



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie: Eine Analyse von Strategien und Konzepten für ein nachhaltiges End-of-Life Management von Traktionsbatterien in Europa

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des wissenschaftlichen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

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

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

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Fabian Holly B.Sc.

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

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Lukas Grolmusz B.Sc.

Wien, im Juli 2023

Lukas Grolmusz



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

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

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

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

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

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen aufrichtigen Dank an all jene Menschen aussprechen, die mich bei der Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt haben und ohne deren Hilfe diese Arbeit so nicht möglich gewesen wäre.

Mein besonderer Dank gilt hierbei meinem Betreuendenteam für die ausgezeichnete fachliche und inhaltliche Unterstützung bei der Ausarbeitung dieses spannenden Themas. Vielen Dank für die investierte Zeit und die stets wertvollen Ratschläge.

Seitens Technischer Universität Wien möchte ich Sebastian Schlund und Fabian Holly für die Leitung sowie Betreuung dieser Arbeit und die Ermöglichung meiner Themenwahl danken, zweiterem auch für seine wertvollen Inputs zur Kreislaufwirtschaft und zum wissenschaftlichen Arbeiten.

Von der EFS Unternehmensberatung GmbH geht mein Dank vor allem an Günther Kolar, für seine hilfreichen Beiträge und seine Expertise zu Kreislaufwirtschaft und Automobilindustrie, aber auch für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit. Vielen Dank an Laya Trauttmansdorff, für den regelmäßigen Austausch zