 kW und Gesamtgewicht von über 333 Kg nach ADR (ZVEI: Die Elektroindustrie, 2020)	Beachtung der Transportvorschriften (ZVEI: Die Elektroindustrie, 2020) <ul style="list-style-type: none"> • Straße / Schiene: ADR/ RID • Seefracht: IMDG-Code • Luftfracht: IATA DGR <p>Und die Einhaltung spezifischer Regelungen, wie z. B. Obergrenzen und den Umgang mit beschädigten Batterien.</p>

In Abbildung 7 sind die einzelnen Akteure in einem E-Scooter-Wertschöpfungsnetzwerk mit den verschiedenen Re-/Upcycling-Strukturen sowie mit den verschiedenen Waren- und Informationsströmen dargestellt. Die Verbindungen führen jeweils direkt zum nächsten Akteur, wobei einzelne Pfade in bestimmten Fällen übersprungen werden können.

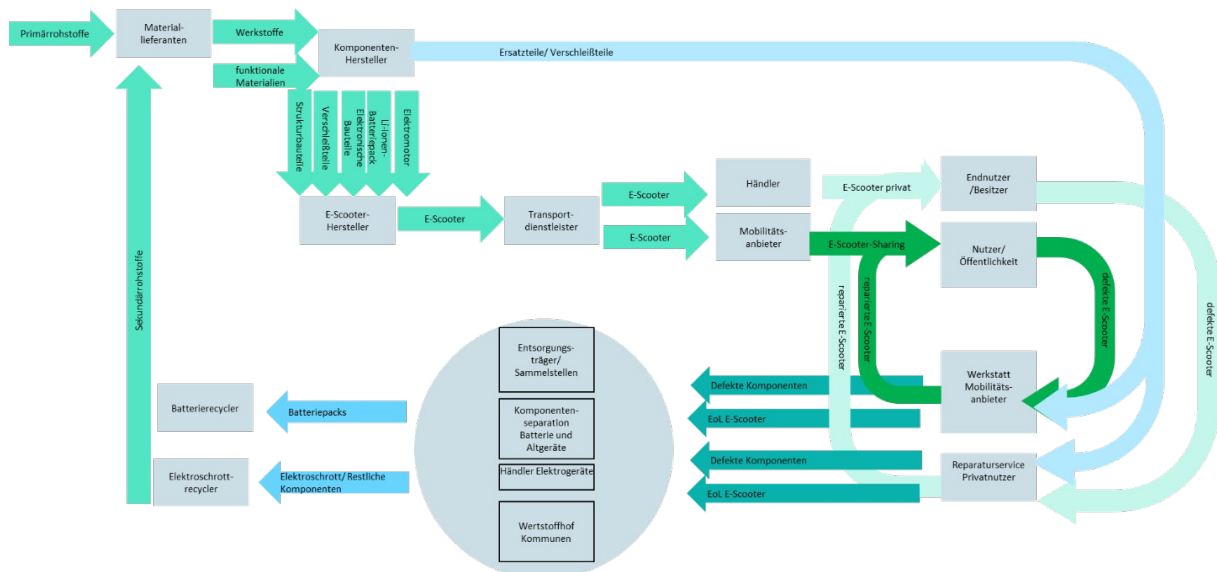


Abbildung 7 Netzwerk mit allen relevanten Akteuren

Auf Grundlage einer Literaturrecherche, sowie von Experteninterviews können verschiedene Up-/Recycling-Strukturen abgeleitet werden. Produktrecycling beschreibt alle Recyclingverfahren zur Werkstück- und Werkstoffrückgewinnung aus genutzten Produkten (Steinborn, 2011). Recycling wird dabei als der Prozess zur Wiederaufbereitung von Werkstoffen und Produkten zu einem neuen Produkt verstanden (Martens, 2011). Upcycling dagegen bedeutet, einen bestimmten Werkstoff oder ein Produkt - z. B. die Bauteile und Komponenten, Wieder und weiterzuverwenden. Das entstandene Produkt oder der Werkstoff unterscheiden sich dabei vom ursprünglichen Produkt (Foss, 2023).

Es empfiehlt sich, aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen der Komponenten im Up-/Recycling, aus logistischer Sicht folgende Strukturen für das Recycling von E-Scootern zu berücksichtigen. Es ist anzumerken, dass derzeit keine Strukturen für das Up-/Recycling von E-Scootern existieren. Daher kann als Beispiel das E-Bike herangezogen werden.

- **Recycling des E-Scooters:** Der E-Scooter wird in seine Einzelteile zerlegt, um die verschiedenen Materialien zu trennen und zu recyceln (SUPER73 Europe, 2024). Beispielsweise wird das Fahrgestell anschließend eingeschmolzen. Elektrische Komponenten wie der Elektromotor werden recycelt, um Metalle zurückzugewinnen. Die Batterie wird analog zu einem E-Bike fachgerecht entsorgt, um seltene und wertvolle Metalle wie Lithium, Nickel und Kobalt zurückzugewinnen (Barzel, 2014). Aufgrund der erhöhten Brandgefahr beim Schreddern eignen sich hierbei nur Batterien, die entnehmbar sind. Günstigere E-Scooter werden am Ende ihrer Lebensdauer häufig als Elektroschrott behandelt, daher bietet es sich an, die Rückgabe für den Kunden zu erleichtern. Zudem ist erkennbar, dass der Transport zwischen Konsumenten und Recycler bzw. Entsorgungsträgern nicht zusammengefasst, sondern meist einzeln durch den Konsumenten, geschieht. Folglich resultiert eine höhere Verkehrsbelastung und deren damit verbundenen Probleme, wie Luftbelastung und Lärmemissionen.
- **Recycling von Batterien:** Die Batterien in E-Scootern können separat gesammelt und recycelt werden. Beispielsweise sind aktuell 50 bis 70 % der einzelnen Bestandteile von Akkus in E-Bikes wiederverwendbar (pedelec-elektro-fahrad.de, 2024). Durch Erfüllung der Voraussetzungen wie z. B. Standardisierung, einfache Entnahme etc. kann für E-Scootern ein vergleichbarer Grad erreicht werden.

- Recycling von Elektromotoren: Elektromotoren enthalten wertvolle Metalle wie Kupfer, Aluminium, Stahl und Magnete. Diese können beim Recycler demontiert und anschließend recycelt werden (Industr.com, 2024).

Für das Upcycling von E-Scootern empfehlen sich dagegen folgende Strukturen:

- Weiter- und Wiederverwendung: Alte E-Scooter können durch neue Komponenten wie Motoren, Batterien oder Räder können durch einen geringen Aufbereitungsaufwand wieder in den Warenkreislauf zurückgeführt werden. Dadurch kann die Lebensdauer einzelner Teile verlängert werden (Kaufmann, 2002).
- Hierbei können auch fortschrittliche Methoden, wie die additive Fertigung und Refabrikation eingesetzt werden (M. Leuenberger & R. Frischknecht, 2010). Im Rahmen des Projekts wurde festgestellt, dass derzeit nur eine geringe Anzahl an Fahrradwerkstätten Reparaturen für E-Scooter anbietet. Mobilitätsanbieter hingegen verfügen entweder über eigene Werkstätten oder arbeiten in Kooperationen für die Reparatur von E-Scootern. Zudem existieren im Gegensatz zu E-Bikes oder Batterien keine geeigneten Strukturen für die Sammlung von E-Scootern. Aus logistischer Sicht kann dies beispielsweise, wie in Abbildung 8 dargestellt, durch ein Re-/Upcycling-Hub im urbanen Raum, wie etwa in Stuttgart, oder durch ein Netz von Werkstätten realisiert werden, da hier die meisten E-Scooter zu finden sind (Tagesschau, 2024). Dadurch werden die Privatnutzer und PrivatnutzerInnen vom Eigentransport entlastet. Darüber hinaus können Transportfahrten bzw. Fahrten zur Sammlung von E-Scootern reduziert werden. Der Service lässt sich zudem im Rahmen des Mobilitätshubs mit anderen Fortbewegungsmitteln, wie dem E-Bike, kombinieren. Darüber hinaus eignen sich nur E-Scooter der höheren Preiskategorie, aufgrund der besseren Qualität und der längeren Lebensdauer, für eine Umrüstung oder Wiederaufbereitung.
- Ersatzteilerzeugung: Noch funktionierende Komponenten aus alten E-Scootern, wie Batterien, Elektromotoren und Räder, können als Ersatzteile für andere E-Scooter genutzt werden (Rainer Kleber et al., 2009).
- Umfunktionierung: Die einzelnen Komponenten des E-Scooters wie z. B. das Gestell können für andere Produkte oder Zwecke z. B. für Möbel wiederverwendet werden (Bigolin et al., 2021; Spiegel Online, 2014).

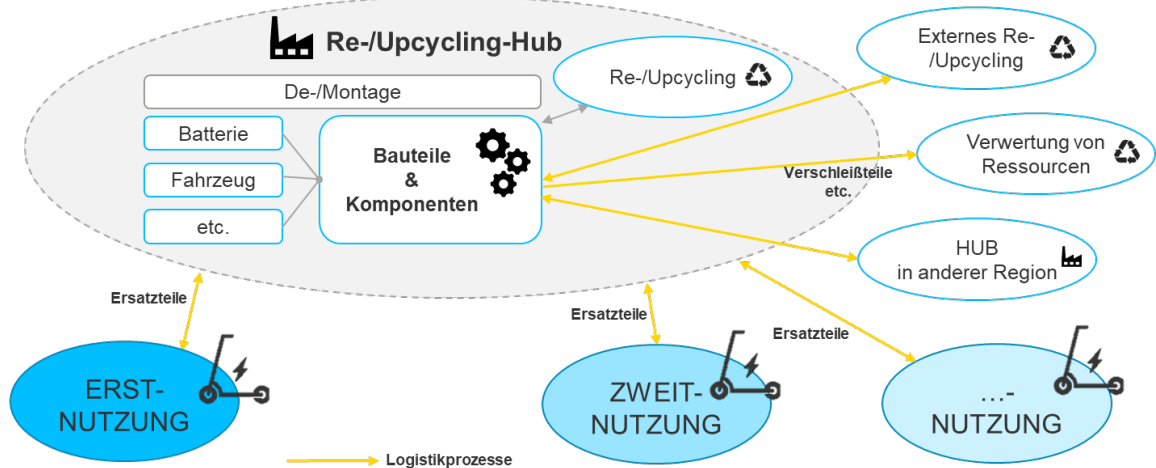


Abbildung 8 Up-/Recycling-Hub im urbanen Raum für E-Scooter

3.3 Prognosemodell zukünftiger Rückläufer als Grundlage für umfangreiche Simulation

Laut einer Statista-Studie flacht der Trend zu E-Scootern derzeit ab. Zwar wird für die Jahre 2024 und 2025 ein Umsatzwachstum erwartet, doch die Zahl der Nutzer und Nutzerinnen wird im Vergleich lediglich um etwa 3,4 % ansteigen. In Deutschland gab es im Jahr 2022 laut dem

Gesamtverband der Versicherer insgesamt 764.000 versicherte E-Scooter, von denen ein Viertel zu Leihflotten gehört. Zahlen für die einzelnen Bundesländer sind jedoch nicht verfügbar.

Im Rahmen des Projekts wurde ein erstes Konzept für ein Prognosemodell zur Vorhersage zukünftiger Rückläufer entwickelt. Dieses Modell bildet die Grundlage für künftige Simulationen und die Evaluation der Netzwerkplanung, um den Rücklaufprozess effizienter zu gestalten und strategische Entscheidungen zu unterstützen. Laut einer Statista-Studie flacht der Trend zu E-Scootern derzeit ab. Zwar wird für die Jahre 2024 und 2025 ein Umsatzwachstum erwartet, doch die Zahl der Nutzer und Nutzerinnen wird im Vergleich lediglich um etwa 3,4 % ansteigen (Statista, 2024). In Deutschland gab es im Jahr 2022 laut dem Gesamtverband der Versicherer insgesamt 764.000 versicherte E-Scooter, von denen ein Viertel zu Leihflotten gehört. Zahlen für die einzelnen Bundesländer sind jedoch nicht verfügbar (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, 2024).

Auf Grundlage dieser Werte wurde ein Konzept für ein Prognosemodell für die Anzahl der E-Scooter und eine Prognose des Batterieaufkommen für E-Scooter im Jahr 2030 in Deutschland erstellt.

Tabelle 4 Prognose Batterieaufkommen für E-Scooter

	2022	2023	2024	2025	2030	Bemerkung	
Anzahl Nutzer und Nutzerinnen in Mio.	9,9	11,2	11,6	12	16,61	Annahme für den Wert im Jahr 2030: Die Zahl der Nutzer und Nutzerinnen wird in der Zukunft konstant fortgeschrieben, basierend auf einer durchschnittlichen Wachstumsrate von 6,72% pro Jahr (Statista, 2024).	
Umsatz in Mio. €	167	193	202	212	317	Von 2022 bis 2025 erfolgte in Deutschland jährlich ein durchschnittliches Umsatzwachstum von 8,39 %. Es wird angenommen, dass dieser Trend bis 2030 fortgeschrieben wird (Statista, 2024).	
Anzahl versicherter E-Scooter	764.000	815.052	869.515	927.617	1.281.822	Ermittlung der Werte 2023-2030 durch lineare Interpolation basierend auf Wachstumsrate der Nutzer und Nutzerinnen (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, 2024)	
Durchschnittliche Nutzungsdauer Batterie im E-Scooter in Jahren (Endkunde)						3-5	Dies entspricht der durchschnittlichen Lebensdauer einer E-Scooter Batterie beim Endkunden (Kiss My Wheels, 2024)
Durchschnittliche Nutzungsdauer						1-2	Dies entspricht der durchschnittlichen Lebensdauer einer E-Scooter Batterie

er Batterie im E-Scooter in Jahren im (Sharing)						im Sharing (Ernst & Young, 2024)
Durchschnittliche Anzahl Rückläufer im Sharing	127.333	135.842	144.919	154.603	213.637	Statisch werden ein Viertel aller E-Scooter über Sharing bereitgestellt (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, 2024)
Durchschnittliche Anzahl Rückläufer (Endkunde)	143.250	152.822	163.034	173.928	240.342	Die Anzahl der Rückläufer wird auf Basis der Anzahl der versicherten E-Scooter für Endkunden sowie deren geschätzter Lebensdauer ermittelt.

Mithilfe dieser Werte kann ein Simulationsmodell sowohl für die Netzwerkplanung neuer E-Scooter als auch für ein Recyclingkonzept in einer Reverse Supply Chain entwickelt werden. Die Rückläufer vom Sharing-Anbieter sowie vom Endkunden werden getrennt betrachtet, da beim Sharing-Anbieter eine wesentlich kürzere Lebensdauer vorliegt (Ernst & Young, 2024). Darüber hinaus wurden Faktoren, die diese Werte beeinflussen können wie z. B. die Preisentwicklung für E-Scooter oder den erwarteten technologischen Fortschritt in der Batterieentwicklung für die Verbesserung der Lebensdauer aufgrund fehlender Datengrundlage nicht berücksichtigt.

Die einzelnen Werte für die jeweiligen Akteure wie z. B. das durchschnittliche Aufkommen von Recyclingbatterien beim jeweiligen Akteur können durch die Ermittlung weiterer Werte anhand der oben dargestellten Tabelle abgeleitet werden. Für die Erstellung eines umfangreichen Simulationsmodells sind jedoch weitere Daten erforderlich. Folgende Daten sind hierfür notwendig:

Transportdaten:

- Anzahl und Häufigkeit der Transporte zwischen den verschiedenen Akteuren
- Transportkapazitäten: Verfügbare Kapazitäten bei den verschiedenen Logistikdienstleistern für den Transport der E-Scooter, Komponenten, sowie Verschleiß- und Ersatzteile

Daten aus der Wertschöpfungskette:

- Produktionskapazitäten: Anzahl der E-Scooter, die über einen Zeitraum produziert werden
- Logistische Informationen: Informationen zu Lieferzeiten, Kapazitäten, Verfügbarkeit von Komponenten und Ersatzteilen

Recycling- und Upcycling-Prozesse:

- Anzahl der notwendigen Prozesse: Anzahl der durchzuführenden Re-/Upcycling Prozesse, wie z. B. die Wiederaufbereitung der Batterien, Elektromotoren
- Dauer der jeweiligen Prozesse: Kapazitäten für Re-/Upcycling, Dauer in Zeiteinheit

Informationen seitens der Sharing-Anbieter:

- Durchschnittliche Fluktuation: Häufigkeit für das Ersetzen der E-Scooter im Sharing-System z. B. aufgrund von Beschädigung, Verschleiß oder Wartung, geografischer Standort des Abfallaufkommens

Aufgrund der geringen Anzahl an durchgeführten Interviews, beispielsweise in der Rückführlogistik, konnten diese Werte nicht in Erfahrung gebracht werden.

3.4 Grundkonzept Entscheidungsmodell am EoU für nutzbare E-Scooter Komponenten

Im Rahmen des Projekts wurde ein Grundkonzept für ein Entscheidungsmodell für E-Scooter-Komponenten am Ende ihrer Nutzungsdauer entwickelt, wobei der Fokus auf der Batterie liegt, das im Folgenden beschrieben wird. Die Batterie wird dabei als besonders hochwertige Komponente betrachtet. Batterien können gemäß der Batterieverordnung (BattVO, 2023) in verschiedene Kategorien eingeteilt werden. Da E-Scooter als leichte Verkehrsmittel gelten, werden im Folgenden die spezifischen Regelungen für „Batterien für leichte Verkehrsmittel“ (LV-Batterien) nach Artikel 13 der Batterieverordnung (BattVO, 2023) berücksichtigt. Die relevanten Kriterien für die Entscheidung leiten sich aus der BattVO, 2023 ab. Besonders wichtig sind hierbei die Anforderungen zur Haltbarkeit und Leistungsfähigkeit gemäß Artikel 9 der BattVO, 2023 da ab dem 18.08.2023 ein Mindestwert erfüllt werden muss. Nachfolgend werden die relevanten Kriterien dargestellt

Die Bewertung erfolgt laut der BattVO, 2023 anhand des BMS nach Alterungszustand und Lebensdauer. Dabei werden folgende Parameter (Tabelle 5) gemessen:

Tabelle 5: Parameter für die Ermittlung des Alterungszustands und Lebensdauer von LV-Batterien

Parameter	Erläuterung
Bemessungskapazität (in Ah) und Kapazitätsverlust (in %)	Angewandte Entladegeschwindigkeit und Ladegeschwindigkeit
Leistung (in W) und Leistungsverlust (in %)	Verhältnis zwischen der Nennleistung der Batterie (W) und der Batterieenergie (Wh)
Innenwiderstand (in Ohm) und Innenwiderstandsanstieg (in %)	Entladungstiefe bei der Prüfung der Zykluslebensdauer
Gegebenenfalls Round-Trip-Wirkungsgrad und dessen Verlust (in %)	Leistungskapazität bei einem Ladezustand von 80 % und von 20 %
Die voraussichtliche Lebensdauer der Batterie unter den Referenzbedingungen	Gegebenenfalls etwaige mit den gemessenen Parametern durchgeführte Berechnungen

Die Ermittlung der einzelnen Parameter sowie die Reparatur bzw. das Recycling der Batterien erfolgt über eine funktionierende Steuerung und Informationsausgabe mittels des BMS.

Darüber hinaus empfiehlt sich eine Prüfung der Sicherheitsparameter der Batterie, wie z. B. Wärmeshock und Zyklusprüfung, um Risiken bei einer Weiter- oder Wiederverwendung zu vermeiden.

Zudem wurde im Rahmen der Interviews von mehreren Experten angemerkt, dass ein wirtschaftliches und sicheres Recycling, das eine Entladung der Batterie voraussetzt, nur möglich ist, wenn diese auch ohne größeren Aufwand, durch leicht lösbare Verbindungen aus dem E-Scooter entnommen werden kann.

Außerdem wurde angemerkt, dass ein optimales Recycling, wie in der entsprechenden gesetzlichen Regelung festgehalten, nur mit einer Informationsbereitstellung, z. B. von technischen Zeichnungen und Zellchemie, erfolgen kann.

Für die Entscheidungsfindung werden die relevanten Daten in einer Batteriedatenbank gesammelt. Sollte aufgrund der Kriterien keine Wiederverwendung möglich sein, wird ein Re-/Upcycling-Prozess eingeleitet. Es ist zudem zu beachten, dass ab dem 18.08.2023 gemäß der BattVO, 2023 ein Mindestzyklaltgehalt, das heißt, Mindestanteile an zurückgewonnenen Stoffen

in der Herstellung für LV-Batterien erreicht werden müssen. Dabei müssen folgende einzelne Werte für Lithium-Ionen-Batterien eingehalten werden:

- Kobalt: mindestens 12% (Gewichtsprozent)
- Nickel: mindestens 4% (Gewichtsprozent)
- Lithium: mindestens 0,5% (Gewichtsprozent)

Zudem müssen für den Transport defekter oder beschädigter Batterien die Sondervorschriften SV 376, P908 beachtet werden (ZVEI: Die Elektroindustrie, 2020). Dies beinhaltet:

- Batterien, die aus Sicherheitsgründen als defekt eingestuft wurden,
- ausgelaufene oder entgaste Batterien,
- Batterien, die vor dem Transport nicht diagnostiziert werden können,
- Batterien, die äußerliche oder mechanische Beschädigungen aufweisen.

Die Beurteilung muss dabei auf Grundlage der Sicherheitskriterien des Herstellers der Zelle, Batterie oder des Produkts durch eine fachkundige Person erfolgen (ZVEI: Die Elektroindustrie, 2020).

Darüber hinaus werden andere Komponenten, insbesondere hochwertige, aufbereitete Materialien, wie im Netzwerk dargestellt, nach einer Aufbereitung an die Zulieferer oder Hersteller geliefert. Im Rahmen der Interviews wurde jedoch festgestellt, dass sich beispielsweise metallische Komponenten aufgrund der geringen Qualität und Stabilität stärker abnutzen als die Batterie und daher ein Entscheidungsmodell für diese weniger sinnvoll erscheint. Diese Komponenten werden unmittelbar in den Recyclingkreislauf integriert.

In Abbildung 9 ist das Grundkonzept eines Entscheidungsmodells in Form eines Flussdiagramms dargestellt, das den Lebenszyklus eines E-Scooters und seiner Komponenten, einschließlich des Batteriepacks, des Elektromotors und des Fahrzeugs selbst, veranschaulicht.

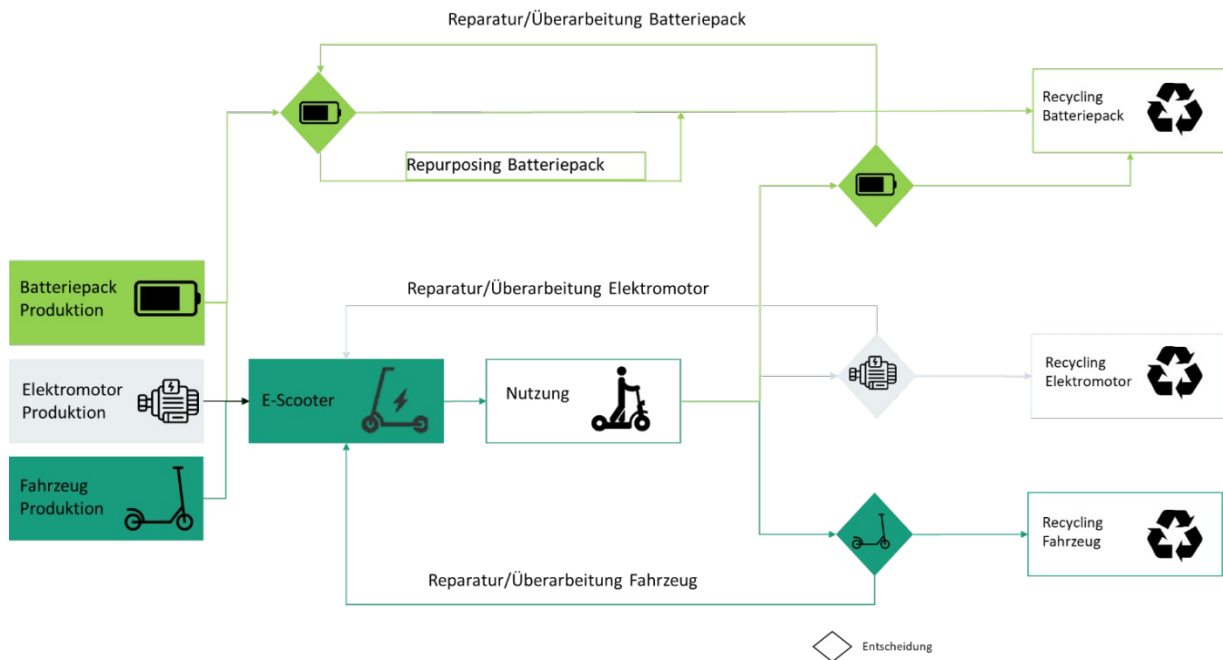


Abbildung 9: Grundkonzept des Entscheidungsmodells im End-of-Life für nutzbare E-Scooter Komponenten

4 Regulatorische Rahmenbedingungen

4.1 Regulatorische Rahmenbedingungen

Zur Analyse der Anforderungen an das Gesamtprodukt E-Scooter sowie die darin enthaltenen Komponenten wurden zunächst die geltenden Richtlinien und Verordnungen auf EU-Ebene identifiziert, gefolgt von den entsprechenden Gesetzen auf Bundesebene (Abbildung 10).

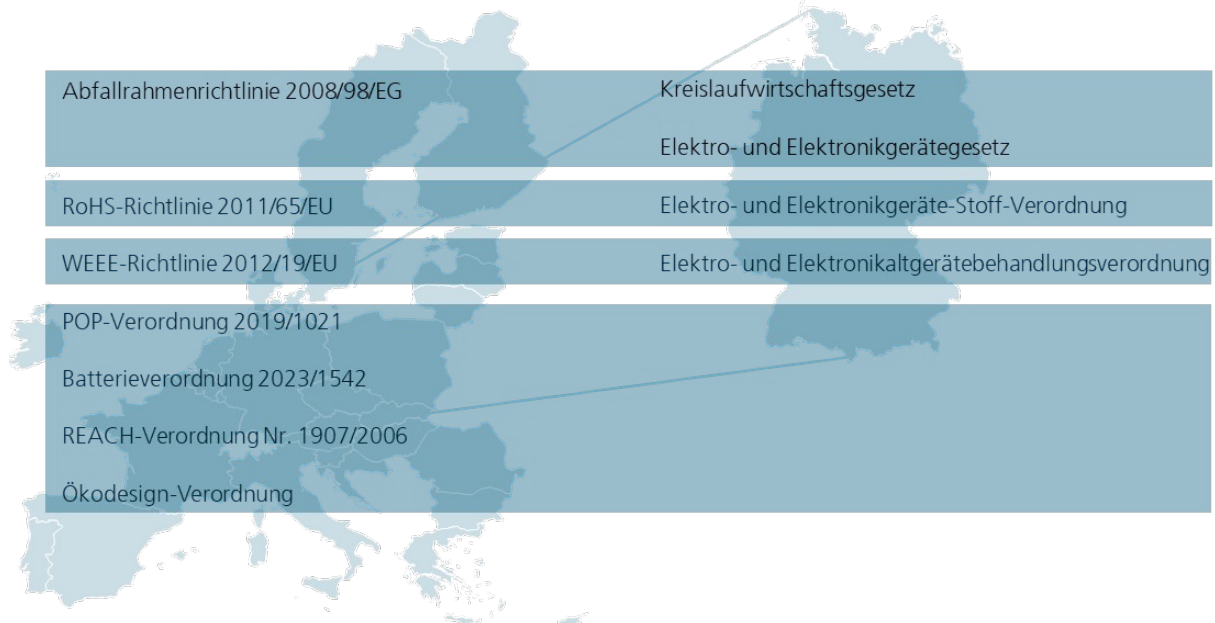


Abbildung 10: Richtlinien, Verordnungen und Gesetze die im Kontext Kreislaufwirtschaft von E-Scootern relevant sind sowie deren Geltungsbereich (EU oder Deutschland)

Diese Rechtsvorschriften wurden dann hinsichtlich der Kerninhalte untersucht (Tabelle 6). Anschließend wurden jeweils die betroffenen Akteure entlang der Wertschöpfungskette sowie deren Verantwortlichkeit definiert.

Tabelle 6 Kerninhalte der Richtlinien, Verordnungen und Gesetze die im Kontext der Kreislaufführung von E-Scootern relevant sind

Richtlinie, Verordnung, Gesetz	Abkürzung, Jahr	Kerninhalte
Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG	AbfRRL, 2008	Festlegung eines Rechtsrahmens für den Umgang mit Abfällen in der EU
RoHS-Richtlinie 2011/65/EU	RoHS, 2011	Beschränkt die Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten
WEEE-Richtlinie 2012/19/EU	WEEE, 2012	Regelt die Sammlung und das Recycling von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (EAG); grundlegendes Prinzip ist die abfallwirtschaftliche Verantwortung der Hersteller für ihre Produkte während der gesamten Lebensdauer
POP-Verordnung 2019/1021	POP, 2019	Regelung des Verbots und der Beschränkung der Herstellung, des Inverkehrbringens und der Verwendung von persistenten organischen Schadstoffen (Persistent Organic Pollutants ((POP)). Ferner geht es um die Beschränkung der Freisetzung solcher Stoffe und die Festlegung von Bestimmungen zur Entsorgung von Abfällen, die aus solchen Stoffen bestehen, sie enthalten oder durch sie verunreinigt sind.
Batterieverordnung	BattVO,	Die Verordnung enthält Anforderungen an die Nachhaltig-

2023/1542	2023	keit, Sicherheit, Kennzeichnung und Information, die das Inverkehrbringen und die Inbetriebnahme von Batterien in der EU ermöglichen
REACH-Verordnung Nr. 1907/2006	REACH, 2006	Die Verordnung vereinheitlicht das Chemikalienrecht europaweit und erhöht den Wissensstand über Gefahren und Risiken, die von Chemikalien ausgehen können
Ökodesign-Verordnung	Ökodesign-VO, 2024	Umfassendes Rahmenwerk zur Festlegung von Ökodesign-Anforderungen, die auf die Verbesserung der Rückverfolgbarkeit, der Kreislaufwirtschaft, der Energieeffizienz und der allg. ökologischen Nachhaltigkeit abzielen
Kreislaufwirtschaftsgesetz	KrWG, 2012	Regelt die Abfallvermeidung, -bewirtschaftung und -entsorgung sowie die Produktverantwortung in Deutschland
Elektro- und Elektronikgeräte-Stoff-Verordnung	Elektro-StoffV, 2013	Umsetzung der abfallrechtlichen Produktverantwortung der Hersteller von Elektro- und Elektronikgeräten
Elektrogesetz	ElektroG, 2015	Das Elektrogesetz ist die deutsche Umsetzung der europäischen WEEE-Richtlinie zur Regelung des Inverkehrbringens, der Rücknahme und der Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten.
Elektro- und Elektronikaltgerätebehandlungsverordnung	EAG-Be-handV, 2021	Regelung der Anforderungen an die Behandlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (Behandlung: Schadstoffentfrachtung und Wertstoffseparierung, Demontage und Zerkleinerung, weitere Behandlung und Entsorgung, im Wesentlichen Recycling oder sonstige Verwertung und Vorbereitung zur Beseitigung)

4.2 Herausforderungen der Abfallhierarchie

Zu den zentralen Richtlinien im Bereich der Abfallwirtschaft zählt die Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL, 2008). Sie definiert wesentliche abfallbezogene Begrifflichkeiten und legt unter anderem eine fünfstufige Abfallhierarchie fest. Die Abfallhierarchie gibt die Prioritätensetzung bei der Behandlung von Abfällen vor:

1. Vermeidung,
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung,
3. Recycling,
4. sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung,
5. Beseitigung.

Ausgehend von der Rangfolge diejenige Maßnahme Vorrang haben, die den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips am besten gewährleistet (KrWG, 2012; AbfRRL, 2008). Für die Betrachtung der Auswirkungen auf Menschen und Umwelt ist der gesamte Lebenszyklus des Abfalls zugrunde zu legen. Die generelle Rangfolge für die Maßnahmen der Vermeidung und der Abfallbewirtschaftung soll nach den genannten ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekten daher in bestimmten Fallkonstellationen relativiert werden. Entsprechend der Abfallhierarchie werden die Vermeidung sowie die Vorbereitung zur Wiederverwendung höher priorisiert als Recycling. Während Recycling die Wiederverwertung von Materialien nach dem Ende ihrer ersten Nutzungsphase ermöglicht, verhindern die ersten beiden Strategien, dass Produkte überhaupt zu Abfall werden. Dies reduziert nicht nur die Menge an Abfall, der behandelt werden muss, sondern spart auch die Ressourcen und Energie, die ansonsten für die Herstellung neuer Produkte und das Recycling aufgewendet würden.

In der Praxis stellt sich oft die Herausforderung, dass Recycling bevorzugt wird, um festgelegte Recyclingquoten zu erreichen (KrWG, 2012; BattVO, 2023), obwohl dies nicht immer den obersten Zielen der Abfallhierarchie entspricht. Der Fokus auf Recycling kann insbesondere dann entstehen, wenn gesetzliche oder politische Vorgaben hohe Recyclingquoten vorschreiben (BattVO, 2023), Unternehmen und Kommunen sind dann häufig gezwungen, ihre Anstrengungen auf das Recycling zu konzentrieren, um diese Ziele zu erfüllen, selbst wenn andere,

möglicherweise umweltfreundlichere Maßnahmen wie die Vermeidung oder Wiederverwendung von Abfällen in der Hierarchie höher eingestuft sind.

Ein weiterer Grund für diese Herausforderung ist die oft unzureichende Infrastruktur für die Lebensdauererlängerung von Produkten. In vielen Regionen fehlen angemessene Reparaturdienste oder Programme zur Förderung von Upcycling und Wiederverwendung (Interview). Ohne solche Strukturen wird Recycling oft als die praktischere Lösung angesehen, um Abfallmanagementziele zu erreichen. Zusätzlich spielen wirtschaftliche Anreize eine Rolle. Märkte für recycelte Materialien sind oft besser etabliert und bieten finanzielle Vorteile im Vergleich zu Vermeidungs-, Reparatur- oder Wiederverwendungsprogrammen.

Um die höher priorisierten Strategien zu adressieren ist daher eine verstärkte Zusammenarbeit von Gesetzgebern, Unternehmen und Verbrauchern erforderlich, um die notwendigen rechtlichen Rahmenbedingungen und praktischen Anreize zu schaffen und somit die Vorteile der Vermeidung und Wiederverwendung besser zu realisieren.

4.3 Rollen und Verantwortlichkeiten

Zur Identifikation der Rollen und Verantwortlichkeiten wurden die entsprechenden Dokumente zu den Verordnungen, Richtlinien und Gesetzen hinsichtlich genannter Akteure sowie deren Pflichten analysiert.

Eine Übersicht der identifizierten Akteure sowie eine Zuordnung zu den identifizierten Richtlinien, Verordnungen und Gesetzen ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7 Zuordnung der Akteure zur Regulatortik

Klassifizierung	Akteur	Abfallrahmenrichtlinie	RoHS	WEEE	POP	BattVO	REACH	ÖkodesignVO	Kreislaufwirtschafts-gesetz	ElektroStoffV	ElektroG	EAG BehandV
Regulierungs- und Aufsichtsbahörden	Europäische Kommission				✓							
	Europäische Chemikalienagentur (ECHA)				✓							
	Agentur						✓					
	Online-Marktplätze und Suchmaschinen							✓				
Produktverantwortlich; Abfallbewirtschaftung und Entsorgung	Händler			✓		✓		✓	✓		✓	
	Hersteller		✓	✓		✓*		✓	✓	✓	✓	
Produktverantwortlich	Importeure		✓			✓		✓		✓	✓	
	Vertreiber		✓					✓		✓		
	Verkäufer			✓								
	Erzeuger											

	Zulieferer				✓					
	Einführer				✓					
	Registrant					✓				
	Exporteure									✓
Dienstleister und Unterstützer	Bevollmächtigter	✓			✓		✓		✓	
	Fulfillment-Dienstleister				✓		✓			
	Nachgeschalteter Anwender					✓				
Abfallbewirtschaftung und Entsorgung	Erzeuger und Besitzer von Abfällen		✓	✓				✓		
	Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger							✓		✓
	Sammler							✓		
	Beförderer							✓		
	Makler							✓		
	Betreiber von Erstbehandlungsanlagen									✓
	Verbraucher		✓	✓				✓		✓

*Hersteller sind gemäß der BattVO, 2023 definiert als „Erzeuger, Einführer oder Händler“

Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL, 2008):

In der Richtlinie selbst werden keine Verpflichtungen spezifiziert, da Abfallbewirtschaftungssysteme unabhängig von der Verteilung der Verantwortlichkeiten zwischen öffentlichen und privaten Akteuren zur Kreislaufwirtschaft beitragen können. Die Entscheidung über die Verantwortlichkeiten hängt oft von geografischen und strukturellen Bedingungen ab. Sowohl kommunale als auch private Abfallbewirtschaftungssysteme sind zulässig, und die Wahl oder Änderung des Systems liegt bei den Mitgliedstaaten.

RoHS (RoHS, 2011):

- **Hersteller:** Hersteller müssen Verfahren zur Sicherstellung der Konformität einrichten, Änderungen berücksichtigen, ein Verzeichnis von nichtkonformen Geräten führen, Kennzeichnungen anbringen, bei Nichtkonformität Korrekturmaßnahmen ergreifen und die zuständigen Behörden mit allen erforderlichen Informationen versorgen.
- **Importeure:** Importeure müssen sicherstellen, dass nur konforme Geräte in Verkehr gebracht werden, das Konformitätsbewertungsverfahren und die Dokumentation vorab geprüft werden, bei Nichtkonformität sofort Korrekturmaßnahmen und Rückrufe durchführen, ihre Kontaktdaten angeben, ein Register führen, Dokumente zehn Jahre aufbewahren und bei Bedarf mit nationalen Behörden kooperieren.
- **Vertreiber:** Vertreiber müssen bei der Bereitstellung von Elektro- oder Elektronikgeräten sicherstellen, dass diese CE-gekennzeichnet sind und alle erforderlichen Unterlagen in verständlicher Sprache beigelegt sind, bei Nichtkonformität die Geräte nicht bereitstellen, Korrekturmaßnahmen ergreifen und die nationalen Behörden informieren, sowie auf Anfrage der Behörden alle notwendigen Informationen zur Konformität bereitstellen und mit ihnen kooperieren
- **Bevollmächtigte:** Bevollmächtigte müssen die EU-Konformitätserklärung und technischen Unterlagen zehn Jahre aufbewahren, bei Anfragen der nationalen Behörden alle erforderlichen Informationen bereitstellen und mit den Behörden zur Sicherstellung der Richtlinieneinhaltung kooperieren.

WEEE (WEEE, 2012):

- **Händler:** Händler sind verpflichtet, einen Rücknahmedienst einzurichten, der es Kunden ermöglicht, ihre Elektro- und Elektronik-Altgeräte kostenlos zurückzugeben.

- **Hersteller:** Hersteller müssen ihre Produkte bei den zuständigen nationalen Behörden registrieren, Meldungen zur Menge verkaufter Geräte vorlegen, sowie die Sammlung, Behandlung, Recycling und Verwertung ihrer Altgeräte organisieren oder finanzieren.
- **Verkäufer:** Verkäufer müssen sicherstellen, dass ihre Elektro- und Elektronikgeräte die Richtlinien zur Beschränkung gefährlicher Stoffe einhalten.
- **Verbraucher:** Verbraucher müssen ihre Altgeräte bei den vorgesehenen Sammelstellen oder Rücknahmesystemen abgeben und dürfen diese nicht im regulären Hausmüll entsorgen.

POP (POP, 2019):

- **Europäische Kommission:** Die Kommission unterstützt die Aufnahme von Stoffen in die Liste des Übereinkommens, erlässt Durchführungsrechtsakte zur Abfallbewirtschaftung, verwaltet Anpassungen der Anhänge und fördert den Informationsaustausch über POP-Stoffe.
- **Europäische Chemikalienagentur:** Die Agentur unterstützt die Kommission bei der Stoffaufnahme, bietet technische Hilfe, sammelt Informationen und erstellt Übersichtsberichte.
- **Erzeuger und Besitzer von Abfällen:** Erzeuger und Besitzer von Abfällen müssen POP-Kontaminationen vermeiden und Abfälle gemäß den Vorschriften zur Zerstörung oder Umwandlung behandeln.

BattVO (BattVO, 2023):

- **Hersteller:** Hersteller sind definiert als „Erzeuger, Einführer oder Händler oder eine andere natürliche oder juristische Person der bzw. die (...) Batterien unter eigenem Namen oder eigener Handelsmarke erzeugt oder konzipieren lässt und im Hoheitsgebiet dieses Mitgliedsstaats erstmals unter eigenem Namen oder unter der eigenen Handelsmarke abgibt...“
 - **Händler:** Händler müssen sicherstellen, dass Batterien den gesetzlichen Anforderungen entsprechen und dürfen keine nicht-konformen Batterien in Verkehr bringen. Sie sind auch verpflichtet, Korrekturmaßnahmen zu ergreifen und mit den Behörden zusammenzuarbeiten.
 - **Erzeuger:** Erzeuger müssen sicherstellen, dass Batterien den Vorschriften entsprechen, inklusive korrekter Kennzeichnung, Konformitätsbewertung und Bereitstellung aller erforderlichen Dokumente. Sie sind auch verpflichtet, Korrekturmaßnahmen bei Nichtkonformität zu ergreifen und mit den Behörden zusammenzuarbeiten.
 - **Einführer:** Einführer dürfen Batterien nur in Verkehr bringen, wenn diese alle Anforderungen der Verordnung erfüllen, und müssen sicherstellen, dass die Batterien korrekt gekennzeichnet sind und alle relevanten Dokumente enthalten. Bei Nichtkonformität müssen sie Korrekturmaßnahmen ergreifen und die Behörden informieren.
- **Zulieferer:** Zulieferer sind verpflichtet, alle notwendigen Informationen bereitzustellen, die für die Einhaltung der Verordnung durch die Hersteller erforderlich sind.
- **Bevollmächtigte:** Bevollmächtigte führen die Aufgaben aus, die ihnen im Mandat des Erzeugers übertragen wurden, einschließlich der Erfüllung der erweiterten Herstellerverantwortung.
- **Fulfillment-Dienstleister:** Fulfillment-Dienstleister müssen sicherstellen, dass die Lagerung, Verpackung und der Versand von Batterien die Konformität mit den gesetzlichen Anforderungen nicht beeinträchtigen.
- **Verbraucher:** Müssen Altbatterien an Sammelstellen abgeben.

Die nachfolgende Abbildung 11 gibt einen Überblick über die einzelnen Pflichten die für LV-Batterien relevant sind und den Zeitplan zur Anwendung dieser.

Regulatorische Rahmenbedingungen

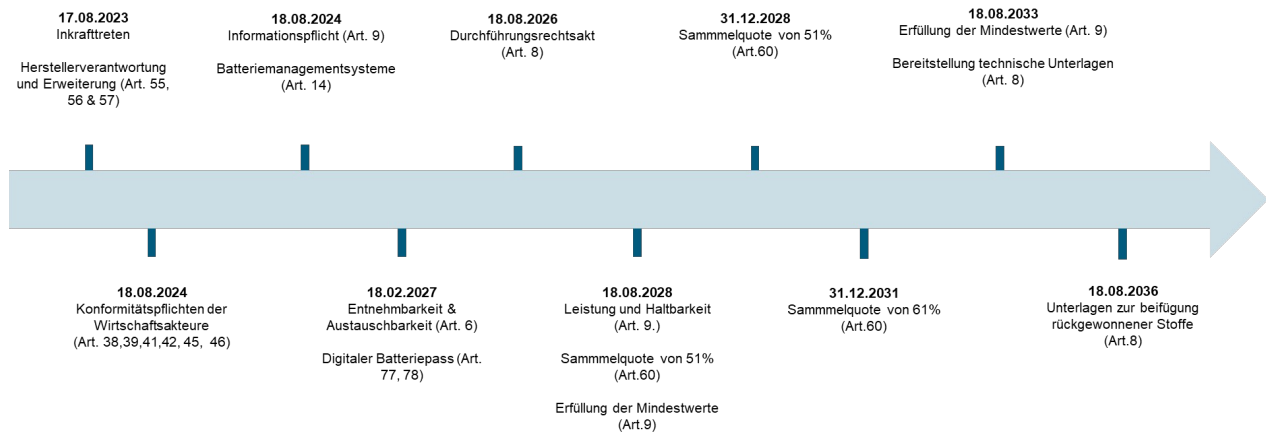


Abbildung 11: Zeitstrahl zu den Anforderungen an LV-Batterien gemäß der BattVO; eigene Darstellung in Anlehnung an Öttinger (2023)

REACH (REACH, 2006):

- **Agentur:** Die Agentur weist nach Eingang einer Registrierung eine Eingangsnummer und ein Antragsdatum zu, prüft die Registrierung auf Vollständigkeit und vergibt bei erfolgreicher Registrierung eine Registrierungsnummer sowie das Registrierungsdatum. Sie informiert innerhalb von 30 Tagen die zuständige Behörde des Mitgliedstaates über die Registrierung.
- **Registrant:** Der Registrant muss seine Registrierung unverzüglich aktualisieren und die Agentur informieren, wenn sich relevante Informationen wie Status, Zusammensetzung des Stoffes, Mengen oder Risikobewertungen ändern.
- **Nachgeschalteter Anwender:** Nachgeschaltete Anwender müssen dem Hersteller oder Importeur Informationen zur identifizierten Verwendung bereitstellen und auf Nutzungsmeldungen reagieren. Sie sind verpflichtet, einen Stoffsicherheitsbericht zu erstellen, wenn die Nutzung abweicht oder wenn der Lieferant die Nutzung ablehnt, und geeignete Risikomanagementmaßnahmen zu identifizieren und anzuwenden. Der Stoffsicherheitsbericht muss aktuell gehalten und verfügbar gemacht werden.

Ökodesign-Verordnung (ÖkodesignVO, 2024):

- **Online-Marktplätze und Suchmaschinen:** Online-Marktplätze und Suchmaschinen müssen Marktüberwachungsmaßnahmen unterstützen, Informationen über entfernte Angebote bereitstellen und Behörden Zugang zu ihren Schnittstellen gewähren, um nicht konforme Produkte zu identifizieren.
- **Händler:** Händler müssen Kunden Zugang zu relevanten Informationen und Produktpässen gewährleisten und sicherstellen, dass Etiketten gut sichtbar und nicht irreführend sind.
- **Hersteller:** Hersteller müssen sicherstellen, dass ihre Produkte konform sind, ein Konformitätsbewertungsverfahren durchführen, technische Dokumente erstellen und CE-Kennzeichnung anbringen. Sie müssen Produkte identifizierbar machen, Gebrauchsanleitungen beilegen und bei Nichtkonformität Korrekturmaßnahmen ergreifen sowie Behörden informieren.
- **Importeure:** Importeure dürfen nur konforme Produkte in Verkehr bringen, müssen sicherstellen, dass Produkte korrekt gekennzeichnet sind und Anleitungen enthalten, und sicherstellen, dass Lagerung und Transport die Konformität nicht beeinträchtigen. Sie müssen bei Nichtkonformität Maßnahmen ergreifen und Behörden informieren. Importeure und Vertreiber übernehmen die Pflichten der Hersteller, wenn sie Produkte unter eigenem Namen vertreiben oder Änderungen vornehmen, die die Konformität beeinträchtigen.

- **Vertreiber:** Vertreiber müssen sicherstellen, dass Produkte die Anforderungen erfüllen, die Konformität vor dem Verkauf prüfen, Lagerung und Transport überwachen und bei Nichtkonformitäten Maßnahmen ergreifen sowie mit Behörden kooperieren.
- **Bevollmächtigte:** Bevollmächtigte vertreten den Hersteller, sind jedoch nicht für die Konformität verantwortlich. Sie müssen Dokumente bereithalten und auf Anfrage bereitstellen sowie mit Behörden bei der Behebung von Nichtkonformitäten zusammenarbeiten.
- **Fulfillment-Dienstleister:** Fulfillment-Dienstleister müssen sicherstellen, dass Lagerung, Verpackung, Adressierung und Versand die Produktkonformität nicht beeinträchtigen.

Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG, 2012):

- **Händler:** Händler sind für die Zwischenlagerung, Handhabung und Weitergabe von Abfällen an autorisierte Entsorgungsunternehmen zuständig. Sie müssen alle gesetzlichen Anforderungen erfüllen, um eine ordnungsgemäße und umweltgerechte Entsorgung sicherzustellen.
- **Hersteller:** Hersteller tragen die Verantwortung für die Erfüllung der Kreislaufwirtschaftsziele durch ihre Erzeugnisse. Sie müssen ihre Produkte so gestalten, dass die Entstehung von Abfällen bei Herstellung und Nutzung minimiert wird. Zudem müssen sie sicherstellen, dass die nach Gebrauch anfallenden Abfälle umweltfreundlich verwertet oder beseitigt werden, um den gesetzlichen Anforderungen gerecht zu werden.
- **Erzeuger und Besitzer von Abfällen:** Erzeuger und Besitzer von Abfällen sind gesetzlich verpflichtet, ihre Abfälle zu verwerten, wobei die Verwertung Vorrang vor der Beseitigung hat (§7 (2)). Sie müssen sicherstellen, dass ihre Abfälle auf eine Weise behandelt werden, die umweltfreundlich ist und den geltenden Vorschriften entspricht.
- **Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger:** Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger sind für die Verwertung und Beseitigung von Abfällen aus privaten Haushalten und anderen Bereichen zuständig. Sie müssen eine getrennte Sammlung von Bioabfällen, Kunststoff, Metall, Papier, Glas, Textilien (ab 2025), Sperrmüll und gefährlichen Abfällen sicherstellen. Zudem sind sie verantwortlich für das Ausschließen bestimmter Abfälle von der Entsorgung, wenn eine Rücknahmepflicht besteht, und für die Entsorgung abgemeldeter Fahrzeuge, die auf öffentlichen Flächen stehen und nicht innerhalb eines Monats entfernt wurden. Sie können Dritte mit der Erfüllung ihrer Pflichten beauftragen.
- **Sammler:** Sammler sind für die sichere und gesetzeskonforme Sammlung von Abfällen verantwortlich. Dazu zählen die ordnungsgemäße Lagerung, Kennzeichnung und Dokumentation, um Umweltauswirkungen und Gefahren für Menschen zu vermeiden.
- **Beförderer:** Beförderer müssen sicherstellen, dass der Transport von Abfällen unter Einhaltung aller Sicherheits- und Dokumentationsanforderungen erfolgt.
- **Makler:** Makler vermitteln zwischen Abfallerzeugern und Entsorgungsunternehmen, sorgen für die ordnungsgemäße Dokumentation und Weiterleitung der Abfälle und müssen alle gesetzlichen Vorschriften einhalten, um die korrekte und sichere Behandlung der Abfälle zu gewährleisten.
- **Verbraucher:** Verbraucher sind verpflichtet, Abfälle gemäß den örtlichen Vorgaben zur Abfalltrennung zu sortieren und getrennt zu sammeln.

ElektroStoffV (ElektroStoffV, 2013):

- **Hersteller:** Hersteller müssen sicherstellen, dass sie nur konforme Elektro- und Elektronikgeräte in Verkehr bringen, alle erforderlichen Verfahrensschritte durchführen und die technischen Unterlagen sowie die EU-Konformitätserklärung zehn Jahre aufbewahren; sie müssen geeignete Verfahren zur kontinuierlichen Sicherstellung der Konformität bei Serienfertigung anwenden, Änderungen berücksichtigen, bei Nichtkonformität unverzüglich Korrekturmaßnahmen ergreifen und die zuständigen Behörden informieren; zudem müssen sie Geräte entsprechend kennzeichnen, ihren Namen und ihre Anschrift angeben, auf Verlangen der Behörden alle relevanten Informationen be-

reitstellen und ein Verzeichnis von nichtkonformen Geräten sowie Rückrufen führen und die Verreiber darüber informieren.

- **Importeure:** Importeure müssen sicherstellen, dass Elektro- oder Elektronikgeräte vor dem Inverkehrbringen die Konformitätsanforderungen erfüllen; bei Nichtkonformität müssen sie Maßnahmen zur Herstellung der Konformität ergreifen, das Gerät eventuell vom Markt nehmen oder zurückrufen und die zuständigen Behörden informieren; sie müssen ein Verzeichnis nichtkonformer Geräte führen, eine Kopie der EU-Konformitätserklärung zehn Jahre aufbewahren, ihren Namen und ihre Anschrift am Gerät oder auf der Verpackung angeben und auf Anfrage der Behörden alle erforderlichen Informationen zur Konformität bereitstellen und mit diesen kooperieren. Verreiber: Überprüfung der Konformität und Einhaltung der Kennzeichnungspflichten.
- **Verreiber:** Verreiber müssen vor der Marktbewirtschaftung von Elektro- und Elektronikgeräten sicherstellen, dass diese die Anforderungen gemäß § 3 erfüllen, insbesondere dass sie CE-gekennzeichnet sind und alle Kennzeichnungspflichten erfüllt sind; bei Verdacht auf Nichtkonformität dürfen sie das Gerät nicht bereitstellen, müssen gegebenenfalls Korrekturmaßnahmen ergreifen, das Gerät zurücknehmen oder zurückrufen und die zuständigen Behörden sowie Hersteller oder Importeure informieren; sie müssen außerdem alle relevanten Informationen zur Konformität auf Verlangen der Behörden bereitstellen und mit diesen kooperieren.
- **Bevollmächtigte:** Bevollmächtigte müssen die EU-Konformitätserklärung und technischen Unterlagen zehn Jahre aufbewahren, auf begründetes Verlangen der zuständigen Behörde alle erforderlichen Informationen zur Konformität bereitstellen und bei Bedarf mit der Behörde zur Sicherstellung der Richtlinieneinhaltung zusammenarbeiten; sie können jedoch nicht die Verpflichtung zur Konformitätsprüfung und Erstellung der technischen Unterlagen übernehmen.

ElektroG (ElektroG, 2015):

- **Händler:** Händler müssen sicherstellen, dass Elektrogeräte gemäß dem Elektroggesetz registriert und konform sind, und können freiwillig Altgeräte zurücknehmen oder diese ordnungsgemäß entsorgen lassen, wenn sie nicht bei Sammelstellen abgegeben werden.
- **Hersteller:** Der Hersteller muss vor dem Inverkehrbringen von Elektrogeräten in Deutschland sein Unternehmen bei der Gemeinsamen Stelle registrieren, eine finanzielle Garantie für den Insolvenzfall bereitstellen, Altgeräte auf eigene Kosten zurücknehmen und bestimmte Produkteigenschaften sicherstellen.
- **Importeure:** Importeure haben dieselben Verpflichtungen wie Hersteller und unterliegen den gleichen Sanktionen, wenn sie diese nicht erfüllen.
- **Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger:** Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger sind gesetzlich verpflichtet, Sammelstellen einzurichten und die Rücknahme sowie Entsorgung von Elektroaltgeräten aus privaten Haushalten zu organisieren.
- **Exporteure:** Unternehmen, die Elektrogeräte in andere EU-Länder exportieren, sind nur an die nationale WEEE-Gesetzgebung (WEEE, 2012) des jeweiligen Exportlandes gebunden, nicht an das deutsche Elektroggesetz.
- **Verbraucher:** Verbraucher müssen ihre Altgeräte bei Sammelstellen abgeben und können sich gegebenenfalls auch die Abholung von sperrigen Geräten durch Kommunen bieten lassen.

EAG BehandV (EAG-BehandV, 2021):

- **Betreiber von Erstbehandlungsanlagen:** Betreiber von Erstbehandlungsanlagen sind verpflichtet, regelmäßig die Einhaltung des Behandlungskonzepts sowie der festgelegten Grenzwerte zu überprüfen. Dazu müssen sie einen Kontrollplan erstellen und anwenden, um sicherzustellen, dass die gesetzlichen Grenzwerte eingehalten werden. Alle Überprüfungsergebnisse sind im Betriebstagebuch zu dokumentieren. Im Falle von Grenzwertüberschreitungen sind die Betreiber verpflichtet, eine Defizitanalyse

durchzuführen und die Arbeitsanweisungen entsprechend anzupassen, um die Einhaltung der Vorschriften sicherzustellen.

4.4 Normen und Standards zur Circular Economy von E-Scootern

Normen und Standards fördern die Kreislaufwirtschaft, indem sie eine einheitliche Terminologie und klare Schnittstellen schaffen, was die Kommunikation und den Informationsaustausch zwischen Marktakteuren erleichtert. Sie definieren unter anderem Anforderungen an kreislauffähige Produkte und etablieren eine präzise Materialklassifizierung, was sowohl Herstellern als auch Recyclern zugutekommt (DIN, 2024b).

Zur Identifikation relevanter Normen und Standards für das Gesamtprodukt E-Scooter sowie dessen Komponenten wurden zunächst die geltenden Normen und Standards, die der Kreislaufwirtschaft zugrunde liegen, identifiziert. Als Erstens wurde hierzu die Normungsroadmap Circular Economy von DIN, DKE und VDI herangezogen. Sie bietet einen allgemeinen Überblick über den Status der Normung zur Circular Economy. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass der Großteil der Normen den Recyclingbereich abdeckt, während R-Strategien wie Rethink, Refuse und Repurpose weniger adressiert werden. Dies widerspricht der Priorität dieser Strategien in der Abfallhierarchie (DIN et al., 2023).

Horizontale Normen beschreiben die übergreifenden Aspekte der Kreislaufwirtschaft. Ihr Ziel ist es, allgemeine Rahmenbedingungen für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft zu schaffen. Diese Normen legen grundlegende Terminologien, Prinzipien und gemeinsame Leitlinien fest, die für eine erfolgreiche Umsetzung der Kreislaufwirtschaft erforderlich sind. Die relevanten horizontalen Normen und Standards sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8 Horizontale Normen und Standards zur Unterstützung der Kreislaufwirtschaft

Norm	Kerninhalte
ISO 59004:2024.	Circular Economy – Vokabular, Grundsätze und Leitlinien für die Umsetzung
ISO 59010:2024.	Circular Economy - Leitfaden für den Übergang von Geschäftsmodellen und Wertschöpfungsnetzwerken
ISO 59020:2024.	Circular Economy - Messung und Bewertung der zirkulären Leistung
ISO/TR 59032:2024.	Circular Economy - Überprüfung bestehender Wertschöpfungsnetzwerke
DIN CLC/TR 45550:2021-04.	Definitionen zur Materialeffizienz
DIN EN 45555:2020-04.	Normenreihe zu allgemeinen Verfahren zu Bewertung von Circular-Economy-relevanten Aspekten, zur Deklaration kritischer Rohstoffe und zur Bereitstellung von Informationen über Materialeffizienz Aspekte
DIN EN 45560:2023-10 - Entwurf.	Methode zur Gestaltung zirkulärer Produkte

Insgesamt stellen diese Normen ein umfassendes Regelwerk dar, das Unternehmen und Organisationen dabei unterstützt, ihre Geschäftsmodelle und Produkte nachhaltig zu gestalten und die Prinzipien der Circular Economy umzusetzen und bieten dabei eine Grundlage für die Entwicklung zirkulärer Systeme.

Normen und Standards für R-Strategien in der Kreislaufwirtschaft

Basierend auf DIN, 2024a wurden die relevanten Normen und Standards für die R-Strategien identifiziert und deren wesentliche Inhalte beschrieben. Einige dieser Normen decken mehrere R-Strategien ab; daher wurde jede Norm der entsprechenden R-Strategie sowie der spezifi-

schen Lebenszyklusphase zugeordnet, auf die sich die R-Strategie bezieht (Tabelle 9, Tabelle 10, Tabelle 11).

Lebenszyklusphase: Design

Tabelle 9 Relevante Normen für die R-Strategien refuse, rethink, reduce

R-Strategie	Norm	Kerninhalte
Refuse Rethink	DIN SPEC 59 Beiblatt 1:2018- 11.	Leitfaden zur Einbeziehung von Umweltgesichtspunkten in Produktnormen
Refuse Reduce Rethink	DIN EN 45560:2023-10 - Entwurf.	Verfahren zur Realisierung zirkulärer Produktgestaltung
Refuse Rethink	DIN EN IEC 62430:2022-10.	Umweltbewusstes Gestalten (ECD) - Grundsätze, Anforderungen und Leitfaden
Reduce	ISO 14009:2020.	Umweltmanagementsysteme - Leitlinien zur Einbeziehung der Kreislaufführung von Materialien bei Design und Entwicklung

Lebenszyklusphase: Nutzungsphase und End-of-Life

Tabelle 10 Relevante Normen für die R-Strategien reuse, repair, refurbish, remanufacture

R-Strategie	Norm	Kerninhalte
Reuse	DIN/TS 35205:2024-09.	Leitfaden zur Vorbereitung der Wiederverwendung
Reuse Repair	DIN 31051:2019- 06.	Grundlagen der Instandhaltung
Repair	DIN EN 50614:2021-12.	Anforderungen an die Vorbereitung zur Wiederverwendung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE)
Refurbish Remanufacture	DIN EN 45553:2020-11.	Allgemeines Verfahren zur Bewertung der Wiederaufarbeitbarkeit energieverbrauchsrelevanter Produkte
Remanufacture	DIN SPEC 91472:2023-06.	Remanufacturing (Reman) - Qualitätsklassifizierung für zirkuläre Prozesse

Lebenszyklusphase: Nutzungsphase und End-of-Life

Tabelle 11 Relevante Normen für die R-Strategien repurpose und recycle

R-Strategie	Norm	Kerninhalte
Repurpose	ISO 59004:2024.	Circular Economy – Vokabular, Grundsätze und Leitlinien für die Umsetzung
Recycle	DIN SPEC 91446:2021-12.	Klassifizierung von Kunststoff-Rezyklaten durch Datenqualitätslevels für die Verwendung und den (internetbasierten) Handel
Recycle	DIN EN 50625- 1:2014-09.	Sammlung, Logistik und Behandlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE) - Teil 1: Allgemeine Anforderungen an die Behandlung

Recycle	DIN EN 45553:2020-11.; DIN EN 45556:2020-03.; DIN EN 45557:2020-09.	Allgemeines Verfahren zur Bewertung der Recyclingfähigkeit und Verwertbarkeit, des Anteils an wiederverwendeten Komponenten und des Anteils an recyceltem Material von energieverbrauchsrelevanten Produkten
---------	---	--

Mit Bezug auf die Akteure der Wertschöpfungskette der E-Scooter beeinflussen die Normen und Standards folgenderweise:

- **Produktdesigner** sind für die Entwicklung und Gestaltung von E-Scootern verantwortlich. Sie berücksichtigen Normen wie DIN EN 45560:2023-10 - Entwurf. und ISO 14009:2020., um die zirkuläre Gestaltung und Materialkreisläufe in die Produktentwicklung zu integrieren.
- **Hersteller** sind für die Produktion der E-Scooter und deren Komponenten zuständig. Sie müssen die umweltfreundlichen Materialien verwenden und Produktionsprozesse optimieren, um Abfall zu minimieren. Sie richten sich nach DIN SPEC 59 Beiblatt 1:2018-11., um Umweltaspekte in den Produktionsprozess zu integrieren.
- **Zulieferer** liefern die Rohmaterialien und Bauteile für E-Scooter. Ihre Aufgabe ist es, hochwertige und nachhaltige Materialien zu liefern, die den Normen und Anforderungen der Hersteller entsprechen. Sie spielen eine wichtige Rolle bei der Einhaltung der Normen zur Materialbewertung und Recyclingfähigkeit, wie sie in DIN SPEC 91446:2021-12. Und DIN EN 45555:2020-04. beschrieben sind.
- **Händler** sind für den Vertrieb der E-Scooter verantwortlich. Sie sorgen dafür, dass die Produkte effizient und sicher an die Endkunden gelangen. Sie richten sich an Normen wie DIN EN 50625-1:2014-09., die sich mit der Sammlung und Logistik von Elektro- und Elektronikgeräten befassen.
- **Kunden** sind für die Nutzung und Pflege der E-Scooter verantwortlich. Sie sollten in der Lage sein, die Scooter gemäß den Anleitungen für Wartung und Reparatur zu pflegen.
- **Reparatur- und Wartungsdienstleister** bieten Dienstleistungen zur Reparatur und Wartung der E-Scooter an. Sie nutzen Normen wie DIN EN 50614:2021-12., die Anforderungen an die Vorbereitung für die Wiederverwendung von Elektro- und Elektronikgeräten festlegen, um sicherzustellen, dass die E-Scooter bei Bedarf effizient repariert und wiederverwendet werden können. Normen wie DIN 31051:2019-06. bieten Grundlagen für die Instandhaltung und Reparatur von E-Scootern.
- **Aufbereitungs- und Recyclingunternehmen** sind für die Rücknahme, Aufbereitung und das Recycling der Fahrzeuge verantwortlich. Sie müssen die Normen DIN EN 45553:2020-11.; DIN EN 45556:2020-03. und DIN EN 45557:2020-09. einhalten, um die Recyclingfähigkeit und Wiederverwertbarkeit der Materialien sicherzustellen und den Kreislauf zu schließen.

5 Ökologische Betrachtung

5.1 Identifikation relevanter Ökobilanzen

Zur Identifikation relevanter Ökobilanzen, wurde eine systematische Literaturrecherche in Anlehnung an die PRISMA-Methode durchgeführt (Haddaway et al., 2022). Ziel der Recherche war es, Ökobilanzen von E-Scootern zu identifizieren und anschließend miteinander zu vergleichen, um wesentliche Einflussparameter auf die Ergebnisse zu identifizieren und um daraus ökologische Optimierungspotenziale abzuleiten. Der Fokus der Analyse wurde auf das Gesamtfahrzeug E-Scooter erweitert und nicht nur auf die Komponente Batterie beschränkt, da neben der Batterie auch andere Komponenten, wie beispielsweise der Aluminiumrahmen maßgeblich zu den Umweltwirkungen des E-Scooters beitragen (Moreau et al., 2020).

Die Recherche wurde im Januar 2024 in der Datenbank Scopus mit folgender Suchstrategie durchgeführt: LCA OR "life cycle assessment" OR "life cycle analysis" AND "electric scooter*" OR "e scooter" OR "micro mobility". Es wurden alle Studien berücksichtigt, die entweder in englischer oder deutscher Sprache vorlagen und es wurden keine zeitlichen Einschränkungen gemacht. Insgesamt wurden bei der Recherche in der Scopus-Datenbank 33 Datensätze gefunden. Im ersten Schritt, dem „Screening“, wurden zunächst die Titel und Abstracts der Studien gelesen und alle Studien als relevant markiert, die eine Ökobilanz von batteriebetriebenen E-Scootern durchgeführt haben. Dabei wurden 12 Studien als nicht relevant markiert und daher nicht weiter betrachtet. Die 20 als relevant markierten Studien wurden anschließend auf ihre Eignung geprüft, indem die gesamte Studie gelesen und analysiert wurde. In diesem Schritt wurden fünf Studien ausgeschlossen. Dies lag etwa daran, dass in der Studie keine Ökobilanz von E-Scootern durchgeführt wurde, sondern beispielsweise von Solarladestationen (Schelte et al., 2021) oder an fehlendem Zugriff. Somit verblieben 15 Studien (Tabelle 12) für die weitere Analyse.

Tabelle 12 Übersicht über die identifizierten Ökobilanzen zu E-Scootern und deren Zielsetzung

#	Autor und Jahr	Ziel
1	Chang et al. (2016)	Analyse des CO ₂ -Fußabdrucks von Rollen mit Verbrennungsmotor und verschiedenen Arten von E-Scootern.
2	Chien et al. (2023)	Untersuchung der Leistungen von 156 Scooter-Modellen auf dem Markt, um potenzielle Kosten- und Kohlenstoff-Trade-offs bei Zweirad-Kaufoptionen zu verstehen.
3	Bortoli (2021)	Vergleich der Umweltwirkungen von shared Mikromobilitätsdiensten mit privaten Alternativen in Paris.
4	Bortoli and Christoforou (2020)	Anwendung der Consequential Life Cycle Assessment zur Analyse der Umweltwirkungen von Verkehrsunterbrechungen in städtischen Gebieten.
5	Echeverría-Su et al. (2023)	Analyse der Umweltwirkungen von wiederaufladbaren E-Scootern in Lima, Peru, unter Berücksichtigung lokaler Bedingungen.
6	Finke et al. (2022)	Vergleichende Bewertung zur Identifizierung umweltfreundlicher Infrastruktur und Betriebsmodi für geteilte E-Scooter, einschließlich Batteriewechsel und unterschiedlicher Sharing-Methoden.
7	Hollingsworth et al.	Bewertung der Gesamtumweltbelastung von geteilten Stand-Up-Elektrorollern.
8	Ishaq et al. (2022)	Untersuchung der Umweltbelastungen von privaten elektrischen Rollern in Turin.
9	Kazmaier et al. (2020)	Lebenszyklusanalyse zur Bewertung der Umweltwirkungen von E-Scootern in Deutschland unter Berücksichtigung verschiedener Betriebs- und Wartungsszenarien
10	Moreau et al. (2020)	Analyse der Umweltauswirkungen von geteilten und privaten E-Scootern in Lissabon durch basierend auf lokalen Daten und unter Berücksichtigung verschiedener Betriebs- und Nutzungsszenarien.

11	Reis et al. (2023)	Analyse der Umweltwirkungen von E-Scooter-Sharing-Diensten in verschiedenen Städten für verschiedene Betriebsmodelle wie stationäres und free-floating Sharing.
12	Severengiz, Finke, Schelte, and Forrister (2020)	Quantifizierung der Umweltwirkungen der Verkehrsverlagerung hin zu geteilten E-Scootern in Paris, um die Auswirkungen auf Fußgänger, Radfahrer und öffentlichen Verkehrsmitteln zu verstehen und regulatorische Maßnahmen für nachhaltige Mobilitätspolitiken vorzuschlagen.
13	Severengiz, Finke, Schelte, and Wendt (2020)	Untersuchung der Umweltauswirkungen von E-Scooter-Sharing-Diensten in Taiwan im Kontext von Industrie 4.0 und Kreislaufwirtschaft, um das Potenzial dieser Technologien zur Verbesserung der Nachhaltigkeit in der Produktion und im Betrieb zu bewerten.
14	Severengiz et al. (2021)	Analyse der Umweltauswirkungen von free-floating E-Scooter-Sharing-Diensten in den USA und Neuseeland im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln.
15	Sun and Ertz (2022)	Analyse der Auswirkungen globaler Mikromobilitätsprogramme auf die Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung verschiedener Betriebsmodelle wie stationäres und free-floating Fahrrad- und E-Scooter-Sharing.

5.2 Vergleich der Ökobilanzen

Für die Analyse wurden zunächst die Rahmenbedingungen der Lebenszyklusanalyse (LCA) herausgearbeitet. Dies beinhaltet: die funktionelle Einheit, Wirkungskategorien (und Methode), Untersuchungsrahmen, verwendete Software für die Modellierung, Datenherkunft (Primärdaten, Sekundärdaten), Geografischer Standort, die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse oder Szenarioanalyse. Eine aussagekräftige Vergleichbarkeit der Ergebnisse und eine Einordnung der Kernaussagen wird durch die Dokumentation aller relevanten Informationen ermöglicht. Tabelle 13 zeigt die wichtigsten Rahmenbedingungen der analysierten Studien im Vergleich.

Tabelle 13 Übersicht über die Rahmenbedingungen der analysierten Lebenszyklusanalysen

#	Funktionelle Einheit*	Betrachtete Wirkungskategorien	Betrachtungsrahmen	Datenherkunft	Hintergrunddaten	Standort
1	pkm	CO ₂ Fußabdruck	Betriebs-/Service-Phase	Literatur, Annahmen zu Wartungsintervallen etc.	Sima-Prov8	Taiwan
2	pkm	Lifecycle CO ₂ Emissionen (CO ₂)	Cradle to gate + Nutzungsphase	GREET Taiwan Model und öffentlich zugängliche Daten	keine Angabe	Taiwan
3	pkm	GWP, Cumulative Energy Demand (CED) und ReCiPe Endpoint Indikatoren	Cradle to grave	Literatur	Ecoinvent V3.2	Frankreich (Paris)
4	pkm	GWP	Cradle to grave	Literatur	Ecoinvent V3.2	Frankreich (Paris)
5	pkm	GWP, Feinstaub, Terrestrische Versauerung, Ozonabbaupotenzial	Cradle to grave	Deskriptive Beobachtung, Umfragen und Interviews	Ecoinvent v3.6	Peru (Lima)
6	pkm	GWP	Cradle to grave	Literatur, Stücklisten, Fragebögen und Interviews	GaBi	Deutschland (Bochum)
7	pmile	GWP, Auswirkungen auf Atemwe-	Cradle to grave	Stückliste, Interviews, App Mobili-	Ecoinvent v3.3	USA (Ra-leigh)

Ökologische Betrachtung

		ge, Versauerung, Eutrophierung		tätsanbieter		
8	pkm	GWP, Versauerungspotenzial, Eutrophierungspotenzial, Ozonabbau- und Humantoxizitätspotenzial	Cradle to gate + Nutzungsphase	Literatur, Online Umfrage	Ecoinvent 3.6	Italien (Turin)
9	pkm	GWP	Cradle to grave	Literatur, Experteninterviews	Ecoinvent V3.5	Deutschland (Karlsruhe)
10	pkm	GWP, Feinstaubbildung, Knappheit mineralischer Rohstoffe und Knappheit fossiler Rohstoffe	Cradle to gate + Nutzungsphase	Daten eines Mobilitätsanbieters, Interviews, Umfrage, Literatur	Ecoinvent 3.4	Belgien (Brüssel)
11	pkm	ILCD 2011 Midpoint Indikatoren	Cradle to grave	Umfrage, Interviews, Literatur	Ecoinvent 3 (keine genaueren Angaben zur Version)	Portugal (Lissabon)
12	pkm	GWP, Feinstaub, NO _x Emissionen, Parkplatzbedarf und Verkehrsraumbedarf	Cradle to gate + Nutzungsphase (für GWP)	Literatur	Die Daten stammen aus referenzierten Quellen	Deutschland (Bochum)
13	pkm	GWP und nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf	Cradle to grave	Interviews, Stückliste, eigene Messungen, Literatur	GaBi-Datensatz	Deutschland (Berlin)
14	e-Scooter	GWP	Cradle to grave	Stücklisten, eigene Messung, Interviews	keine Angabe	keine Angabe
15	pkm	GWP	Cradle to grave	Literatur, statistische Branchen- und Betriebsberichte	Ecoinvent 3.6	USA

**pkm: Ein Personenkilometer (pkm) ist eine Maßeinheit, die die Transportleistung von Personen misst. Sie ergibt sich aus dem Produkt der Anzahl der beförderten Personen und der zurückgelegten Strecke in Kilometern.*

Die Ergebnisse der durchgeführten Lebenszyklusanalysen sind in Abbildung 12 dargestellt. Berücksichtigt wurden die Daten aller E-Scooter-Szenarien, die in der gleichen funktionellen Einheit vorlagen. Die Werte von Hollingsworth et al. (2019) wurden von pmile auf pkm umgerechnet.

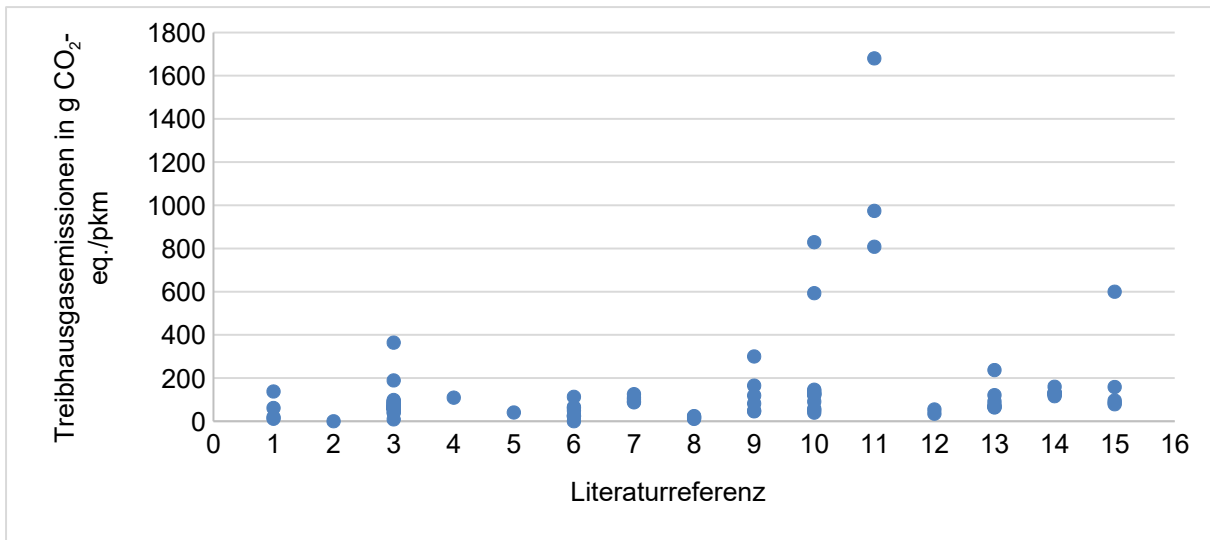


Abbildung 12 Vergleich der Treibhausgasemissionen der jeweiligen Szenarien für die 15 analysierten Studien, jeder Punkt in der Abbildung steht dabei für ein Szenario

Wie in Abbildung 12 dargestellt, variieren die Ergebnisse der Ökobilanzen erheblich. Beispielsweise liegt der höchste Wert bei 1680 g CO₂-eq./pkm (Reis et al., 2023), während der niedrigste Wert bei 8,7 g CO₂-eq./pkm (Bortoli, 2021) liegt. Diese Unterschiede sind auf verschiedene Annahmen zurückzuführen, die den Berechnungen zugrunde liegen.

5.3 Ökologische Optimierungsmaßnahmen

Um Empfehlungen hinsichtlich der Umweltfreundlichkeit von E-Scootern zu geben, wurden zunächst die Einflussfaktoren jeder analysierten Studie dokumentiert und den Lebenszyklusphasen des E-Scooters zugeordnet (Abbildung 13). Anschließend wurden Handlungsempfehlungen je Einflussfaktor abgeleitet.

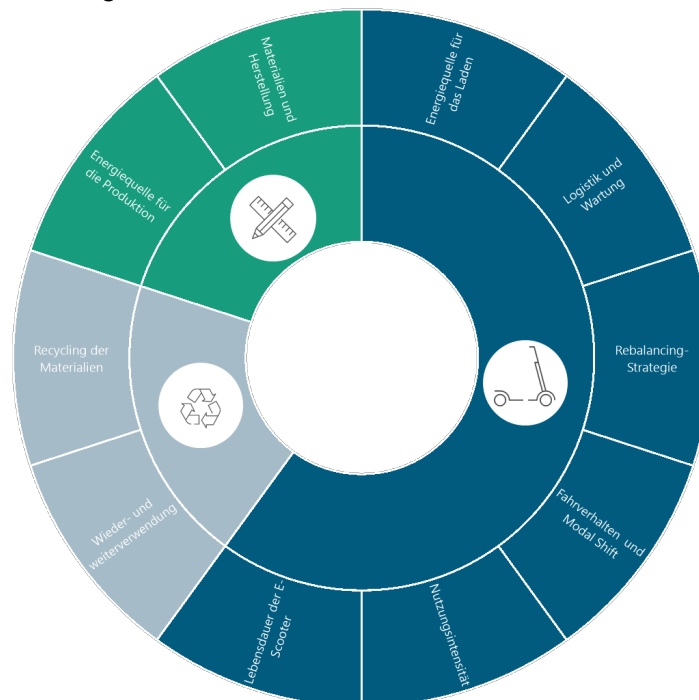


Abbildung 13 Einflussfaktoren auf die Umweltwirkungen von E-Scootern nach Lebenszyklusphase

5.3.1 Einflussfaktoren und Handlungsempfehlungen

Produktions- und Materialfaktoren

- Energiequelle für die Produktion: Die Energiequelle bezieht sich auf die Art der Energie, die für die Produktion der E-Scooter oder dessen Komponenten verwendet wird (z.B. fossile Brennstoffe oder erneuerbare Energien). Dies hängt häufig mit dem Produktionsstandort und dem lokalen Energiemix zusammen (Bortoli, 2021; Chien et al., 2023; Echeverría-Su et al., 2023; Moreau et al., 2020)
- ➔ Handlungsempfehlung: Einsatz erneuerbarer Energien für die Produktion etwa durch Eigenerzeugung oder Zukauf von Ökostrom.
- Materialien und Herstellung: Die Materialien, aus denen der E-Scooter besteht, tragen mit 68 % bis 90 % den größten Anteil zu den gesamten Umweltauswirkungen bei (Moreau et al., 2020). Dies bedeutet, dass die Herstellung und die Materialien des E-Scooters den größten Einfluss auf die Umwelt haben, im Vergleich zu anderen Phasen wie Nutzung und Entsorgung. Aluminium ist der größte Einflussfaktor in der Materialphase, da es fast die Hälfte des Gewichts des E-Scooters ausmacht. Die Herstellung von Aluminium ist energieintensiv, da viel Energie benötigt wird, um das Metall aus dem Oxid zu trennen. Die LIB, die Schaltkreise und der Elektromotor sind die nächstwichtigsten Einflussfaktoren des E-Scooters (Moreau et al., 2020).
- ➔ Handlungsempfehlung: Verwendung von Materialien mit reduzierten Umweltwirkungen etwa durch eine zirkuläre Beschaffung. Letzteres beschreibt den Einsatz erneuerbarer oder recycelter Materialien.

Betriebs- und Nutzungsfaktoren

- Energiequelle für das Laden: Die Energiequelle für das Laden beschreibt die Art der Energie, die zum Laden der E-Scooter verwendet wird (z.B. fossile Brennstoffe vs. erneuerbare Energien). In Ländern mit einem emissionsarmen Strommix, wie Norwegen, verursachen E-Scooter etwa 60 g CO₂-eq./pkm, während in Ländern mit einem kohlenstoffintensiven Strommix, wie China, der Treibhausgasausstoß bei bis zu 92 g CO₂-eq./pkm liegt, was eine Erhöhung um 50 % bedeutet (Bortoli, 2021).
- ➔ Handlungsempfehlung: Ausbau der Infrastruktur für erneuerbare Energien zur Stromversorgung der Ladestationen und Nutzung von Ökostrom zur Ladung privatgenutzter E-Scooter. Kooperationen mit Energieanbietern zur Bereitstellung von grünem Strom für Ladestationen.
- Logistik und Wartung: Dieser Einflussfaktor beschreibt die Häufigkeit und Art der notwendigen Wartungsarbeiten sowie die Effizienz der Logistikprozesse (z.B. Sammlung, Verteilung, Wartung) und die Art der Fahrzeuge, die dafür verwendet werden. Die Wartung von E-Scootern kann entweder durch den Transport zu zentralen Wartungszentren oder durch mobile Wartungsteams erfolgen (Finke et al., 2022; Severengiz et al., 2021).
- ➔ Handlungsempfehlung: Optimierung der Logistikprozesse durch den Einsatz emissionsärmeren Wartung- und Sammelfahrzeugen (z.B. Elektrofahrzeuge) und die Implementierung effizienter Wartungsstrategien, etwa durch präventive Instandhaltung (Reduktion von 4% möglich (Severengiz et al., 2021)) oder Zustandsüberwachung.
- Rebalancing-Strategie: Das Rebalancing, beschreibt die Umverlagerung von E-Scootern von überlasteten zu unterversorgten Standorten, um sicherzustellen, dass diese dort verfügbar sind, wo der Bedarf am größten ist (Chiariotti et al., 2018; Finke et al., 2022). Darüber hinaus müssen sowohl die verschiedenen Möglichkeiten der Sammlung als auch das Wiederaufladen oder der Batterietausch berücksichtigt werden (Chiariotti et al., 2018; Finke et al., 2022).
- ➔ Handlungsempfehlung: Entwicklung einer Rebalancing-Strategie, die auf optimierten Routen basiert und Einsatz von Elektrofahrzeugen. Zudem ist die Einrichtung zentraler Abstellbereiche zur besseren Organisation und Nutzung der Fahrzeuge sinnvoll.

- Fahrverhalten und Modal Shift: E-Scooter werden zunehmend in städtischen Gebieten genutzt und könnten möglicherweise einen Modal Shift (eine Verkehrsverlagerung) von Autos hin zu nachhaltigeren Mobilitätsoptionen (wie E-Scootern) bewirken (Bortoli & Christoforou, 2020).
➔ Handlungsempfehlung: Anreize zur Förderung einer Verkehrsverlagerung hin zu elektrischen und geteilten Mobilitätslösungen durch verbesserte Infrastruktur und Verfügbarkeit.
- Nutzungsintensität:
Die Nutzungsintensität beschreibt die Häufigkeit und Dauer der Einsätze eines E-Scooters. Sie zeigt, wie viele Kilometer oder Fahrten ein E-Scooter im Verlauf seiner Lebenszeit absolviert. Die Nutzungsintensität wirkt sich direkt auf die Ökobilanz von E-Scootern aus, da eine häufigere Nutzung die Umweltbelastung pro Kilometer reduziert. Je höher die Nutzungsintensität, desto besser verteilen sich die Umweltwirkungen auf die gesamte Einsatzdauer (Ishaq et al., 2022).
➔ Handlungsempfehlung: Förderung von Sharing-Systemen für E-Scooter, um eine höhere Auslastung und eine längere Nutzungsdauer pro Fahrzeug zu erreichen.
- Lebensdauer der E-Scooter:
Die Lebensdauer eines E-Scooters beeinflusst die Ökobilanz, da eine längere Nutzungszeit die Umweltauswirkungen der Herstellung und Entsorgung auf mehr Kilometer verteilt und so die Umweltbelastung pro gefahrenem Kilometer reduziert (Moreau et al., 2020; Reis et al., 2023; Severengiz et al., 2021; Sun & Ertz, 2022).
➔ Handlungsempfehlung: Förderung von langlebigen E-Scootern durch verbesserte Qualität. Angesichts des erheblichen Einflusses langlebiger Komponenten auf die Produktionsphase könnte es sinnvoll sein, in privaten E-Scootern weniger robuste Bauteile zu verwenden, da diese in der Regel sorgsamer behandelt und weniger von Vandalismus betroffen sind; jedoch erfordern städtische Gegebenheiten, wie beispielsweise Pflastersteine, in manchen Städten zuverlässigere und widerstandsfähigere Komponenten (Severengiz et al., 2021). Eine verlängerte Lebensdauer setzt zudem eine gute Reparierbarkeit voraus, die etwa durch ein modulares Produktdesign ermöglicht werden kann. Bei E-Scootern mit fest verbauten Batterien ist die Lebensdauer des Fahrzeugs jedoch durch die Lebensdauer der Batterie begrenzt.

End-of-Life

- Wieder- und Weiterverwendung von Komponenten:
Trotz der Tatsache, dass der Großteil der analysierten Studien eine "Cradle-to-Gate"-Betrachtung durchführte, wurde die Wieder- und Weiterverwendung von Komponenten lediglich in einer Studie untersucht (Severengiz et al., 2021). Severengiz et al. (2021) analysierten am Beispiel von austauschbaren Batterien den Einfluss von Modularität und Batteriewiederverwendung und konnten eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 11 % nachweisen.
➔ Handlungsempfehlung: Förderung der Wieder- und Weiterverwendung von intakten Komponenten aus abgelegten E-Scootern.
- Recycling der Materialien Recyclingstrategien für Materialien am Ende der E-Scooter Lebensdauer (wie etwa das Recycling der Batterie oder des Antriebsstrangs) können die Umweltauswirkungen jedoch erheblich verringern, mit einer potenziellen Reduktion der Treibhausgasemissionen von bis zu 50 % (Reis et al., 2023).
➔ Handlungsempfehlung:
Etablierung eines Rückführlogistiksystems zur effizienten Sammlung und Verwertung von E-Scooter-Komponenten und -Batterien.

6 Zirkuläre Geschäftsmodelle

6.1 Literaturrecherche und – Analyse

Um relevante Studien zu zirkulären Geschäftsmodellen im E-Scooter-Sektor zu identifizieren, wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Diese zielte darauf ab, wissenschaftliche Arbeiten zu finden, die die Anwendung von Kreislaufwirtschaftsprinzipien in Geschäftsmodellen anwenden. Der Schwerpunkt lag auf Studien, die sich mit der Implementierung dieser Prinzipien in der Branche befassen, um Einflussfaktoren und Optimierungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Die Literaturrecherche wurde in der wissenschaftlichen Datenbank Scopus durchgeführt. Es erfolgte die Berücksichtigung aller Studien, die in englischer oder deutscher Sprache verfasst sind. Um einen umfassenden Überblick über die Entwicklung und den aktuellen Stand der Forschung zu erhalten, wurden keine zeitlichen Einschränkungen vorgenommen. Im ersten Schritt des Screenings erfolgte eine Überprüfung der Titel und Abstracts der Studien, um die Relevanz für das Thema zirkuläre Geschäftsmodelle im E-Scooter-Bereich festzustellen. So wurden 11 relevante Studien identifiziert und in die weitere Analyse aufgenommen (Tabelle 14).

Tabelle 14 Übersicht der einbezogenen Quellen der Literaturanalyse zu zirkulären Geschäftsmodellen

#	Autor und Jahr	Titel
1	Davim et al. (2024)	E-Mobility in Electrical Energy Systems for Sustainability
2	Ixmeier et al. (2023)	How to unlock the potential of information systems for a circular economy
3	Li et al. (2024)	Smart and Sustainable Interactive Marketing
4	Rześny-Cieplińska et al. (2023)	Emerging trends for urban freight transport–The potential for sustainable micromobility
5	Atif (2023)	Analyzing the alignment between circular economy and industry 4.0 nexus with industry 5.0 era: An integrative systematic literature review
6	Shabur (2024)	A comprehensive review on the impact of Industry 4.0 on the development of a sustainable environment
7	Balletto et al. (2022)	Smart City and Industry 4.0: New Opportunities for Mobility Innovation
8	Pouri and Hilty (2020)	The Relevance of Digital Sharing Business Models for Sustainability
9	Morella et al. (2023)	Technologies Associated with Industry 4.0 in Green Supply Chains: A Systematic Literature Review
10	Gompf et al. (2020)	Towards social life cycle assessment of mobility services: systematic literature review and the way forward
11	Circular Economy Initiative Deutschland	Zirkuläre Geschäftsmodelle: Barrieren überwinden, Potenziale freisetzen

Weitere relevante Veröffentlichungen wurden über Google Scholar gezielt recherchiert.

Die Literatur beschreibt ein Geschäftsmodell als “die Logik, wie eine Organisation Werte schafft, liefert und erfasst“ (Osterwalder & Pigneur, 2011, p. 14). Traditionelle Geschäftsmodelle folgen meist einem linearen Ansatz der Wertschöpfung, der dem Prinzip „Take-Make-Dispose“ entspricht. Dieser Ansatz umfasst die folgenden Schritte (Guldmann, 2017; Rashid & Malik, 2023):

- Ressourcengewinnung: Entnahme von Rohstoffen aus der Umwelt.
- Produktion: Umwandlung der Rohstoffe in ein Produkt.
- Vertrieb: Verkauf und Lieferung des Produkts an den Endkunden.
- Nutzung: Gebrauch des Produkts durch einen Kunden für einen bestimmten Zeitraum (Nutzungsdauer).
- Entsorgung: Am Ende der Nutzungsdauer erfolgt die Entsorgung des Produkts, oft auf Mülldeponien oder durch Verbrennung.

Darüber hinaus konzentrieren sich traditionelle Geschäftsmodelle stark auf die Maximierung des Verkaufs neuer Produkte, was häufig zu einem hohen Ressourcenverbrauch und erheblichen Abfallmengen führt (Sharma et al., 2021).

Im Gegensatz dazu verfolgen zirkuläre Geschäftsmodelle einen kreislauffähigen Ansatz (Guldman, 2017). Basierend auf geschlossenen Kreislaufsystemen (Closed-Loop-Systeme), besteht das Ziel darin, die Lebensdauer von Produkten und deren Komponenten zu verlängern und diese möglichst lange im Kreislauf zu halten, um den Ressourcenbedarf zu reduzieren. Dabei sind modulare Designs, Reparaturfähigkeit und Recycling entscheidende Faktoren (Atif, 2023).

Zirkuläre Geschäftsmodelle bieten Unternehmen sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Vorteile (Atif, 2023). Allerdings entstehen Herausforderungen, da diese Modelle eine enge Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Akteuren entlang der Wertschöpfungskette erfordern. Um den Umfang und die Qualität der erbrachten Dienstleistungen besser zu vermitteln, können Klassifizierungen wie Taxonomien helfen, indem sie den Beteiligten ein klareres Verständnis der angebotenen Leistungen und deren Wert bieten (Circular Economy Initiative Deutschland). Die Rolle digitaler Technologien und Plattformen ist in diesem Zusammenhang besonders hervorzuheben. Digitale Plattformen tragen dazu bei, die Effizienz von Wartungs- und Rückführungsprozessen zu steigern und unterstützen somit den Erfolg zirkulärer Geschäftsmodelle (Atif, 2023).

In zirkulären Geschäftsmodellen spielen R-Strategien eine zentrale Rolle, da sie die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft widerspiegeln. Diese Strategien zielen darauf ab, den Material- und Ressourcenverbrauch zu minimieren, Abfälle zu reduzieren und den Lebenszyklus von Produkten zu verlängern. Je nach Quelle variiert die Anzahl der Strategien zwischen drei und neun, was dazu führt, dass die R-Strategien nicht immer eindeutig voneinander abzugrenzen sind (Kirchherr et al., 2017). Das 9-R-Framework sortiert die Strategien absteigend nach ihrem Zirkularitätslevel (Kirchherr et al., 2017). In einer Produktkette bedeutet ein höheres Zirkularitätslevel der Materialien, dass diese Materialien länger im Kreislauf verbleiben und am Ende der Nutzungsphase wiederverwendet werden können, idealerweise ohne Qualitätsverlust. Dadurch reduziert sich der Bedarf an Primärmaterial zur Produkterzeugung. Die R-Strategien lassen sich in drei Leitprinzipien gliedern. Die Strategien R0 (Refuse) bis R2 (Reduce) zielen darauf ab, den primären Rohstoffverbrauch zu minimieren oder zu vermeiden. R0 beschreibt ein Konzept, Produkte überflüssig zu machen, wenn ihre Funktionen anders erfüllt werden können. R1 (Rethink) beschreibt eine erhöhte Nutzungseffizienz, indem Produkte von mehreren Personen genutzt werden, ohne sie zu besitzen, z.B. in Sharing-Systemen. R2 definiert eine verbesserte Produktionseffizienz, um den Materialbedarf zu senken, beispielsweise durch optimierte Herstellungsprozesse. Die Strategien R3 (Reuse) bis R7 (Repurpose) haben das Ziel, Rohstoffe innerhalb des Wirtschaftssystems zu halten. R3 umfasst die Wiederverwendung von Produkten ohne Veränderung, R4 (Repair) bezieht sich auf die Reparatur defekter Produkte, R5 (Refurbish) auf die Verbesserung und Modernisierung von Produkten, R6 (Remanufacture) auf die Wiederverwendung von intakten Komponenten in neuen Produkten und R7 auf die Umnutzung von Produktkomponenten für andere Zwecke.

Falls R0 bis R7 nicht anwendbar sind, kommen R8 (Recycle) und R9 (Recover) zum Einsatz, um Rohstoffe aus nicht mehr nutzbaren Produkten zurückzugewinnen. R8 beschreibt das Recycling, bei dem Materialien wiederverwertet werden, während R9 die Gewinnung von Energie aus Abfällen umfasst, wenn das Recycling nicht möglich ist (Kirchherr et al., 2017; Mast et al.).

Laut analysierter Literatur können sechs Zirkuläre Geschäftsmodellmuster identifiziert werden: Circular Supplies, Co-product Recovery, Ressourcenrückgewinnung, Produktlebenszyklus-

verlängerung, Sharing-Plattform und Product-as-a-Service (McDermott et al., 2019). Diese Modelle können nach ihrer Hauptzielsetzung in drei Hauptkategorien unterteilt werden: Ressourcenvermeidung, Lebensdauerverlängerung und Verwertung.

Ressourcenvermeidung

- Circular Supplies (Zirkuläre Beschaffung): In diesem Modell stehen zwei Hauptziele im Vordergrund: Erstens der Ersatz knapper Ressourcen durch vollständig erneuerbare, recycelbare oder biologisch abbaubare Materialien, und zweitens die Beseitigung von Ineffizienzen sowie die Reduzierung von Abfällen. Dieses Modell eignet sich besonders für Unternehmen, die mit begrenzten Rohstoffen arbeiten oder einen großen ökologischen Fußabdruck haben. Es basiert darauf, Materialien möglichst lange im Kreislauf zu halten, bevor sie aussortiert werden. Dies erfordert, dass Materialien rein und unbelastet sind, um einen geschlossenen Kreislauf zu ermöglichen.
- Co-product Recovery: In diesem Modell dienen residuale oder sekundäre Outputs eines Prozesses (oder einer Wertschöpfungskette) als wertvolle Inputs für einen anderen Prozess oder eine andere Wertschöpfungskette. Dies ermöglicht eine effizientere Ressourcennutzung, da Abfall- oder Nebenprodukte nicht entsorgt, sondern in neue Produktionszyklen integriert sind. Dadurch lässt sich der Materialeinsatz optimieren und die Abhängigkeit von primären Rohstoffen verringern.
- Product-as-a-Service: In diesem Modell werden Produkte durch Leasing- oder Nutzungsvereinbarungen bereitgestellt, anstatt sie direkt zu verkaufen. Das Unternehmen ist daher dafür verantwortlich, die Langlebigkeit und Aufrüstbarkeit der Produkte zu gewährleisten. Traditionell wurden Langlebigkeit und Wiederverwendbarkeit als Risiko für die Kannibalisierung des eigenen Geschäfts betrachtet, aber in diesem Modell werden sie zu Umsatztreibern konzipiert.
- Sharing-Plattform: In diesem Modell wird die Zusammenarbeit zwischen Nutzern und Nutzerinnen gefördert, indem Plattformen angeboten werden, die das Teilen von Überkapazitäten oder nicht vollständig genutzten Ressourcen ermöglichen. Dieses Modell wird oft von Unternehmen genutzt, die die geteilten Produkte selbst nicht herstellen, könnte aber auch für Hersteller relevant sein, deren Produkte oder Vermögenswerte eine geringe Auslastung oder Eigentumsquote haben. Die Wertschöpfung erfolgt durch intensivere Nutzung von Ressourcen und Produkten.

Lebensdauerverlängerung

- Produktlebenszyklusverlängerung: Dieses Modell zielt darauf ab, die Lebensdauer von Produkten und Anlagen durch Reparatur, Aufrüstung, Wiederaufbereitung oder Wiedervermarktung zu verlängern. Es eignet sich besonders für kapitalintensive B2B-Unternehmen, wie Hersteller von Industrieausrüstung; sowie für B2C-Unternehmen, in denen neue Produkte nur wenig zusätzlichen Nutzen gegenüber früheren Versionen bieten. Die Wertschöpfung erfolgt durch die Verlängerung des Nutzungszyklus der Produkte.

Verwertung

- Ressourcenrückgewinnung: In diesem Modell liegt der Fokus darauf, den eingebetteten Wert am Ende eines Produktlebenszyklus in einen neuen Lebenszyklus zu überführen. Dies geschieht durch innovative Recycling- und Upcycling-Services. Beispiele dafür sind industrielle Symbiose, geschlossene Recyclingkreisläufe und Cradle-to-Cradle-zertifizierte Produkte. Dieses Modell ist besonders relevant für Unternehmen, die große Mengen an Nebenprodukten haben oder deren Abfallmaterialien kosteneffektiv wiedergewonnen werden können.

Änderungen in der Akteurs Landschaft

Die Umstellung auf Ansätze der Circular Economy und die Integration der R-Strategien in die Geschäftsmodelle führen zur Entstehung neuer Akteure, während gleichzeitig Anpassungen bei den bestehenden Akteuren entlang der Wertschöpfungskette erforderlich werden (Circular Economy Initiative Deutschland).

Neue Akteure:

- Drittanbieter von Wiederaufbereitungs- und Wiedergewinnungsdiensten: Unternehmen, die auf die Sammlung, Wiederaufbereitung und das Recycling von gebrauchten Geräten spezialisiert sind. Ihr Geschäftsfeld umfasst die Wiederherstellung, Wiederverwertung und den effizienten Umgang mit Altgeräten. Dazu gehören unter anderem Sammelstellen, Teststellen und Logistikdienstleister, die Recyclern zuarbeiten.

Anpassungsbedürftige Akteure:

Nach dem ersten Screening wurden 10 Studien als relevant identifiziert und in die weitere Analyse aufgenommen.

Zusätzlich wurde die Publikation „Zirkuläre Geschäftsmodelle: Barrieren überwinden, Potenziale freisetzen“ der Circular Economy Initiative Deutschland (CEID) untersucht.

Die analysierten Studien zeigten, dass zirkuläre Geschäftsmodelle im E-Scooter-Sektor ein hohes Potenzial zur Reduktion von Umweltbelastungen und zur Steigerung der wirtschaftlichen Effizienz haben. Ein zentrales Thema ist dabei die Bedeutung von langlebigen, modularen Designs, die Reparatur und das Recycling erleichtern. Zudem wird häufig betont, dass die Kooperation zwischen Herstellern, Betreibern und Städten entscheidend für den Erfolg dieser Modelle ist. Studien heben auch die Rolle von technologischen Innovationen, wie digitalen Plattformen zur Flottenverwaltung und Datenanalyse, hervor, die zur Optimierung von Wartungs- und Rückführungsprozessen beitragen. (Quellen)

In zirkulären Geschäftsmodelle ist das Hauptziel die Produktlebensdauer zu verlängern, durch die Wiederverwendung und Wiederaufbereitung des Produktes. Zunächst ist es wichtig, alle beteiligten Stakeholder entlang der Wertschöpfungskette in den Prozess einzubeziehen. Obwohl die Rollen der einzelnen Akteure in zirkulären Geschäftsmodellen entscheidend sind, wird diesem Aspekt in der Literatur bisher zu wenig Aufmerksamkeit gewidmet.

Zirkulärere Geschäftsmodelle erfordern das Verständnis ihrer Vielfalt und Komplexität. Klassifizierungen, wie Typologien und Taxonomien, erleichtern dies, indem sie zentrale Aspekte wie zirkuläre Strategien und den Dienstleistungsgrad berücksichtigen (Quelle). Laut der analysierten Literatur führen zirkuläre Geschäftsmodelle zur Entstehung neuer Akteure und erfordern Anpassungen bei bestehenden Akteuren. (Quelle)

- Ressourcenanbieter: Traditionelle Ressourcenanbieter müssen ihren Fokus von der Gewinnung nicht-erneuerbarer Rohstoffe auf die Rückgewinnung und das Recycling von Materialien umsetzen. Dies bedeutet, dass sie ihre Geschäftsmodelle auf geschlossene Kreislaufsysteme umstellen müssen.
- Vertikal integrierte Hersteller: Diese Unternehmen müssen ihr Geschäftsmodell über den reinen Verkauf von Produkten hinaus erweitern. Sie sollten zusätzliche nutzungsbezogene Dienstleistungen sowie End-of-Life-Services anbieten, um den gesamten Lebenszyklus ihrer Produkte abzudecken.
- Einzelhändler: Einzelhändler müssen ihre Strategie ändern, um nicht nur Produkte zu verkaufen, sondern auch Dienstleistungen wie Reparatur und Rücknahme anzubieten.

Angesichts der komplexen Struktur zirkulärer Geschäftsmodelle sind Produkthierarchien von entscheidender Bedeutung. Um den Fokus auf Langlebigkeit, Reparierbarkeit, Recyclingfähigkeit und den Einsatz reiner Materialien zu behalten, ist ein zentraler Aspekt der finanzielle Anreiz für die Akteure. Produkte sollten nur als Abfall betrachtet werden, wenn sie nicht mehr repariert oder wiederverwendet werden können. Hersteller sollten verpflichtet sein, über den gesamten Lebenszyklus ihrer Produkte Verantwortung zu übernehmen, einschließlich der Rücknahmeverpflichtung und der Förderung von Langlebigkeit (Forslind, 2005). Alle Produkte müssen den Anforderungen an zirkuläres Design entsprechen, und das Design sollte mit Reparaturdiensten kombiniert werden. Ein zentrales Registrierungssystem könnte hierbei eine wichtige Rolle spielen, indem es den Marktzugang nur für Produkte ermöglicht, die zirkuläre Eigenschaften erfüllen. Zudem sollten Produkte digital identifizierbar sein, um die Vorteile digitaler Technologien für die Zirkularität nutzen zu können (Ixmeier et al., 2023).

6.2 Best Practice Beispiele

Im folgenden Abschnitt werden konkrete Beispiele vorgestellt, die veranschaulichen, wie Unternehmen zirkuläre Geschäftsmodelle erfolgreich umgesetzt haben. Diese Best-Practice-Beispiele sollen Möglichkeiten aufzeigen, wie tragfähige Kreislaufwirtschaftsmodelle in der Praxis gestaltet werden können.

Bei der Auswahl der Best-Practice-Beispiele wurde das 9R-Framework herangezogen (Tabelle 15) und für jedes Kreislaufwirtschaftsprinzip ein Beispiel-Unternehmen ausgewählt (Kirchherr et al., 2017). Der Schwerpunkt lag dabei auf Akteuren im Kontext E-Scooter.

Zur Darstellung der Geschäftsmodelle wird zunächst ein Überblick über das jeweilige Beispielunternehmen gegeben, gefolgt von einer Darstellung mit Hilfe des Circular Business Model Canvas (Abbildung 14, Abbildung 15, Abbildung 16) (McDermott et al., 2019). Das Business Model Canvas (BMC) ist ein strategisches Management-Tool, das Unternehmen hilft, ihre Geschäftsmodelle klar und strukturiert darzustellen. Es besteht aus neun Bausteinen: Kundensegmente, Wertangebote, Kanäle, Kundenbeziehungen, Einnahmequellen, Ressourcen, Aktivitäten, Partner und Kostenstruktur. Diese Elemente ermöglichen es, die wichtigsten Aspekte eines Geschäftsmodells auf einer einzigen Seite zu visualisieren und zu analysieren. Das zirkuläre BMC stellt eine Erweiterung um ökologische und soziale Aspekte dar.

Tabelle 15 Übersicht und Erklärung über die Zirkulären Wertschöpfungsmöglichkeiten und zirkulärer Geschäftsmodellmuster zur Auswahl der Best Practices

	Erklärung	Zirkuläres Geschäftsmodell
Intelligenterer Produktnutzung- und Herstellung	Entwicklung von Produkten und Prozessen, die Ressourcen effizienter nutzen	Zirkuläre Beschaffung, Product-as-a-Service, Sharing-Plattform
Lebensdauererlängerung eines Produkts oder von Teilen davon	Maßnahmen zur Verlängerung der Nutzungsdauer von Produkten	Reparatur, Refurbishing, Remanufacturing, Repurposing
Sinnvolle Materialverwertung	Effiziente Nutzung und Wiederaufbereitung von Materialien	Recycling

Beispiel 1: Tier Dott

TIER-Dott ist ein führendes Unternehmen im Bereich der Mikromobilität, das durch die Fusion von TIER Mobility und Dott im März 2024 entstanden ist (Dott, 2024). Das Unternehmen bietet elektrisch betriebenen Kleinfahrzeugen an, darunter E-Scooter, E-Mopeds und E-Fahrräder. TIER-Dott hat sich zum Ziel gesetzt, den Stadtverkehr nachhaltiger und umweltfreundlicher zu gestalten. Ein Merkmal von TIER-Dott ist seine Verpflichtung zur Klimaneutralität. Seit Januar 2020 ist TIER der erste klimaneutrale Anbieter im Bereich der Mikromobilität (TIER, 2024). Das Unternehmen reduziert die Emissionen, die beim Aufladen der Fahrzeuge entstehen, sondern auch den CO₂-Ausstoß aus Produktion, Betrieb und Transport (ClimatePartner, 2024). Im Kontext von E-Scootern trägt TIER-Dott zur Förderung der Mikromobilität in städtischen Gebieten bei.



Abbildung 14 Ausgefülltes Circular Business Model Canvas am Bsp. TierDott (Vizologi, 2024)

Beispiel 2: Trittbretthelden

Trittbretthelden ist ein führendes Unternehmen im Bereich der Elektromobilität, das elektrisch betriebenen Fahrzeugen anbietet, darunter E-Scooter, E-Roller, E-Motorräder und Reha-Scooter. Neben dem Verkauf von Fahrzeugen bietet Trittbretthelden auch umfangreiche Reparatur- und Inspektionsdienste in ihrer „Helden Werkstatt“ an. Zudem können in einem Onlineshop Ersatzteile bestellt und in einem Chat auf der Website Fragen zu den Produkten, Ersatzteilen und zum Reparaturservice gestellt werden (Trittbrett Helden, 2024).

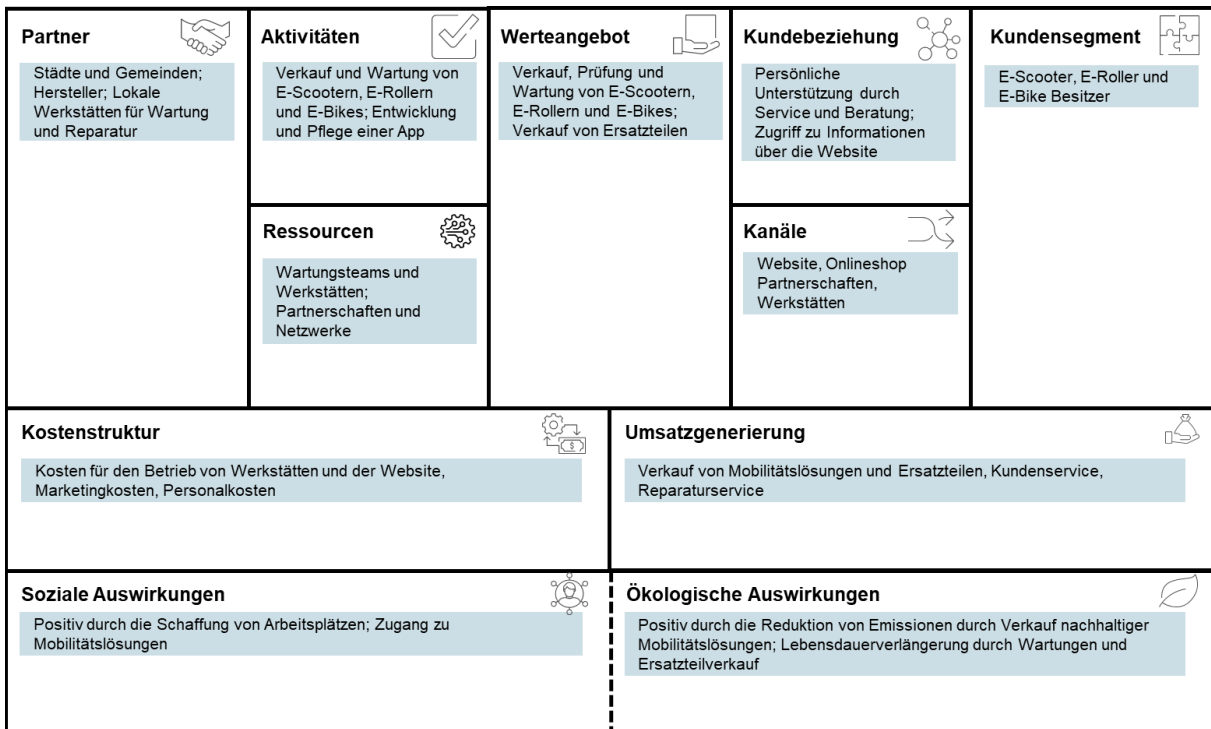


Abbildung 15 Ausgefülltes Circular Business Model Canvas am Beispiel Trittbretthelden

Beispiel 3: Umicore

Umicore ist ein weltweit führendes Materialtechnologie- und Recyclingunternehmen, das sich auf die Entwicklung und Herstellung von Materialien für saubere Mobilität und saubere Luft spezialisiert hat. Das Unternehmen verfolgt einen zirkulären Geschäftsansatz, bei dem Altmetalle recycelt und wiederverwendet werden, um die Umweltbelastung zu minimieren (Umicore Deutschland, 2024b).

Im Kontext von E-Scootern spielt Umicore eine wichtige Rolle im Bereich des Batterierecyclings. Umicore ist Partner der eSkootr Championship™ (eSC), einer Rennserie für E-Scooter, und recycelt die Batterien der S1-X E-Scooter (Umicore Deutschland, 2024a). Diese Partnerschaft zielt darauf ab, eine nachhaltige und CO₂-neutrale Rennserie zu schaffen. Umicore verwendet pyrometallurgische Verfahren, um wertvolle Metalle aus den Batterien zurückzugewinnen und sie in neue, wiederaufladbare Batterien zu integrieren. Durch diese Zusammenarbeit trägt Umicore nicht nur zur Reduzierung von Abfall und Emissionen bei, sondern fördert auch die Mikromobilität als umweltfreundliche Alternative in städtischen Gebieten. Die recycelten Metalle können wiederverwendet werden, was den CO₂-Fußabdruck erheblich reduziert.

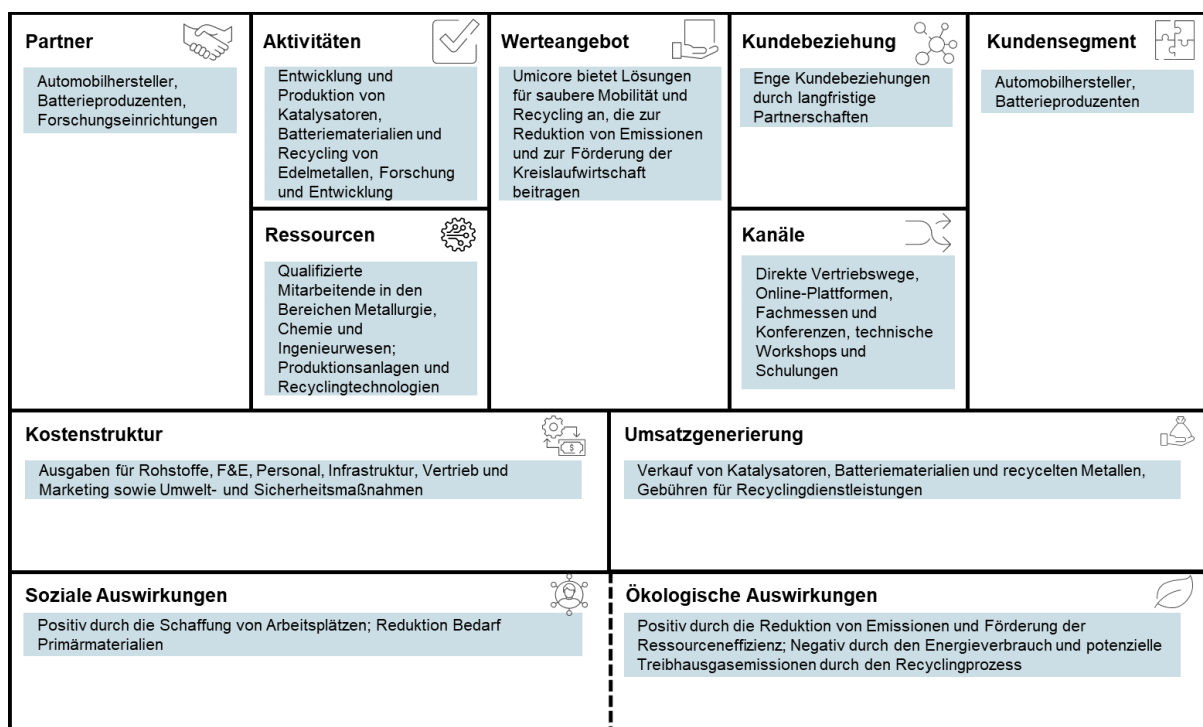


Abbildung 16 Ausgefülltes Circular Business Model Canvas am Beispiel Umicore

Nach der Analyse der Geschäftsmodelle wurden die Erfolgsfaktoren jedes Modells identifiziert. Diese sind in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16 Identifizierte Erfolgsfaktoren je Geschäftsmodell

Geschäftsmodell	Erfolgsfaktoren
Reparaturservice	<ul style="list-style-type: none"> • Ersatzteile und Komponenten, die leicht repariert werden können (Modularität, Standardisierung) • Optimierung der Materialnutzung bei Reparaturen • Rücknahme und Wiederverwendung von Ersatzteilen • Zusammenarbeit mit Herstellern und Händlern für Ersatzteile • Einsatz von Diagnosetools für Reparaturen • Anreize für Kunden, ihre Fahrzeuge zur Reparatur zu bringen
Sharing-Plattform	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeuge, die für einfache Wartung und Reparatur ausgelegt sind (z.B. austauschbare Batterie) • Effiziente Nutzung von Fahrzeugflotten durch Sharing Angebote

Recycling	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von Fahrzeugen am Ende ihrer Lebensdauer für Ersatzteile • Wiederverwendung von recycelten Materialien in neuen Produkten • Kooperationen mit Herstellern für die Rücknahme von Materialien
-----------	---

6.3 Experteninterviews

Für die Durchführung der Experteninterviews wurden zunächst die relevanten Akteure (siehe Kapitel 2 und 3) identifiziert und ein Akteursnetzwerk erstellt. Anschließend erfolgte eine Recherche zur Identifikation konkreter Akteure in Baden-Württemberg, gefolgt von einer Erweiterung auf ganz Deutschland. Der Fokus lag hierbei hauptsächlich auf Entsorgungsunternehmen, Recyclingfirmen, Werkstätten und Herstellern sowie Mobilitätsanbietern von E-Scootern. Ziel war es, von jeder Akteursgruppe mindestens ein Interview durchzuführen, um die Geschäftsmodelle und aktuellen Herausforderungen und Treiber der jeweiligen Akteure zu verstehen. Die Interviewanfragen wurden über die Kommunikationskanäle E-Mail, Telefon und LinkedIn an die identifizierten Akteure gesendet. Zur Unterstützung der Akquise wurde ein OnePager erstellt, der eine kurze Vorstellung des Projekts sowie Informationen zum Zeitraum und potenzieller Dauer des Interviews enthielt. Insgesamt wurden 58 Unternehmen über einen Zeitraum von zwei Monaten kontaktiert. Die Auflistung der kontaktierten Unternehmen ist im Anhang 9.2 zu finden.

Tabelle 17 beschreibt die Unternehmen mit positiver Rückmeldung nach Branche, Umsatz, Mitarbeiterzahl sowie die Funktion und Position der Interviewpartner. Zusätzlich ist die Dauer der Interviews in Minuten angegeben, wobei Begrüßung und abschließende Kommunikation mit dem Experten nicht berücksichtigt wurden.

Tabelle 17 Überblick über Experten der durchgeführten Interviews

Interview Nummer	Position	Branche	Mitarbeiterde	Umsatz in Mio €	Interview Dauer in min
1	Anonym	Recycling	Anonym	Anonym	25
2		Recycling	11.900	3.900	40
3	Service, Vertrieb, Logistik	Hersteller	20	5,4	
4	Geschäftsführer, Service, Verkauf	Werkstatt, Händler	15	-	90
5	Geschäftsführer	Recycling	230	1,8 (Gewinn)	

Für die Durchführung der Interviews wurde ein Interviewleitfaden entwickelt, der zunächst allgemeine Fragen zum Kerngeschäft und Geschäftsmodell der Akteure stellte. Anschließend folgten spezifische Fragen, die auf die Besonderheiten und Herausforderungen jeder Akteursgruppe ausgelegt waren.

6.3.1 Analyse durchgeführter Interviews nach Branche

Hersteller von E-Scootern

E-Scooter können eine umweltfreundliche Alternative für den urbanen Individualverkehr darbieten. E-Scooter-Hersteller sehen sich dabei mit einer Reihe von Herausforderungen und Hemmnissen konfrontiert, es gibt aber auch Treiber, die solche Unternehmen voranbringen. Eine der größten Herausforderungen besteht in der Einhaltung von Regularien und der zusätzlichen Bürokratie, die besonders für kleine Unternehmen belastend ist. So ist beispielsweise die Mitnahme von E-Scootern in Verkehrsverbänden aufgrund von Sicherheitsbedenken verboten. Zudem sind E-Scooter im Vergleich zu E-Bikes stärker reguliert, was zusätzliche Zulassungen und umfangreiche Tests, erforderlich macht. Dadurch werden E-Scooter vergleichsweise teuer und unattraktiv.

Ein weiteres Hemmnis ist die Transparenz in der Lieferkette. Das befragte Unternehmen bezieht E-Scooter von einem Lieferanten aus China. Obwohl Zertifikate und regelmäßige Vor-Ort-Prüfungen eingesetzt werden, können Rohmaterialien wie Kunststoffgranulat und Aluminium nicht auf ihre Herkunft und Zusammensetzung geprüft werden. Dies kann die Rückverfolgbarkeit und letztlich die Nachhaltigkeit der Produkte beeinträchtigen. Auch die Vielfalt der Bauteile und die geringe Wertigkeit bestimmter Komponenten erschweren die Wiederverwertung und Rückführung in die Produktion.

Dem entgegenwirken kann eine engere Zusammenarbeit zwischen Hersteller Lieferanten/Herstellern von Bauteilen, wodurch die Entwicklung und Anpassung der Produkte erleichtert wird. Hierbei liegt der Fokus auf Verbesserung der Rücknahme von zurückgeschickten Bauteilen und den Einsatz von recyclingfähigen Materialien in Bauteilen zu stärken. Metall und nicht trennbare Verbindungen sollten und werden bevorzugt, wobei das durch natürliche Prozesse schon geschieht.

Ergänzend kann eine Verankerung der Nachhaltigkeit in der Unternehmensstrategie dazu beitragen diese als Entscheidungskriterium in Unternehmensprozesse zu integrieren und somit indirekt dazu beitragen die Nachhaltigkeit des Gesamtproduktes erhöhen. Unternehmensinterne Maßnahmen wie beispielsweise ein eigener Gemüsegarten, Ladesäulen und die Nutzung von E-Autos durch Mitarbeiter tragen dazu ebenso bei wie produkt- und kundenspezifische Maßnahmen wie eine lange (7-jährige) Ersatzteilgarantie zur Verlängerung der Produktlebensdauer oder die Beachtung kreislauffähiger Stoffe im Entwicklungsprozess.

Insgesamt balanciert der E-Scooter-Hersteller zwischen regulatorischen Herausforderungen und bürokratischen Hürden auf der einen und starken internen Treibern für Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft auf der anderen Seite. Die R-Strategien sind zwar kein Begriff, werden teilweise bereits implizit umgesetzt.

Werkstätten

Da im Bereich der E-Scooter-Reparatur kein Interviewpartner verfügbar war, wurde ein lokales Fahrradgeschäft, das große Mengen an E-Bikes verkauft und repariert, als Interviewpartner ausgewählt. Die Expertise des Fahrradgeschäfts wurde als ausreichend repräsentativ eingeordnet, da dieses Leichtverkehrsmittel repariert und zusätzlich E-Scooter verkaufte.

Bei der Handhabung von Batterien zeigt sich, dass vormontierte E-Bikes mit bereits im Fahrrad verbauten Batterien geliefert werden. Äußerlich ist an den Kartons nicht zu erkennen, dass ein Li-Ionen-Akku enthalten ist. Lediglich die leere Ursprungsverpackung des Akkus wird dem Karton beigelegt. Dies deutet darauf hin, dass in Leichtverkehrsmitteln verbaute Akkus anders behandelt werden als nicht angeschlossene Akkus.

Die Entsorgung und Rücknahme von ausgedienten Akkus erfolgt in speziellen, verschließbaren Tonnen, die von Stiftungen wie der GRS Batterien Service bereitgestellt werden. Diese werden nach Bedarf beim lokalen Wertstoffhof abgegeben, wobei größere Mengen an Akkus deren Kapazität übersteigen können. Bei Defekten, wie einem fehlerhaften Bauteil des Batteriemanagementsystem, können zertifizierte Werkstätten bestimmte Daten auslesen und bewerten, ob eine Rücksendung des defekten Akkus zum Hersteller notwendig ist. Oftmals werden jedoch Akkus, die eventuell noch repariert werden könnten, entsorgt.

Im Vergleich zu E-Bikes weisen E-Scooter ähnliche technische Komponenten wie Rahmen, Antrieb, Akku, Lenker, Bremsen und Laufräder ebenso. Verschleißteile wie Bremsen und Antriebsstrang müssen nach einer gewissen Zeit ausgetauscht werden, was sowohl für E-Bikes als auch für E-Scooter gilt. Nach Einschätzung des Fahrradexperten wiesen E-Scooter im Vergleich zu E-Bikes eine deutlich geringere Qualität und Stabilität auf, weshalb die Lebensdauer der nicht verschleißenden Teile als deutlich geringer eingeschätzt wurde. Kann die Qualität dieser Teile gesteigert werden, dann kann das etablierte System von E-Bikes als Vorbild für E-Scooter in Design, Technik und Reparierbarkeit dienen. Die Standardisierung von Akkus im E-Bike-Bereich ist herstellereintern stark fortgeschritten, was eine zukünftige Verfügbarkeit und einen einfachen Austausch von ausgedienten oder defekten Akkus garantiert. Bosch ist einer der führenden Hersteller. Die Abstimmung von Motor, Akku und Steuerung/BMS sowie Software muss stark vernetzt sein, weshalb Monopolstellungen begünstigt werden. Eine Entnehmbarkeit von Akkus ist bei allen Bauformen von E-Bikes, sogar bei einer Integration im Rahmen, Standard.

Der Vertrieb von E-Scootern zusätzlich zum Betrieb von Fahrradläden und -werkstätten birgt einige Herausforderungen. So ergeben sich Unterschiede im Vergleich zu E-Bikes bezüglich der Zulassungspflicht. E-Scooter werden ähnlich behandelt wie Mofas, während die Zulassungspflicht bei E-Bikes, deren Unterstützung bis 25 km/h limitiert ist, entfällt. Zudem wird die Mitnahme von E-Scootern im öffentlichen Nahverkehr in einigen Verkehrsverbänden untersagt, wohingegen E-Bikes als sicherer angesehen werden und deren Mitnahme häufiger erlaubt ist. Dies stellt eine zusätzliche finanzielle Belastung für Nutzer und Nutzerinnen von E-Scootern dar, wodurch diese Geräte unattraktiv und der Verkauf weiter erschwert wird. Zusätzlich spielt die geografische Lage des Händlers bzw. der Werkstatt stark auf die Verkaufsfähigkeit von Scootern an. In einer eher ländlichen Kleinstadt mit schwierigen topographischen Bedingungen bleibt die Nachfrage nach E-Scootern aus.

Insgesamt zeigt sich, dass E-Scooter im Bereich der Batteriehandhabung und -entsorgung sowie der allgemeinen Reparaturmöglichkeiten noch einige Herausforderungen zu bewältigen haben. Die Expertise und das etablierte System von E-Bikes können jedoch als Vorbild dienen, um die Reparierbarkeit und Nachhaltigkeit von E-Scootern zu verbessern.

Recycling

Eine der größten Herausforderungen von E-Scootern im klassischen Recycling stellt der Umgang mit den Lithium-Ionen-Akkus dar, die oft noch eingebaut sind. Besonders problematisch sind fest verbaute Akkus, da sie beim Shreddern ein erhebliches Brandrisiko darstellen. E-Scooter aus E-Sharing-Systemen gelangen selten in den allgemeinen Recyclingprozess, da spezialisierte Unternehmen, wie beispielsweise Vertical Values, diese Geräte verwerten. Häufig sind es E-Scooter von Privatpersonen, insbesondere günstigere Modelle mit fest verbauten Akkus, die im Recycling landen. Diese sind dann in der Regel defekt oder stark beschädigt.

Die Verarbeitung der E-Scooter im Recyclingprozess ist komplex und birgt viele Herausforderungen. Aluminium und trennbare Akkus bieten aus ökonomischer und ökologischer Sicht das größte Potenzial für das Recycling. Der Zustand der Batterien muss vor dem Transport genau bewertet werden, und es sind spezielle Container und Fahrzeuge notwendig, um die Brandgefahr zu minimieren. Für austauschbare Batterien gibt es spezialisierte Unternehmen wie Ecobat, die sich um die Weiterverwertung kümmern. Auch der Austausch beschädigter Batteriezellen wird über solche spezialisierten Firmen abgewickelt.

Ein zentraler Aspekt im Recyclingprozess ist die Reinheit der verwendeten Materialien. Viele Kunststoffe sind mit Schwermetallen versetzt, was ihre Wiederverwertbarkeit erheblich mindert. Metalle werden häufig mit anderen Legierungen vermischt, was den Wert des reinen Metalls reduziert und die Trennung aufwendig macht. Wenn Materialien am Ende ihres Lebenszyklus trennbar sind, erleichtert dies den Recyclingprozess erheblich und erhöht die Effizienz.

Zusätzlich spielen ökonomische Aspekte eine zentrale Rolle. Technologische Innovationen im Recycling müssen wirtschaftlich tragfähig sein, um implementiert zu werden. Die Herstellungskosten und der Endpreis von recycelten Materialien müssen in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen liegen, um rentabel zu sein.

Der Recyclingprozess von E-Scootern ist mit verschiedenen Herausforderungen konfrontiert. Neben der Brandgefahr durch fest verbaute Akkus und der Notwendigkeit spezieller Transport- und Lagerlösungen gibt es auch erhebliche bürokratische Hürden. Der Rückführprozess sollte einfach und unkompliziert gestaltet sein, doch strenge Regulierungen und bürokratische Anforderungen erschweren oft eine effiziente Abwicklung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Recyclingprozess von E-Scootern noch einige Herausforderungen überwinden muss. Die Reinheit der Materialien, die wirtschaftliche Rentabilität und die bürokratischen Hürden sind wesentliche Punkte, die adressiert werden müssen. Die Zusammenarbeit mit spezialisierten Firmen und der Fokus auf trennbare Materialien sind wichtige Schritte zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit von E-Scootern.

Batterierecycling

Um Recycling-Prozesse möglichst effizient und dadurch sowohl nachhaltig als auch wirtschaftlich zu gestalten, ist Standardisierung und Demontagefähigkeit aus Sicht von Recyclern eine der Hauptanforderungen an das Design von Batterie(-packs). Als großes Hemmnis ist der aktuelle

Markt für Traktionsbatterien noch im weltweiten Hochlauf und technische Aspekte wie Energiedichte, Performance und Langlebigkeit bei steigender Leistung stehen im Vordergrund der Produktentwicklung. Dadurch werden zerstörungsfrei lösbare Schraubverbindungen immer mehr durch Schweiß- oder Klebverbindungen ersetzt und im EV-Bereich die klassische Unterteilung in Zellen, Module und Packs immer mehr aufgelöst. So ist ein neuer Trend Zellen direkt in Packs (Cell to Pack) zu schichten und Zwischenräume auszuschaäumen, oder Zellen sogar direkt ins Chassis zu integrieren. So wird die Demontage energieintensiver und die Wiederverwendbarkeit von Einzelteilen sinkt. Gleichzeitig haben sich Entwicklungszyklen von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen stark verkürzt. Damit steigt die Nachhaltigkeit durch immer wieder neue Modelle schnell an, während an Standardisierung nicht zu denken ist. Dies tritt vor allem im E-Scooter Bereich auf. So ist beispielsweise der angebotene Roller des 2018 gegründeten Mobilitätsanbieters VOI im 6. Jahr inzwischen in der 7. Generation. Austauschbare Batteriepacks und hohe Effizienz steigern zwar die Nachhaltigkeit, aber Schwankungen in der Produktlebenszeit übersteigen die Entwicklungszeit, wodurch am Ende der Nutzungsdauer selbst bei einem einzelnen Hersteller eine Vielzahl an Formaten existieren.

Vielfalt der Packs/Batterien und geringe Informationsweitergabe erschweren den Recyclingprozess. Technische Zeichnungen der Packs und detaillierte Infos über Zellchemie sind oft nicht zugänglich, was die Kosten-Nutzen-Beurteilung der Demontagetiefe beeinflusst. Besonders anspruchsvoll sind Demontageprozesse bei Kleb- und Schweißverbindungen, wie sie oft bei E-Scootern vorkommen. Sicherheit ist ebenfalls ein wichtiges Thema, da eine sichere Entladung nur im demontierten Zustand möglich ist, was für Lagerung und Transport relevant ist. Fast so verschieden wie geometrische Designs der Batteriepacks, sind Designs der Zellchemien. Die wertvollen Kathoden-Aktivmaterialien beinhalten immer Lithium und Sauerstoff, aber daneben unterschiedlichste Kombinationen in unterschiedlichsten Verhältnissen von Kobalt, Nickel, Mangan, Eisen, Phosphor und teilweise noch Cadmium. Gleichzeitig ist die Nachverfolgung des Zellinhalts schwierig, aber für die nachgeschalteten Recyclingprozesse eminent wichtig.

Wird der Transport vom Recyclingunternehmen nicht an externe Dienstleister abgegeben und selbst organisiert, spielen Sicherheit und rechtliche Regelungen eine große Rolle. Handling und Verpackung müssen Kurzschlüsse und damit verbundene spontane Entladungen während Transport oder Demontage verhindern. Sind Batterien sicher verpackt, dann ist die rechtliche Lage herausfordernd. Gesetzliche Anforderungen schwanken sowohl innerhalb Deutschlands als auch innerhalb der EU stark. So werden bspw. Batterien nach Abfallschlüssel in Baden-Württemberg als nicht gefährlich eingestuft, während diese in Hessen als gefährlich gelten. Gleichzeitig ist beim Transport gefährlicher Abfälle über Staatsgrenzen eine Notifizierung erforderlich, wobei der Antrag beispielsweise zwischen deutschen und belgischen Behörden etwa 6 Monate dauert.

Zusammenfassend bestehen die Herausforderungen im Batterierecycling in fehlenden Informationen zur Zusammensetzung, schwieriger Demontage, hohen Sicherheitsanforderungen, uneinheitlicher Regulierung und bei E-Scooter-Batterien insbesondere in der unzureichenden Rückführung und geringen Rückläufermengen, die ein wirtschaftliches Recycling erschweren.

6.4 Zirkuläre Geschäftsmodelle

Im nachfolgenden Abschnitt werden mögliche zirkuläre Geschäftsmodelle für die in Kapitel 3 und 4 dargestellten Akteure aufgezeigt. Da für manche der Akteure unterschiedliche Geschäftsmodelle denkbar sind, zeigt Tabelle 18 zunächst eine Zuordnung der Akteure zu zirkulären Geschäftsmodellmustern.

Tabelle 18 Bewertung der Anwendbarkeit zirkulärer Geschäftsmodelle je Akteur

	Zirkuläre Beschaffung	Product-as-a-service, Sharing-Plattformform	Reparatur	Refurbishing	Remanufacturing	Repurposing	Recycling
Zulieferer	✓						
Komponentenhersteller	✓		✓				
E-Scooter Hersteller	✓		✓	✓	✓	✓	
Transportdienstleister							
Händler			✓				
Mobilitätsanbieter	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Reparaturservice	✓		✓	✓	✓	✓	
Entsorgungsunternehmen		✓	✓				
Elektroschrottreycler							✓
Batterierecycler							✓

Die ausgefüllten zirkulären BMC sind im Anhang (Kapitel 9.2) dargestellt.

6.5 Vorgehensmodell und Handlungsempfehlungen

Das Vorgehensmodell für die Entwicklung und Implementierung von zirkulären Geschäftsmodellen in der E-Scooter Branche orientiert sich an einem Vorgehensmodell für allgemeine Geschäftsmodell-Entwicklung nach Schallmo (2014). So wurden 4 wichtige Schritte identifiziert und sofern notwendig auf Zirkularität und die E-Scooter-Branche angepasst:

1. Geschäftsmodell-Ideen-Gewinnung

Zuallererst muss die Idee für ein mögliches Geschäftsmodell entstehen. Hierbei sind allgemeine Brainstorming-Runden ebenso wichtig wie eine ausführliche Literaturrecherche und Marktanalyse. Für die E-Scooter Branche kann hierfür Kapitel 6.1 und 6.2 herangezogen werden. Vor allem die Analyse der Reverse Supply Chain und Implementierung neuer Pfade durch noch nicht umgesetzte R-Strategien bieten hier enormes Potential. Bei zirkulären Geschäftsmodellen sind die gefunden Ideen auf Nachhaltigkeit und, wie der Name sagt, auf Zirkularität zu prüfen.

2. Geschäftsmodell-Visions-Entwicklung

Ist eine erste Idee des Geschäftsmodells entwickelt, so folgt eine Überprüfung der Idee auf Zukunftsfähigkeit. Dafür müssen Kundenbedürfnisse prognostiziert sowie technologische und allgemeine Trends erhoben werden. Für den E-Scooter sind Prognosemodelle über Anzahl der Nutzer und Nutzerinnen Entwicklungen in der Batterietechnologie sowie potenziell verbaute Produkte zu betrachten und hinsichtlich ökologischer und sozialer Aspekte zu untersuchen.

3. Geschäftsmodell-Entwicklung

Sobald die Idee als zukunftsfähig identifiziert ist, findet eine Konkretisierung des Geschäftsmodells statt. Das Modell wird detailliert beschrieben und ausgestaltet, kritische Erfolgsfaktoren abgeleitet und ein Führungsinstrument (Geschäftsleitung, Controlling, etc.) entwickelt. Es ist wichtig einen Überblick über alle Stakeholder zu erhalten und sich mit diesen zu vernetzen. Für die E-Scooter Branche kann die Auswahl möglicher Partner und Kunden aus der Auflistung aller Akteure aus Kapitel 3.1 und 4.3 erfolgen. Dabei ist vor allem darauf zu achten, dass Partner möglichst nachhaltig handeln um Scope 2 und Scope 3 Emissionen nach dem GHG Proto-

koll (The Greenhouse Gas Protocol, 2004) zu verhindern. Zusätzlich sind die potenziellen eigenen Leistungen, deren Kosten und Nutzen einzuschätzen. Daraus resultierende Anforderungen an Ressourcen, Fähigkeiten und Prozesse sind aufzulisten und auf Wirtschaftlichkeit ebenso wie auf Nachhaltigkeit (ökologisch und sozial) zu prüfen.

4. Geschäftsmodell-Implementierung

Als letztes muss das Geschäftsmodell realisiert werden. Dafür ist ein Realisierungsplan mit allen notwendigen Projekten und Maßnahmen zur Implementierung des Geschäftsmodells auszuarbeiten. Anschließend wird dieser Plan umgesetzt und das Geschäftsmodell gestartet. Dabei gesammelte Erfahrungen sollten kontinuierlich zur Optimierung des Modells herangezogen werden. Für die Implementierung im E-Scooter-Bereich sind besonders rechtliche Anforderungen wie beispielsweise die Batterieverordnung (BattVO, 2023) zu beachten.

Um die Entwicklung zirkulärer Geschäftsmodelle sowie deren Implementierung in der E-Scooter-Branche zu erleichtern sind folgende Handlungsempfehlungen für verschiedene Stakeholder und politische Akteure definiert:

Design für Kreislauffähigkeit: Beim Design für Kreislaufwirtschaft muss vor allem darauf geachtet werden, dass rezyklierbare Materialien verwendet werden, die Bauteile wertig genug sind, um sie später wirtschaftlich sinnvoll einem Rückführungsprozess zuzuführen und dass Verschleißteile sowie defekte Komponenten ausgetauscht werden können. Um das zu erreichen, ist es sinnvoll Bauteile aus Metall, wie beispielsweise Aluminium, denen aus Kunststoff vorzuziehen. Untrennbare Verbindungen unterschiedlicher Materialien sind zu vermeiden und durch Schraub- und Steckverbindungen zu ersetzen. Die Umsetzung einer modularen Bauweise ist zu empfehlen. Ein weiterer Aspekt der kreislaufgerechten Produktgestaltung ist die Standardisierung von Hauptbauteilen, ausgehend von Batteriechemien, über das Design von Bauteilen bis hin zu Normierung von Verschleißteilen. Um diese Ziele zu erreichen ist es sinnvoll Recycler und Werkstätten schon in den Entwicklungsprozess neuer E-Scooter einzubeziehen. Allgemein gibt es keine „wissenschaftliche“ Herangehensweise zur kreislaufgerechten Gestaltung des Produkts, allerdings kann die Ökodesign Verordnung und die darin definierten Kriterien herangezogen werden (ÖkodesignVO, 2024).

Technologie und Infrastruktur: Die Technologie der E-Scooter ist weiter zu verbessern. So sind teure, hauptsächlich bei Sharing-Plattformen verwendete E-Scooter vor allem in Verarbeitung und Austauschbarkeit von Komponenten qualitativ zwar deutlich besser als günstigere. Dennoch ist in beiden Fällen die Steigerung von Produktlebenszyklen und Austauschbarkeit von Komponenten weiter voranzutreiben. Hierfür sind vor allem die unter **Design für Kreislauffähigkeit** beschriebenen Punkte auf Seiten der Hersteller umzusetzen.

Gleichzeitig müssen Demontage- und Recyclingtechnologien weiterhin angepasst und verbessert werden, um die Effizienz zu steigern und die Rückgewinnungsquoten zu erhöhen. Hierzu könnten Investitionen in Forschung und Entwicklung sowie die Zusammenarbeit mit Technologiepartnern notwendig sein. Dies wird voraussichtlich basierend auf dem Recycling von Traktionsbatterien von Autos geschehen, da hier der Marktanteil und damit der wirtschaftliche Pull-Faktor deutlich höher sind.

R-Strategien: Bei optimaler, kaskadenartigen, entsprechend ihrer Zirkularität, Abarbeitung der R-Strategien ist der Lebenszyklus von Produkten begrenzt. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Verschleißteilen und dem Gesamtprodukt. Austausch von Verschleißteilen (Refurbishing, Repair) ist analog zur (E-)Bike Branche anzustreben. Hierfür ist es zwingend erforderlich, dass Qualität und Lebenszyklus des Gesamtsystems steigen und der Austausch von Einzelkomponenten rentabel wird. Hierbei unterstützend wirkt die Normierung und Standardisierung von Bauteilen sowie hohe Zugänglichkeit und Austauschbarkeit dieser Teile (Bremsen, Batterie, Reifen, Lager) in Kombination mit höherer Verfügbarkeit von Werkstätten für Privatbesitzer oder Reparaturschulungsangeboten seitens der Hersteller.

Am End-of-Use sind Testing und Charakterisierung unerlässlich um über weitere Maßnahmen zu entscheiden. Dies betrifft vor allem die Batterie, allerdings sind die Möglichkeiten zur Wiederverwendung, Wiederaufarbeitung und Umnutzung von E-Scooter Batterien aufgrund ihrer Größe voraussichtlich begrenzt und schwer rentabel. Parallel sollten diese Aspekte für Traktionsbatterien weiter erforscht und ausgebaut werden. Hierbei könnten Partnerschaften mit kleineren Unternehmen, die sich auf diese Bereiche spezialisieren, hilfreich sein. Recycler können hier eine größere Rolle spielen, jedoch sind dafür rechtliche Rahmenbedingungen anzupassen (siehe **Rechtliche Rahmenbedingungen**).

Allgemein sind R-Strategien nicht jedem Unternehmen als Begriff etabliert. Trotzdem werden diese unbewusst teilweise schon umgesetzt. Hier könnte eine Schulung der betroffenen Unternehmen oder die Zusammenarbeit mit Forschungsinstituten weitere Potenziale abschöpfen und Entscheidungsträger sensibilisieren.

Logistik: Die Logistikketten für das Sammeln und Transportieren ausgedienter E-Scooter müssen optimiert werden. Dabei ist die Informationsweitergabe über Zustand des Gesamtprodukts, vor allem aber die Information über die Batterie, um die Sicherheit zu erhöhen, zwingend zu verbessern. Dabei sind vor allem Inhalt (Batteriechemie), Zustand und Design des Packs mitzuteilen oder zu ermitteln. Dies wird in Zukunft durch den Batteriepass forciert und könnte durch die Zusammenarbeit mit spezialisierten Logistikunternehmen und/oder Sammelstellen verbessert werden (The Battery Pass, 2024).

Demontage: Die Demontage ist ein entscheidender Punkt in der Realisierung von R-Strategien. So sollte die Demontage von Verschleißteilen dem Kunden sowie der Reparaturwerkstatt oder dem Aufbereitungsunternehmen möglichst einfach und Verbindungen zerstörungsfrei lösbar gemacht werden. Bei Recyclingunternehmen sollte die Automatisierung der Demontage vorangetrieben werden, um die Effizienz zu steigern und Kosten zu senken. Dies könnte durch Investitionen in Forschungsprojekte erreicht werden.

Rechtliche Rahmenbedingungen: Rechtliche Rahmenbedingungen wurden von allen befragten als eine der größten Herausforderungen genannt. Kleine und mittlere Unternehmen verlieren oft den Überblick über geltende Gesetze und daraus resultierende Anforderungen. Hier ist eine Vereinfachung der Gesetzeslage notwendig und die Verringerung der Anforderungen (näher Richtung E-Bike) wird empfohlen. Dies gilt auch für Einschränkungen im öffentlichen Bereich, so gelten Batterien in E-Scootern als gefährlich und die von E-Bikes nicht (Kerler, 2024).

Gleichzeitig ist für die Implementierung von zirkulären Geschäftsmodellen die Gesetzeslage vor allem in Bezug auf die werthaltigste Komponente, der Batterie, mindestens innerhalb Deutschlands, am besten auf europäischer Ebene zu harmonisieren. So ist eine einheitliche Einstufung von LIB im Abfallschlüssel für Recycler und Logistiker notwendig, um wichtige Zeit und damit Geld zu sparen.

Zur Steigerung der Nachhaltigkeit können gesetzliche Recycling- und Rücknahmequoten die Grundlage für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft, auch im Bereich Gesamtprodukt E-Scooter, legen.

Sensibilisierung und Ausbildung: Mitarbeitende vor allem von Herstellern, aber auch Recyclern und Werkstätten sollten in den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft geschult werden und ein Bewusstsein für die Bedeutung des Recyclings und der Kreislaufwirtschaft geschaffen werden.

7 Zusammenfassung

Das beantragte Projekt zielte darauf ab, die Relevanz der Kreislaufführung von E-Scootern innerhalb der Systemgrenzen von Baden-Württemberg zu bewerten. Im Fokus standen dabei die Analyse zentraler Treiber, die eine erfolgreiche Umsetzung unterstützen, sowie potenzieller Hemmnisse, die den Prozess erschweren könnten. Durch die Analyse sollte ein Verständnis für die Chancen und Herausforderungen der Kreislaufführung geschaffen werden, um künftige Entscheidungen zur kreislauffähigen Gestaltung des Lebenszyklus von E-Scootern besser zu unterstützen.

Um innerhalb eines Entscheidungsmodells feststellen zu können, ob ein Produktdesign kreislaufgerecht ist und für welche Kreislaufstrategien es sich eignet wurde ein Konzept zur Bewertung der Kreislaufgerechtheit in Arbeitspaket 1 entwickelt. Basierend auf existierenden Merkmalen kreislaufgerechter Produkte aus der Literatur wurde eine Sammlung aller Merkmale angefertigt und sofern möglich mit Handlungsempfehlungen zur Umsetzung in der Produktgestaltung ergänzt. Um eine Eignung hinsichtlich verschiedener Kreislaufstrategien feststellen zu können fand die Zuordnung von Kreislaufstrategien zu jeweils relevanten Produktmerkmalen statt. Innerhalb des resultierenden Bewertungsmethodenkonzeptes werden einzelne Komponenten mit Merkmalen kreislaufgerechter Produkte verglichen, um ein Erfüllungsgrad bestimmen zu können. Mit Hilfe der Zuordnung von Merkmalen zu Kreislaufstrategien kann so eine Kreislaufgerechtheit bzgl. relevanter R-Strategien festgestellt werden.

Im Fokus von Arbeitspaket 2 stand die Identifikation verschiedener Akteure und die Entwicklung eines Netzwerks für E-Scooter mit relevanten Waren- und Informationsströmen. Dabei wurden auch die logistischen Anforderungen an Transport, Lagerung und Kennzeichnung berücksichtigt. Weiterführend wurden verschiedenen Re- und Upcycling-Strukturen für E-Scooter aus logistischer Sicht entwickelt und ein Konzept für ein Prognosemodell für die Rückläufer von E-Scooter-Batterien, sowohl für Privatnutzer und Privatnutzerinnen als auch für Mobilitätsanbieter erstellt. Abschließend wurde ein Grundkonzept basierend auf verschiedenen Kriterien für ein Entscheidungsmodell am End-of-Life für E-Scooter und deren Komponenten, wie Fahrzeug, Batterie und Elektromotor erarbeitet.

Im dritten Arbeitspaket wurden zunächst Gesetze auf europäischer und nationaler Ebene identifiziert, die im Kontext der Kreislaufführung von E-Scootern von Bedeutung sind. Auf europäischer Ebene umfassen diese unter anderem die Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL, 2008), die RoHS-Richtlinie (2011), die WEEE-Richtlinie (2012), die POP-Verordnung (2019), die REACH-Verordnung (2006) und die Batterieverordnung (BattVO, 2023). Auf nationaler Ebene müssen zusätzlich das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG, 2012), das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG, 2015), die Elektrostoffverordnung (ElektroStoffV, 2013) und die EAG-Behandlungsverordnung (EAG-BehandV, 2021) berücksichtigt werden. Anhand dieser gesetzlichen Vorgaben wurden die relevanten Akteure entlang der Wertschöpfungskette sowie deren spezifische Pflichten identifiziert und beschrieben. Zudem wurde die Rolle der Abfallhierarchie im Rahmen der Kreislaufwirtschaft diskutiert. Zusätzlich zur Regulatorik wurden wichtige Normen identifiziert, die die Kreislaufwirtschaft unterstützen und diese den entsprechenden R-Strategien und Akteuren zugeordnet.

Zur Einordnung der Umweltauswirkungen wurde eine systematische Literaturliteraturanalyse zur Ökobilanzierung von E-Scootern durchgeführt. Hierzu wurden zunächst relevante Studien identifiziert und diese anschließend ausgewertet. Die Analyse umfasste die Dokumentation der Rahmenbedingungen der Ökobilanz, wie beispielsweise die funktionelle Einheit, Systemgrenzen und Datenherkunft, um die Ergebnisse verschiedener Referenzen korrekt einordnen zu können. Ziel war es, wesentliche Einflussfaktoren auf die Umweltwirkungen von E-Scootern entlang ihres gesamten Lebenszyklus zu identifizieren, um ökologische Optimierungspotentiale abzuleiten. Die Einflussfaktoren wurden den Lebenszyklusphasen zugeordnet. Die Ergebnisse zeigten, dass Materialien wie Aluminium und die Batterie die Hauptverursacher der Emissio-

nen entlang des E-Scooter-Lebenszyklus sind. Auch der Strommix, der für die Produktion und das Aufladen der E-Scooter verwendet wird, hat einen wesentlichen Einfluss auf die Umweltwirkungen. In der Nutzungsphase spielen Faktoren wie die Energiequelle für das Laden, Logistik und Wartung, Rebalancing-Strategien, Fahrverhalten, Modal Shift, Nutzungsintensität und Lebensdauer der E-Scooter eine entscheidende Rolle. Am Ende des Lebenszyklus können Umweltwirkungen durch Wiederverwendung und Recycling optimiert werden, wobei das End-of-Use in bisherigen Ökobilanzen jedoch nur wenig berücksichtigt wurde.

Arbeitspaket 5 gliederte sich in zwei Bereiche: zirkuläre Geschäftsmodelle und Experteninterviews. Zu Beginn wurde eine umfassende Auswertung der Fachliteratur durchgeführt, die sowohl peer-reviewed als auch nicht-peer-reviewed Quellen umfasste, um den aktuellen Stand zirkulärer Geschäftsmodelle zu ermitteln und Erfolgsfaktoren abzuleiten. Darauf aufbauend wurden mithilfe des 9R-Frameworks zirkuläre Geschäftsmodelle mit speziellem Fokus auf die E-Scooter-Branche entwickelt und eine Methodik zur Geschäftsmodellentwicklung festgelegt. Parallel dazu fanden Experteninterviews mit verschiedenen Stakeholdern entlang des Lebenszyklus von E-Scootern statt. Mit Hilfe der Interviews konnten Herausforderungen der einzelnen Akteursgruppen identifiziert werden und daraus Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

Zusammenfassend wurde im Rahmen des Projektes die Relevanz der Kreislaufführung von E-Scootern untersucht. Hierfür wurden zunächst der Fokus auf die Produktdesignphase und die End-of-Use-Phase gelegt. Für erstere, wurde ein Konzept zur Bewertung der Kreislaufgerechtigkeit entwickelt, um zukünftig Aussagen über die Eignung hinsichtlich einer Kreislaufführung von E-Scootern und dessen Komponenten treffen zu können. Der Schwerpunkt in der End-of-Use-Phase lag auf der Analyse der Rückführlogistik, um zentrale Anforderungen an Rückführprozess zu definieren. Zusätzlich wurden über die verschiedenen Lebenszyklusphasen hinweg wichtige Querschnittsaspekte wie regulatorische Rahmenbedingungen, ökologische Aspekte sowie zirkuläre Geschäftsmodelle einbezogen, um ein ganzheitliches Bild der Kreislaufführung von E-Scootern zu schaffen. Die Ergebnisse bieten eine erste Grundlage, um den Lebenszyklus von E-Scootern kreislauffähiger zu gestalten und verdeutlichen, welche Herausforderungen und Komplexitäten derzeit bei der Kreislaufführung dieser bestehen.

8 Verwertung

Im Rahmen des Projektes wurden die Ergebnisse aus dem Projekt in verschiedener Form verwertet. Die vorliegende Tabelle gibt einen Überblick über die bisherigen Resultate und bietet einen Ausblick auf die geplanten Entwicklungen innerhalb der nächsten zwei Jahre.

Tabelle 19 Verwertungsplan der Projektergebnisse

...Projektergebnisse	...bis zum derzeitigen Zeitpunkt	...innerhalb der nächsten zwei Jahre
Konzepte und Methoden	<p>Im Rahmen des Projekts wurden mehrere neue Konzepte entwickelt. Dazu gehört ein Konzept zur Bewertung der Kreislaufgerechtigkeit von E-Scootern und dessen Komponenten, ein Grundkonzept für ein Prognosemodell zukünftiger Rückläufer und für das Re- und Upcycling aus der logistischen Perspektive sowie ein Grundkonzept für die Entscheidungsfindung im End-of-Use.</p> <p>Die erarbeiteten Konzepte können dazu beitragen, die Kreislauffähigkeit von E-Scootern zu optimieren.</p> <p>Zudem wurde ein Vorgehen zur Entwicklung zirkulärer Geschäftsmodelle erstellt, das Unternehmen dabei unterstützt, Kreislauf-Strategien umzusetzen.</p>	<p>Die nächsten Schritte umfassen die Weiterentwicklung und Optimierung der Methode zur Bewertung der Kreislaufgerechtigkeit, um deren Übertragbarkeit auf verschiedene Produkte zu ermöglichen.</p> <p>Zudem soll ein Simulationsmodell für zukünftige Rückläufer entwickelt, das auf dem erarbeiteten Konzept basiert.</p>
Analysierende und beratende Dienstleistung	/	<p>Durch die im Projekt erarbeiteten Konzepte können gezielt Beratungsdienstleistungen in verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus von E-Scootern angeboten werden, insbesondere in der Konstruktions- und End-of-Use-Phase. Darüber hinaus ermöglichen diese Konzepte eine umfassende Ökobilanzierung und die Identifizierung von Optimierungspotenzialen.</p>
Know-how Transfer: z. B. in interdisziplinäre Bereiche...	<p>Im Verlauf des Projekts fand bereits ein erster Wissensaustausch zwischen den universitären und industriellen Partnern in Form von Interviews statt. Der Projektbericht wird den Unternehmen zur Verfügung gestellt und kann als Grundlage für weitere gemeinsame Untersuchungen dienen, sofern seitens der Unternehmen Interesse besteht.</p> <p>Weiterhin können die im Rah-</p>	<p>Zukünftige Schritte im Bereich Know-how Transfer umfassen die Nutzung verschiedener Netzwerke, wie ARENA2036 und das Intralogistiknetzwerk, um die Projektergebnisse weiter zu verbreiten und in der Praxis anzuwenden.</p>

Verwertung

	<p>men des Projekts erarbeiteten Handlungsempfehlungen zur ökologischen Optimierung sowie zu Hemmnissen und Treibern zur Verbesserung der Kreislauf-führung in den beteiligten Unternehmen beitragen.</p>	
<p>Wissenstransfer: z. B. durch Verbesserung von Forschung und Lehre, Veröffentlichungen, ...</p>	<p>Die Ergebnisse werden auf dem Ressourceneffizienz- und Kreislaufwirtschaftskongress BW im Oktober 2024 in Form eines Posterbeitrags präsentiert. Außerdem wurde ein Abstract für ein Konferenzveröffentlichung auf der Konferenz CIRP Design 2025 angenommen und voraussichtlich mit dem Titel „Towards Sustainable Urban Mobility: Integrating Design for Circular Economy-Principles in E-Scooter Development“ in dem Journal „Procedia CIRP“ veröffentlicht.</p>	<p>Im Laufe des nächsten Jahres sollen weiterführende Aspekte des Projekts im Rahmen studentischer Arbeiten vertieft untersucht. Dazu gehört unter anderem die Durchführung einer Ökobilanz für verschiedene Rückführszenarien, da diese in bisherigen Analysen, die den Schwerpunkt auf die Nutzungsphase legten, nicht ausreichend berücksichtigt wurden.</p> <p>Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse werden zudem genutzt, um verschiedene Lehrveranstaltungen inhaltlich zu bereichern und das wissenschaftliche Dienstleistungsangebot der beteiligten Institute zu erweitern und zu verbessern.</p> <p>Darüber hinaus fließen die Projektergebnisse in die Promotionsvorhaben eines beteiligten wissenschaftlichen Mitarbeiters (IKTD) ein.</p>

9 Ausblick

Für die Weiterführung der Ergebnisse ist es notwendig, das entwickelte Konzept zur Bewertung der Kreislauffähigkeit an einem realen Produkt zu testen. Dadurch kann die Praxistauglichkeit überprüft und die Übertragbarkeit auf unterschiedliche Produkte und Bauteile sichergestellt werden. Darüber hinaus sollten die in Kapitel 3 spezifizierten Daten ergänzt und ein Simulationsmodell zur Prognose der Rücklaufmengen aufgebaut werden. In einem praktischen Anwendungsfall könnte die Realisierung eines Up-/Recycling-Hubs in Zusammenarbeit mit der Industrie erfolgen, um die praktische Umsetzbarkeit zu beurteilen. Ein weiterer wichtiger Schritt ist die Unterstützung der Akteure, um einen klaren Überblick zu erhalten und die Umsetzung der Standards zu unterstützen. Dabei sollte ein gemeinsames und einheitliches Verständnis der Begrifflichkeiten der Kreislaufwirtschaft gefördert werden. Im Bereich der Ökobilanzierung sollte der Fokus auf bisher unzureichend betrachtete Anwendungsfälle der End-of-Use Phase von E-Scootern gelegt werden. Die Handlungsempfehlungen könnten an Unternehmen weitergegeben werden, um ökologische Aspekte entlang des E-Scooter Lebenszyklus zu optimieren. Schließlich ist die Umsetzung eines zirkulären Geschäftsmodells mit Unternehmen der E-Scooter Branche anzustreben, beispielsweise im Rahmen eines Forschungsprojektes. Die Verbesserung der regulatorischen Rahmenbedingungen gemäß den Handlungsempfehlungen sollte ebenfalls berücksichtigt werden, um einen ganzheitlichen Ansatz der Kreislaufwirtschaft zu gewährleisten.

Literaturverzeichnis

- Albæk, J. K., Shahbazi, S [S.], McAloone, T. C [T. C.], & Pigosso, D. (2020). Circularity evaluation of alternative concepts during early product design and development. *Sustainability (Switzerland)*, 12(22), 1–25. <https://doi.org/10.3390/su12229353>
- Atif, S. (2023). Analysing the alignment between circular economy and industry 4.0 nexus with industry 5.0 era: An integrative systematic literature review. *Sustainable Development*, 31(4), 2155–2175. <https://doi.org/10.1002/sd.2542>
- Balletto, G., Borruso, G., Ladu, M., Milesi, A., Tagliapietra, D., & Carboni, L. (2022). Smart City and Industry 4.0. In O. Gervasi, B. Murgante, S. Misra, A. M. A. C. Rocha, & C. Garau (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science. Computational Science and Its Applications – ICCSA 2022 Workshops* (Vol. 13378, pp. 473–484). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10562-3_33
- Banister, D. (2011). Cities, mobility and climate change. *Journal of Transport Geography*, 19(6), 1538–1546. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.03.009>
- Barzel, P. (2014). *Das E-Bike: Technik, Modelle, Praxis für Pedelecs und Elektrofahrräder*. Delius Klasing.
- The Battery Pass. (2024). *Battery Pass*. <https://thebatteryypass.eu/>
- Belli, F., & Quella, F. (2021). Ecodesign, Design for Reuse. *Studies in Systems, Decision and Control*(315), 215–235. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72261-6_7
- Berwald, A., Dimitrova, G., Feenstra, T., Onnekink, J., Peters, H., Vyncke, G., & Ragaert, K. (2021). Design for circularity guidelines for the EEE sector. *Sustainability (Switzerland)*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/su13073923>
- Bigolin, R., Blomgren, E., Lidström, A., Oliveira, S. M., & Thornquist, C. (2021). Material Inventories for Responsive Design in Fashion Practice. In K. Sung, J. Singh, & B. Bridgens (Eds.), *Lecture Notes in Production Engineering. State-of-the-Art Upcycling Research and Practice* (pp. 47–53). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72640-9_10
- Blomsma, F., Pieroni, M., Kravchenko, M., Pigosso, D. C., Hildenbrand, J., Kristinsdottir, A. R., Kristoffersen, E., Shahbazi, S [Sasha], Nielsen, K. D., Jönbrink, A.-K., Li, J., Wiik, C., & McAloone, T. C [Tim C.] (2019). Developing a circular strategies framework for manufacturing companies to support circular economy-oriented innovation. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118271. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118271>
- Bortoli, A. de (2021). Environmental performance of shared micromobility and personal alternatives using integrated modal LCA. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 93, 102743. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102743>
- Bortoli, A. de, & Christoforou, Z. (2020). Consequential LCA for territorial and multimodal transportation policies: method and application to the free-floating e-scooter disruption in Paris. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122898. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122898>
- 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>
- Produkthaftungsgesetz. https://www.gesetze-im-internet.de/prodhaftg/_4.html
- Bürgerliches Gesetzbuch, August 18, 1896. <https://www.gesetze-im-internet.de/bgb/>
- Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, 2012. <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/BJNR021210012.html>
- Verordnung zur Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgeräte-Stoff-Verordnung), 2013. <https://www.gesetze-im-internet.de/elektrostoffv/BJNR111100013.html>
- Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektrogesetz), 2015. https://www.gesetze-im-internet.de/elektrog_2015/BJNR173910015.html

- Verordnung über die Behandlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (Elektro- und Elektronikaltgerätebehandlungsverordnung), 2021.
<https://www.gesetze-im-internet.de/eag-behandv/EAG-BehandV.pdf>
- Cazzola, P., & Crist, P. (09/2020). *Good to Go? Assessing the Environmental Performance of New Mobility*. International Transport Forum. <https://www.itf-oecd.org/good-to-go-environmental-performance-new-mobility>
- Chang, C.-C., Wu, F.-L., Lai, W.-H., & Lai, M.-P. (2016). A cost-benefit analysis of the carbon footprint with hydrogen scooters and electric scooters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(30), 13299–13307. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.168>
- Chiariotti, F., Pielli, C., Zanella, A., & Zorzi, M. (2018). A Dynamic Approach to Rebalancing Bike-Sharing Systems. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18(2).
<https://doi.org/10.3390/s18020512>
- Chien, Y.-H., Hsieh, I.-Y. L., & Chang, T.-H. (2023). Beyond personal vehicles: How electrifying scooters will help achieve climate mitigation goals in Taiwan. *Energy Strategy Reviews*, 45, 101056. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101056>
- Circular Economy Initiative Deutschland. *Zirkuläre Geschäftsmodelle: Barrieren überwinden, Potenziale freisetzen*.
https://static1.squarespace.com/static/5b52037e4611a0606973bc79/t/6437a4e05c2b8b786023acc0/1681368319083/AG+GM_Gesamtbericht+DE_DOI_Stand+12.04.23_NEW
- ClimatePartner. (2024). *TIER Mobility | ClimatePartner*.
<https://www.climatepartner.com/de/mit-uns-arbeiten/case-studies/tier-mobility>
- Davim, J., D., L., Nagpal, N., Kassarwani, N., Varthanan G., V., & Siano, P. (2024). *E-Mobility in Electrical Energy Systems for Sustainability*. IGI Global.
<https://doi.org/10.4018/979-8-3693-2611-4>
- Degele, J., Gorr, A., Haas, K., Kormann, D., Krauss, S., Lipinski, P., Tenbih, M., Koppenhofer, C., Fauser, J., & Hertweck, D. (2018). Identifying E-Scooter Sharing Customer Segments Using Clustering. In *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)* (pp. 1–8). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436288>
- DIN 31051:2019-06 Grundlagen der Instandhaltung.
<https://www.dinmedia.de/de/norm/din-31051/303020440>
- DIN CLC/TR 45550:2021-04 Definitionen zur Materialeffizienz.
<https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/din-clc-tr-45550/333443266>
- DIN EN 45553:2020-11 Allgemeines Verfahren zur Bewertung der Wiederaufarbeitbarkeit energieverbrauchsrelevanter Produkte; Deutsche Fassung EN 45553:2020.
<https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-45553/329118668>
- DIN EN 45555:2020-04 Allgemeines Verfahren zur Bewertung der Recyclingfähigkeit und Verwertbarkeit energieverbrauchsrelevanter Produkte; Deutsche Fassung EN 45555:2019. <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-45555/311516381>
- DIN EN 45556:2020-03 Allgemeines Verfahren zur Bewertung des Anteils an wiederverwendeten Komponenten in energieverbrauchsrelevanten Produkten; Deutsche Fassung EN 45556:2019. <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-45556/317433757>
- DIN EN 45557:2020-09 Allgemeines Verfahren zur Bewertung des Anteils an recyceltem Material von energieverbrauchsrelevanten Produkten; Deutsche Fassung EN 45557:2020. <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-45557/316877808>
- DIN EN 45560:2023-10 - Entwurf Methode zur Gestaltung von zirkulären Produkten; Deutsche und Englische Fassung prEN 45560:2023. <https://www.dinmedia.de/de/norm-entwurf/din-en-45560/372219082>
- DIN EN 50614:2021-12 VDE 0042-614:2021-12 Anforderungen an die Vorbereitung zur Wiederverwendung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE); Deutsche Fassung EN 50614:2020. <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-50614/330405292>
- DIN EN 50625-1:2014-09 VDE 0042-13-1:2014-09 Sammlung, Logistik und Behandlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE) - Teil 1: Allgemeine Anforderungen an die Behandlung; Deutsche Fassung EN 50625-1:2014.
<https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-50625-1/203501392>

- DIN EN IEC 62430:2022-10 VDE 0042-2:2022-10 Umweltbewusstes Gestalten (ECD) - Grundsätze, Anforderungen und Leitfaden (IEC 62430:2019); Deutsche Fassung EN IEC 62430:2019. <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-iec-62430/356796802>
- DIN SPEC 59 Beiblatt 1:2018-11 Leitfaden zur Einbeziehung von Umweltgesichtspunkten in Produktnormen (ISO Guide 64:2008); Beiblatt 1: Hilfestellung zur Einbeziehung von Ressourcenschutzaspekten. <https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/din-spec-59-beiblatt-1/295675813>
- DIN SPEC 91446:2021-12 Klassifizierung von Kunststoff-Rezyklaten durch Datenqualitätslevels. <https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/din-spec-91446/346496956>
- DIN SPEC 91472:2023-06 Remanufacturing (Reman) - Qualitätsklassifizierung für zirkuläre Prozesse. <https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/din-spec-91472/367509951>
- DIN/TS 35205:2024-09 Leitfaden zur Wiederverwendung und Vorbereitung zur Wiederverwendung von Elektrogeräten, Textilien, Möbeln und weiteren haushaltsüblichen Gegenständen - Empfehlungen für Aufbau, Durchführung und Optimierung entsprechender Geschäftsmodelle. <https://www.dinmedia.de/de/vornorm/din-ts-35205/379765429>
- DIN. (08/2024a). *CIRCULAR THINKING in Standards: Wie Normung eine Circular Economy unterstützen kann*. Deutsches Institut für Normung. <https://www.din.de/resource/blob/954722/817ac05b868cad6959d3358b58127050/circular-thinking-in-standards-normen-zur-umsetzung-der-r-strategien-data.pdf>
- DIN. (2024b, September 11). *Circular Economy I Normen und Standards ebnen den Weg*. Deutsches Institut für Normung. <https://www.din.de/de/forschung-und-innovation/themen/circular-economy>
- DIN, DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik, & VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Eds.). (01/2023). *Deutsche Normungsroadmap Circular Economy*. <https://www.din.de/resource/blob/892606/06b0b608640aadd63e5dae105ca77d8/normungsroadmap-circular-economy-data.pdf>
- Dott. (2024, May 14). *TIER and Dott merger completes*. <https://ridedott.com/press-release/tier-dott-merger/>
- Echeverría-Su, M., Huamanraime-Maquín, E., Cabrera, F. I., & Vázquez-Rowe, I. (2023). Transitioning to sustainable mobility in Lima, Peru. Are e-scooter sharing initiatives part of the problem or the solution? *The Science of the Total Environment*, 866, 161130. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161130>
- Ernst & Young. (2024). *Micromobility: Moving Cities into a Sustainable Future*. https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/en_gl/topics/automotive-and-transportation/automotive-transportation-pdfs/ey-micromobility-moving-cities-into-a-sustainable-future.pdf
- Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), 2006.
- Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, 2008. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098>
- Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten, 2011. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0065>
- Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte, 2012. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019>
- Verordnung (EU) 2019/1021 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 über persistente organische Schadstoffe, 2019. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1021>
- VERORDNUNG (EU) 2023/1542, July 12, 2023. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL_2023_191_R_0001

- Verordnung (EU) 2024/1781 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte, 2024. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401781
- Favi, C., Marconi, M., Germani, M., & Mandolini, M. (2019). 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>
- Finke, S., Schelte, N., Severengiz, S., Fortkort, M., & Kähler, F. (2022). Can battery swapping stations make micro-mobility more environmentally sustainable? *E3S Web of Conferences*, 349, 2007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234902007>
- Forslind, K. H. (2005). Implementing extended producer responsibility: the case of Sweden's car scrapping scheme. *Journal of Cleaner Production*, 13(6), 619–629. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2003.12.017>
- Foss, E. (2023). *The art of upcycling: Creative ways to make something beautiful out of trash, thrifted finds and everyday recyclables*. Page Street Publishing Co.
- Gebhardt, L., Wolf, C., Ehrenberger, S., Seiffert, R., Krajzewicz, D., & Cyganski, R. (03/2021). *E-Scooter - Potentiale, Herausforderungen und Implikationen für das Verkehrssystem: Abschlussbericht Kurzstudie E-Scooter*. Institut für Verkehrsforschung. https://elib.dlr.de/141837/1/ArbeitsberichteVF_Nr4_2021.pdf
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft. (2024). *E-Scooter: Viele Unfälle durch Leih-Flotten*. <https://www.gdv.de/gdv/medien/medieninformationen/e-scooter-viele-unfaelle-durch-leih-flotten-149344>
- Gompf, K., Traverso, M., & Hetterich, J. (2020). Towards social life cycle assessment of mobility services: systematic literature review and the way forward. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(10), 1883–1909. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01788-8>
- Gössling, S. (2020). Integrating e-scooters in urban transportation: Problems, policies, and the prospect of system change. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 79, 102230. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102230>
- The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard* (Revised edition). (2004). World Business Council for Sustainable Development; World Resources Institute.
- Guldmann, E. (2017). *Best Practice Examples of Circular Business Models*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33980.95360>
- Gullo, L. J., & Dixon, J. (2021). *Design for Maintainability*. John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119578536>
- Gutberlet, J. (2016). Situated theoretical framework for waste governance. In J. Gutberlet (Ed.), *Urban Recycling Cooperatives* (pp. 12–23). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315686523-2>
- Haddaway, N. R., Page, M. J., Pritchard, C. C., & McGuinness, L. A. (2022). Prisma2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis. *Campbell Systematic Reviews*, 18(2), e1230. <https://doi.org/10.1002/cl2.1230>
- Held, M. (2020). *Entwicklung von Handlungsempfehlungen für den Umgang mit elektrischer Mikromobilität in Städten am Beispiel Ludwigsburg* [Masterthesis]. Technische Universität München. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1542535/1542535.pdf>
- Hering, E., & Schloske, A. (2022). *Quality Function Deployment (QFD)*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-64811-7>
- Hilton, B., & Thurston, M. (2019). Design for remanufacturing. *Remanufacturing in the Circular Economy 2019*, 137–168. <https://doi.org/10.1002/9781119664383.ch6>
- Hollingsworth, J., Copeland, B., & Johnson, J. X. (2019). Are e-scooters polluters? The environmental impacts of shared dockless electric scooters. *Environmental Research Letters*, 14(8), 84031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2da8>
- Industr.com. (2024). *So gelingt nachhaltiges Recycling von Elektromotoren*. <https://www.industr.com/de/so-gelingt-nachhaltiges-recycling-von-elektromotoren-2724112>

- ISO 14009:2020 Environmental management systems — Guidelines for incorporating material circulation in design and development. <https://www.iso.org/standard/43244.html>
- ISO 14009:2020 Environmental management systems — Guidelines for incorporating material circulation in design and development. <https://www.iso.org/standard/43244.html>
- ISO 59004:2024 Circular economy - Vocabulary, principles and guidance for implementation. <https://www.iso.org/standard/80648.html>
- ISO 59010:2024 Circular economy — Guidance on the transition of business models and value networks. <https://www.iso.org/standard/80649.html>
- ISO 59020:2024 Circular economy — Measuring and assessing circularity performance. <https://www.iso.org/standard/80650.html>
- ISO/TR 59032:2024 Circular economy — Review of existing value networks. <https://www.iso.org/standard/83044.html>
- Ishaq, M., Ishaq, H., & Nawaz, A. (2022). Life cycle assessment of electric scooters for mobility services: A green mobility solutions. *International Journal of Energy Research*, 46(14), 20339–20356. <https://doi.org/10.1002/er.8009>
- Ixmeier, A., Kranz, J. J., Recker, J., & Zeiss, R. (2023). How to unlock the potential of information systems for a circular economy. In V. A. Cooper, J. J. Kranz, S. K. Mathew, & R. T. Watson (Eds.), *Research Handbook on Information Systems and the Environment* (pp. 74–99). Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781802201864.00010>
- Kang, H.-Y., Jun, Y.-S., Park, J.-H., & Yang, E.-H. Design of household appliances considering remanufacturing: a case study. In *EcoDesign and Sustainability I* (pp. 33–43). https://doi.org/10.1007/978-981-15-6779-7_3
- Kaufmann, G. (2002). *Möglichkeiten und Grenzen des Produktrecycling: Vor dem Hintergrund einer ökologieorientierten Unternehmensführung*. Kovac.
- Kazmaier, M., Taefi, T. T., & Hettesheimer, T. (2020). Techno-Economical and Ecological Potential of Electric Scooters: A Life Cycle Analysis. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 20(4). <https://doi.org/10.18757/ejtir.2020.20.4.4912>
- Kerler, C. (2024, April 2). Drei bayerische Verkehrsbetriebe verbannen E-Scooter. *BR24*. <https://www.br.de/nachrichten/bayern/drei-bayerische-verkehrsbetriebe-verbannen-e-scooter,U8nk99a>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*(127), 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kiss My Wheels. (2024). *Lebensdauer eines E-Scooters*. <https://kissmywheels.ch/de/blog-lebensdauer-eines-escooters/>
- Lascurain, I. E., Lozano, D. J., Lacunza, J. Z., Mutuberria, U. B., & Oregi, A. E. (2019). Identification of key aspects of circular economy for inclusion in life cycle design. *Proceedings from the International Congress on Project Management and Engineering*, 783–796.
- Leal, J. M., Pompidou, S., Charbuillet, C., & Perry, N. (2020). Design for and from recycling: A circular ecodesign approach to improve the circular economy. *Sustainability (Switzerland)*, 12(23), 1–30. <https://doi.org/10.3390/su12239861>
- Li, E., Irani, H. R., & Nozari, H. (2024). *Smart and Sustainable Interactive Marketing*. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-1339-8>
- Lime. (2024). *Lime*. <https://www.li.me/>
- M. Leuenberger, & R. Frischknecht. (2010). *Life Cycle Assessment of Two Wheel Vehicles*. <https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Publikationen/Studien/AddRe-Mo-Zukunftstrend-nachhaltige-Elektrofahrr%C3%A4der.pdf>
- Martens, H. (2011). *Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis*. Spektrum, Akad. Verl.
- Mast, J., Unruh, F. von, & Irrek, W. R-Strategien als Leitlinien der Circular Economy. https://prosperkolleg.ruhr/wp-content/uploads/2022/05/rethink_22-03_r-strategien.pdf
- McDermott, S., Morwood, D., Laczko, P., Slaughter, R., & Smith-Gillespie, A. (2019). *Circular Business Model Innovation Toolkit*. <https://static1.squarespace.com/static/5df776f6866c14507f2df68a/t/>

- [5e678ac57325ed3b08060f48/1583844064961/Business+Model+Innovation+Toolkit.pdf](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132340)
- Moreau, H., Jamblinne Meux, L. de, Zeller, V., D'Ans, P., Ruwet, C., & Achten, W. M. (2020). Dockless E-Scooter: A Green Solution for Mobility? Comparative Case Study between Dockless E-Scooters, Displaced Transport, and Personal E-Scooters. *Sustainability*, 12(5), 1803. <https://doi.org/10.3390/su12051803>
- Morella, P., Lambán, M. P., Royo, J., Sánchez, J. C., & Latapia, J. (2023). Technologies Associated with Industry 4.0 in Green Supply Chains: A Systematic Literature Review. *Sustainability (Switzerland)*, 15(12), 9784. <https://doi.org/10.3390/su15129784>
- Ortner, P., Tay, J. Z., & Wortmann, T. (2022). Computational optimization for circular economy product design. *Journal of Cleaner Production*, 362. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132340>
- Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2011). *Business Model Generation* (1. Aufl. 2011). Campus.
- Öttinger, M. (2023). *Die EU-Batterieverordnung: Neue Pflichten für Akteure der Batteriewirtschaft* (1. Auflage). Beuth Recht. Beuth Verlag GmbH.
- pedelec-elektro-fahrrad.de. (2024). *Wenn der Batterie des E-Bikes der Saft ausgeht*. <https://pedelec-elektro-fahrrad.de/news/wenn-der-batterie-des-e-bikes-der-saft-ausgeht/266584/>
- Pouri, M. J., & Hilty, L. M. (2020). The Relevance of Digital Sharing Business Models for Sustainability. In R. Chitchyan, D. Schien, A. Moreira, & B. Combemale (Eds.), *Proceedings of the 7th International Conference on ICT for Sustainability* (pp. 77–87). ACM. <https://doi.org/10.1145/3401335.3401344>
- Rainer Kleber, Simone Zanoni, & Lucio Zavanella. (2009). *On how the acquisition of recoverable parts influences the profitability of spare parts management for durables*. FEMM Working Paper. Otto-von-Guericke University Magdeburg, Faculty of Economics and Management.
- Rashid, S., & Malik, S. H. (2023). Transition from a Linear to a Circular Economy. In S. A. Bandh, F. A. Malla, & A. T. Hoang (Eds.), *Circular Economy and Sustainability. Renewable Energy in Circular Economy* (pp. 1–20). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42220-1_1
- Reis, A. F., Baptista, P., & Moura, F. (2023). How to promote the environmental sustainability of shared e-scooters: A life-cycle analysis based on a case study from Lisbon, Portugal. *Journal of Urban Mobility*, 3, 100044. <https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2022.100044>
- Rześny-Cieplińska, J., Tomaszewski, T., Piecyk-Ouellet, M., & Kiba-Janiak, M. (2023). Emerging trends for urban freight transport-The potential for sustainable micromobility. *PloS One*, 18(9), e0289915. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289915>
- Schallmo, D. R. (2014). *Kompendium Geschäftsmodell-Innovation*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-04459-6>
- Schelte, N., Strasberger, H., Severengiz, S., Finke, S., & Felmingham, B. (2021). Environmental Impact of Off-grid Solar Charging Stations for Urban Micromobility Services. In *2021 IEEE European Technology and Engineering Management Summit (E-TEMS)* (pp. 33–39). IEEE. <https://doi.org/10.1109/E-TEMS51171.2021.9524891>
- Severengiz, S., Finke, S., Schelte, N., & Forrister, H. (2020). Assessing the Environmental Impact of Novel Mobility Services using Shared Electric Scooters as an Example. *Procedia Manufacturing*, 43, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.114>
- Severengiz, S., Finke, S., Schelte, N., & Wendt, N. (2020). Life Cycle Assessment on the Mobility Service E-Scooter Sharing. In *2020 IEEE European Technology and Engineering Management Summit (E-TEMS)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/E-TEMS46250.2020.9111817>
- Severengiz, S., Schelte, N., & Bracke, S. (2021). Analysis of the environmental impact of e-scooter sharing services considering product reliability characteristics and durability. *Procedia CIRP*, 96, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.072>
- Shabur, M. A. (2024). A comprehensive review on the impact of Industry 4.0 on the development of a sustainable environment. *Discover Sustainability*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00290-7>

- Shahbazi, S [S.], & Jonbrink, A. K. (2020). Design Guidelines to Develop Circular Products: Action Research on Nordic Industry. *Sustainability (Switzerland)*, 12(9).
<https://doi.org/10.3390/su12093679>
- Sharma, N. K., Govindan, K., Lai, K. K., Chen, W. K., & Kumar, V. (2021). The transition from linear economy to circular economy for sustainability among SMEs: A study on prospects, impediments, and prerequisites. *Business Strategy and the Environment*, 30(4), 1803–1822. <https://doi.org/10.1002/bse.2717>
- Spath, D., Westkämper, E., Bullinger, H.-J., & Warnecke, H.-J. (2017). *Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-55426-5>
- Spiegel Online. (2014). *Design: Möbel aus Fahrradteilen*.
<https://www.spiegel.de/karriere/design-moebel-aus-fahrradteilen-a-953633.html>
- Statista. (2024). *Umsätze und Nutzer im Segment E-Scooter-Sharing in Deutschland*.
<https://de.statista.com/infografik/25649/umsaetze-und-nutzer-im-segment-e-scooter-sharing-in-deutschland/>
- Steinborn, J. (2011). *Integrierte Produktions- und Produktrecyclingprogrammplanung in der Elektronikindustrie: Am Beispiel des Produktrecyclings von Unterhaltungsautomaten*. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2011. Logos-Verl.
- Sun, S., & Ertz, M. (2022). Can shared micromobility programs reduce greenhouse gas emissions: Evidence from urban transportation big data. *Sustainable Cities and Society*, 85, 104045. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104045>
- SUPER73 Europe. (2024). *Why, What and Where To Recycle Ebike Waste*.
<https://eu.super73.com/en-de/pages/recycling>
- Tagesschau. (2024). *Unfälle mit E-Scootern in Deutschland: Anstieg der Zahlen*.
<https://www.tagesschau.de/wirtschaft/verbraucher/unfaelle-e-scooter-deutschland-anstieg-100.html>
- Tempelmeier, H. (2018). *Begriff der Logistik, logistische Systeme und Prozesse*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57769-1>
- TIER. (2024, September 10). *Sustainability*. <https://www.tier.app/de/sustainability>
- Tischner, U., & Hora, M. (2019). Sustainable electronic product design. In (pp. 443–482).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102158-3.00017-3>
- Trittbrett Helden. (2024, September 10). <https://trittbretthelden.de/>
- Tung, H. I. (2022). *IKEA Urban Multi Hub: Concept development for future mobility and last-mile delivery* [Student thesis]. <https://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1705002&dswid=4533>
- Umicore Deutschland. (2024a, September 10). *eSkootr Championship™ und Umicore recyceln die Batterien des E-Scooters S1-X*.
<https://www.umicore.de/de/presse/news/eskootr-championship-und-umicore-recyceln-die-batterien-des-e-scooter-s1-x/>
- Umicore Deutschland. (2024b, September 10). *Über uns*.
<https://www.umicore.de/de/de/about/>
- Umweltbundesamt. (2022, March 14). *Berechnung der Treibhausgasemissionsdaten für das Jahr 2022 gemäß Bundesklimaschutzgesetz: Begleitender Bericht Kurzfassung vom 15. März 2023*.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/vjs_2022_-_begleitbericht_final_kurzfassung.pdf
- Vizologi. (2024). *TIER business model canvas*. <https://vizologi.com/business-strategy-canvas/tier-business-model-canvas/>
- Well Done Tips. (2018, September 25). *Xiaomi M365 Battery Issues - Diagnose And Repair*.
<https://www.youtube.com/watch?v=uUEI9BMblfc>
- Zhang, X., Zhang, S., Zhang, L., Xue, J., Sa, R., & Liu, H. (2019). Identification of product's design characteristics for remanufacturing using failure modes feedback and quality function deployment. *Journal of Cleaner Production*, 239.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117967>
- ZVEI: Die Elektroindustrie. (2020). *Versand von Lithium-Ionen-Batterien und Lithium-Ionen-Batterien in/mit Geräten: Umsetzung der Gefahrgut-Vorschriften* [ZVEI Merkblatt Nr.

36].

https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Verband/Fachverbaende/Elektrowerkzeuge/Neue_Merkblaetter_zum_Transport_von_Lithium-Ionen-Batterien/Versand-von-Lithium-Ionen-Batterien-2021-DE_TD201202.pdf

DI-Kategorie	DIK-Identifikator	DIK-Beschreibung	Handlungsempfehlung	Rethink	Rethink and Reconfigure	Raw Materials Sourcing	Manufacturing	Product Design Operation	Logistics and Packaging	Upgrade	Repair and Maintenance	Reuse	Refurbishment	Remanufacture	Repair/Reuse	Recycle	Cascade	Recover
DI -> A*	DI 101	Kennzeichnen der Produktarchitektur	...	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
DI -> A*	DI 102	Bestimmen der Produktanforderungen	...	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
DI -> A*	DI 103	Bestimmen der Produktanforderungen	...	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
DI -> A*	DI 104	Bestimmen der Produktanforderungen	...	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
DI -> A*	DI 105	Bestimmen der Produktanforderungen	...	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
DI -> A*	DI 106	Bestimmen der Produktanforderungen	...	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
DI -> A*	DI 107	Bestimmen der Produktanforderungen	...	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
DI -> A*	DI 108	Bestimmen der Produktanforderungen	...	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
DI -> A*	DI 109	Bestimmen der Produktanforderungen	...	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
DI -> A*	DI 110	Bestimmen der Produktanforderungen	...	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Abbildung 17 Anwendungsleitfaden für Methodenentwurf zur Bewertung der Kreislaufgerechtigkeit

Abbildung 18 zeigt das Formblatt zur Methode:



		Numerierung		Scooter Baugruppen/-teile					
				1	2	3	4	5	...
DfCE-Merkmale	Numerierung	Gewichtung	Korrelationsfaktoren		Vorderad	Gabel	Vorbau
			DfCE-Kategorie	DfCE-Merkmale					
1	Df Reinigbarkeit	Vermeiden von Schäden während des Reinigungsproz	0	10	0
2	Df Reinigbarkeit	Gestaltung zur Vermeidung von Schmutzansammlung	5	0	0
3	Df Reinigbarkeit	Einfache Reinigbarkeit des Produkts und Komponenten	10	5	X
4
5
...
				Gesamtpunktzahl	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ
				Prozentualer Erfüllungsgrad (Kreislaufgerechtheitsfaktor)	%	%	%	%	%

Abbildung 18 Formblatt des Methodenentwurfs

Schritt 1: Relevante DfCE-Merkmale

- Festlegung der für die Bewertung wichtigen DfCE-Merkmale anhand der Zuordnungsmatrix
- Eintragen der Merkmale in Spalte „DfCE-Merkmale (Optional: Eintragung der übergeordneten DfCE-Kategorien)“
- Bei Bedarf: Festlegung von Gewichtungen der einzelnen Merkmale

Schritt 2: Baugruppen/-teile

- Eintragen der zu bewertenden Bauteile des Scooters in Zeilen unter „Scooter Baugruppen/-teile“

Schritt 3: Bewertung des Erfüllungsgrads

- Bewertungs-Skala:
 - 0: Baugruppe/-teil erfüllt das DfCE-Merkmal nicht
 - 5: Baugruppe/-teil erfüllt das DfCE-Merkmal ein bisschen. Es besteht Optimierungspotenzial
 - 10: Baugruppe/-teil erfüllt das DfCE-Merkmal voll

Schritt 4: Auswertung

- Zeilenweise Multiplikation von Gewichtung und Erfüllungsgrad je Baugruppe/-teil. Das Ergebnis ist die Gesamtpunktzahl für die jeweilige Baugruppe/-teil.
- Ermittlung des prozentualen Erfüllungsgrades aller Kriterien je Baugruppe/-teil:

$$\text{Kreislaufgerechtheitsfaktor} = \frac{\text{Gesamtpunktzahl}}{\sum \text{Gewichtungen} \cdot \sum \text{DfCE-Merkmale}}$$

9.2 Anhang zu Kapitel 6

Tabelle 20: Kontaktierte Akteure in der E-Scooter-Branche

Akteur	Kategorie
DECATHLON Deutschland SE & Co. KG	Instandhaltung
EURONICS Deutschland eG	Instandhaltung
Sertronics GmbH (kaputt.de)	Instandhaltung
Lime	Mobilitätsanbieter
Bolt	Mobilitätsanbieter
Tier	Mobilitätsanbieter

Anhang

Voi	Mobilitätsanbieter
Micro	Hersteller
Xiaomi	Hersteller
Niu	Hersteller
Streetbooster	Hersteller
Egret	Hersteller
OKAI	Hersteller
Vertical Values	Recycler
Ratio Recycling	Recycler
Fortum Batterie Recycling GmbH	Recycler
Alba Süd	Entsorgungslogistik
Remondis	Entsorgungslogistik
Karle Recycling	Entsorgungslogistik
Fele	Hersteller
Kühn Entsorgung	Entsorgungslogistik
Fele	Hersteller
escooter-held.de	Online-blog
Scooterhelden.de	Online-blog
DellCon GmbH	Entsorgungslogistik Testing
Rohstoffhandel Rheinland	Recycler
hpm	Recycler, Logistik
anonym	Recycler
Wertstoffhof Münster	Recycler
Veolia	Recycler
Jörg Aulfinger	Recycler
Dinkel Entsorgung Stuttgart	Recycler
Sued REC	Recycler
Scholz Recycling GmbH	Recycler
CRONIMET Holding GmbH	Recycler
PreZero Stiftung & Co. KG	Recycler
L+N RECYCLING GMBH	Recycler
CCI Transport GmbH & Co.KG	Entsorgungslogistik
Diversa Speditionsgesellschaft	Entsorgungslogistik
REL Recycling Entsorgung & Logistik GmbH	Entsorgungslogistik
Ratio Recycling Baden GmbH	Recycler
Hermann Gehring und Söhne Entsorgungsgesellschaft mbH	Entsorgungslogistik
Walter Eisl Horec Recycling	Recycler
Korn Recycling	Recycler
Scherrieble Group	Recycler/Entsorgungslogistik
FISCHER WEILHEIM MANAGEMENT GMBH	Recycler
Steinel Recycling GmbH + Co KG	Recycler
SAA Sonderabfallagentur Baden-Württemberg GmbH	Entsorgungslogistik
KURZ Entsorgung GmbH	Entsorgungslogistik
TPLUS GmbH	Entsorgungslogistik
Umicore	Recycler

XT-Sports	Händler
ITS-mobility	Cluster für intelligente Mobilität
Emco	Anbieter
Govecs	Hersteller
micro mobility systems (micro)	
Reparatur Helfer	Reparatur
solare mobility	Hersteller

Zirkuläre Beschaffung: Einkauf von erneuerbaren oder recycelten Materialien

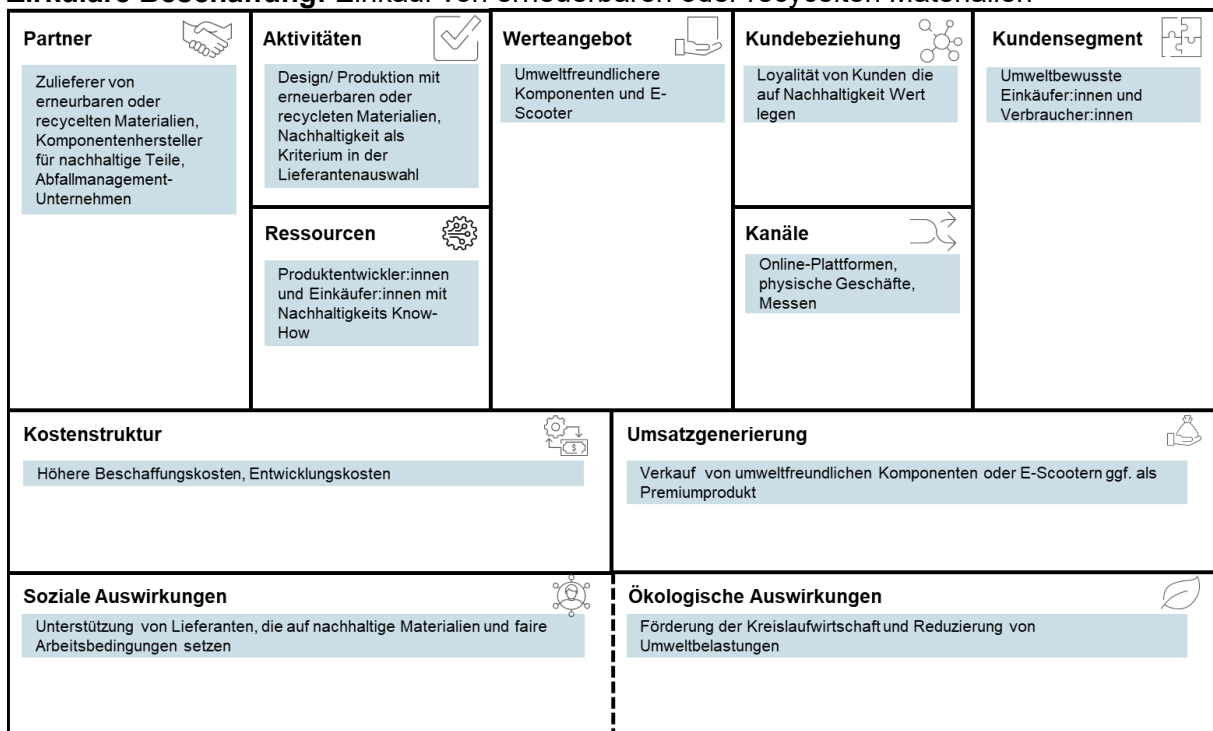


Abbildung 19 Ausgefülltes zirkuläres Business Modell Canvas für das Geschäftsmodellmuster zirkuläre Beschaffung

Product-as-a-service, Sharing-Plattform: Produktzugang ohne Besitzübergang; Teilen von Produkten

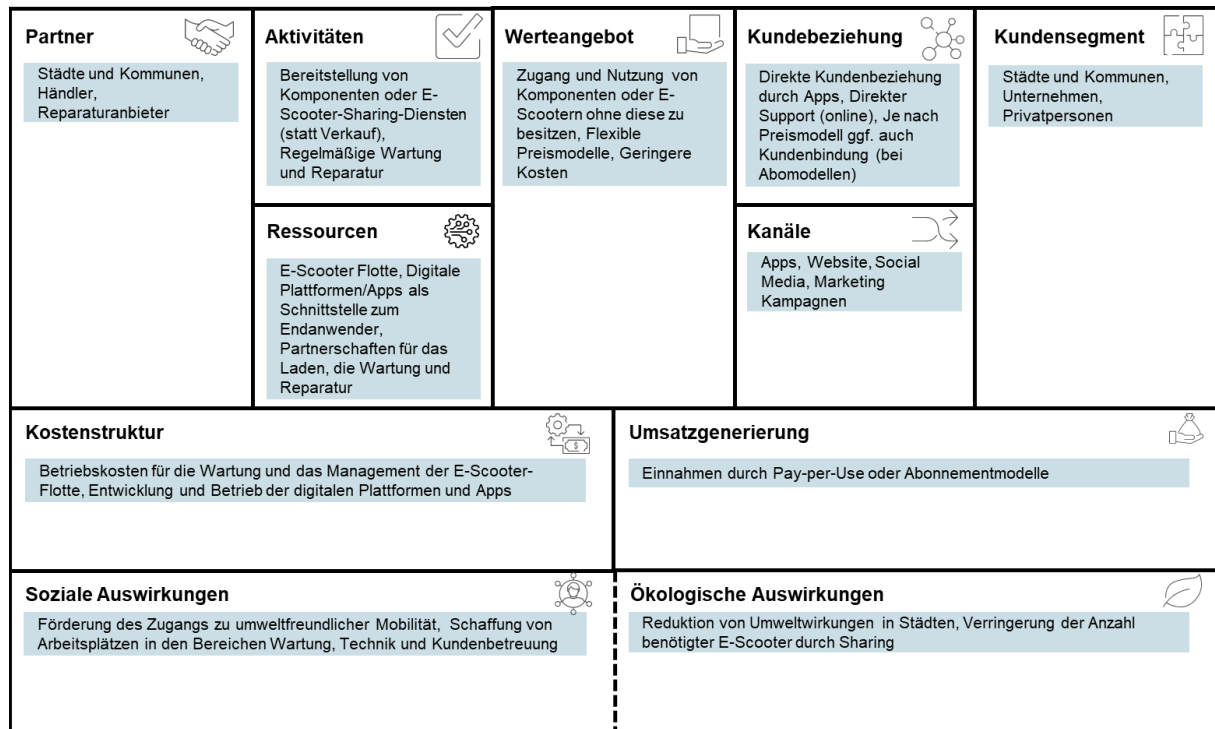


Abbildung 20 Ausgefülltes zirkuläres Business Modell Canvas für das Geschäftsmodellmuster Product-as-a-service

Reparatur und/oder Refurbishing: Reparatur oder Upgrading

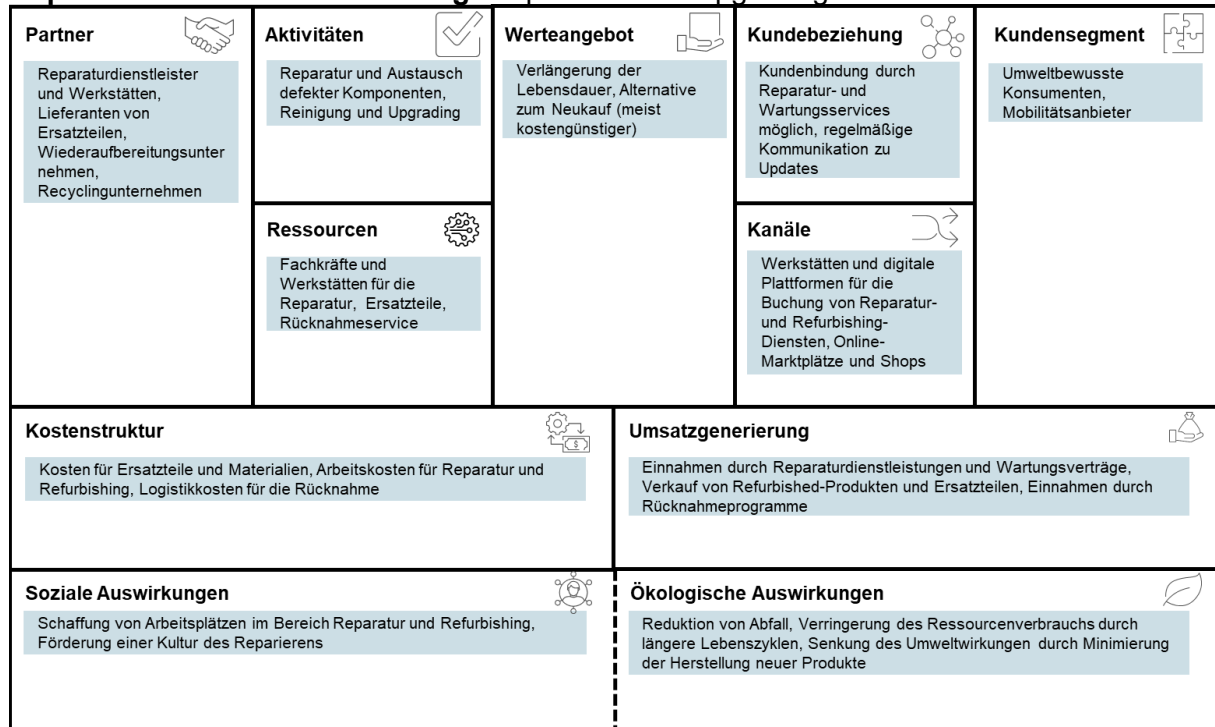


Abbildung 21 Ausgefülltes zirkuläres Business Modell Canvas für das Geschäftsmodellmuster Reparatur und Refurbishing

Remanufacturing: Wiederaufbereitung

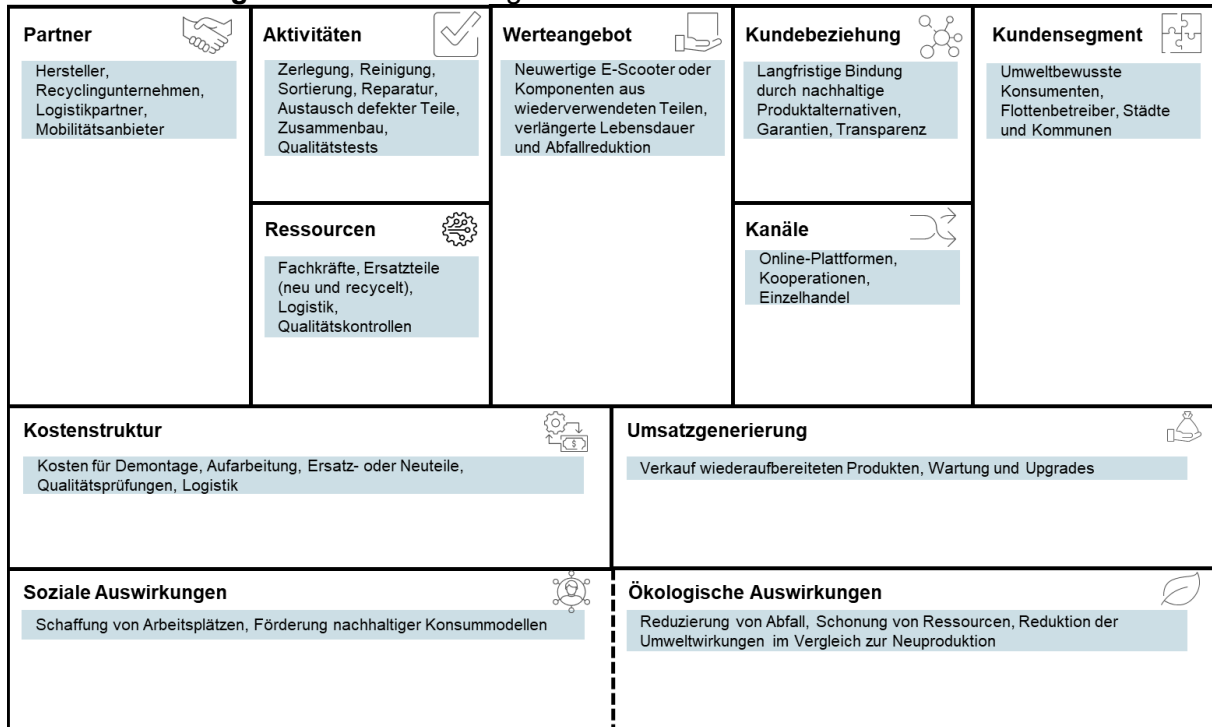


Abbildung 22 Ausgefülltes zirkuläres Business Modell Canvas für das Geschäftsmodellmuster Remanufacturing

Repurposing: Umfunktionierung

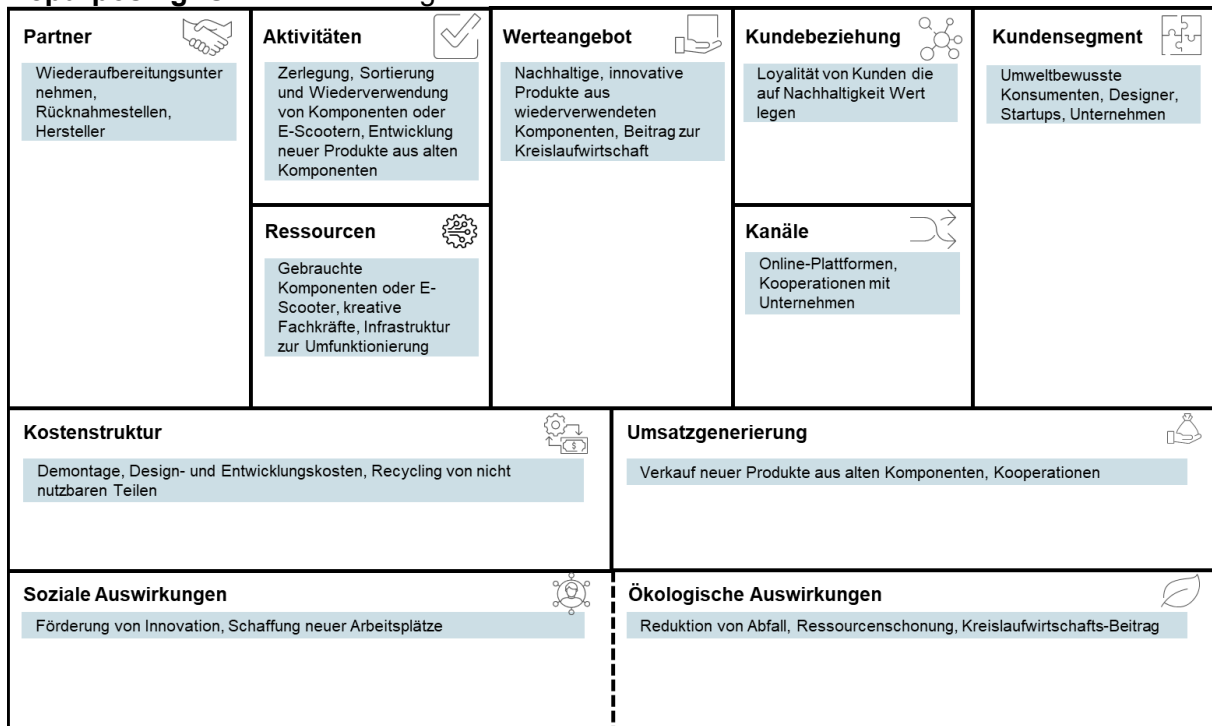


Abbildung 23 Ausgefülltes zirkuläres Business Modell Canvas für das Geschäftsmodellmuster Repurposing

Recycling: Verwertung von Materialien

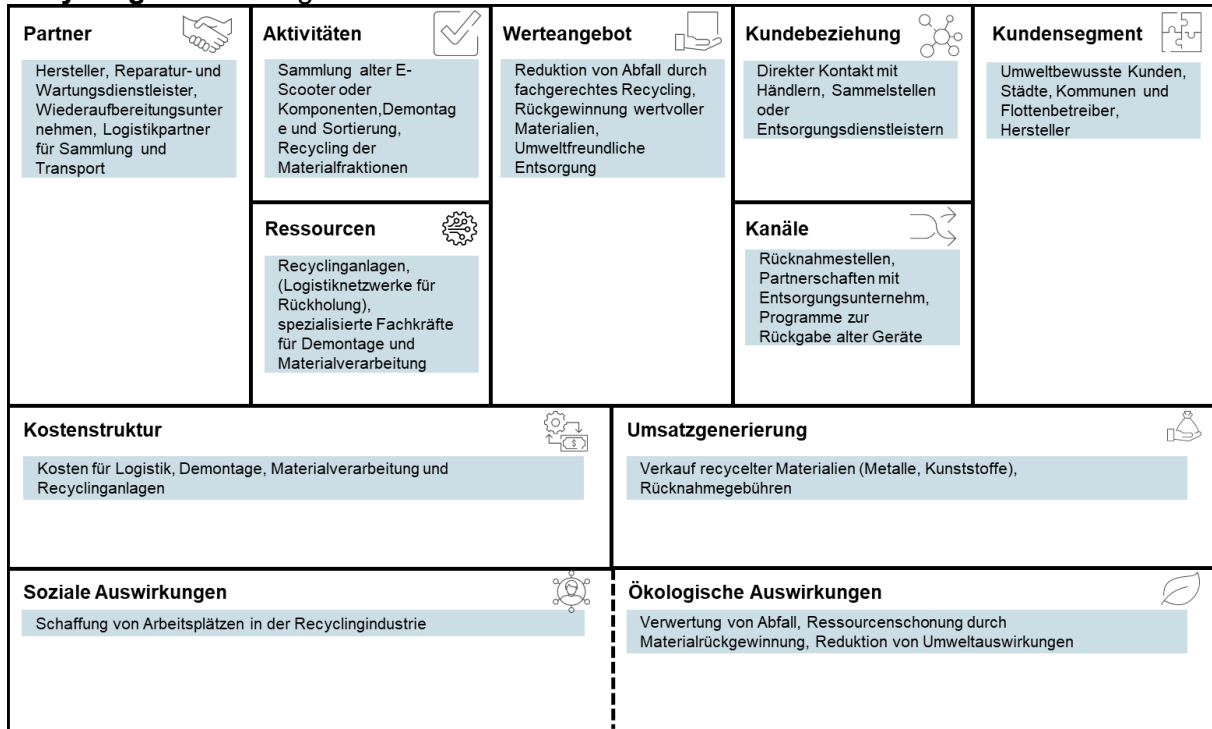


Abbildung 24 Ausgefülltes zirkuläres Business Modell Canvas für das Geschäftsmodellmuster Recycling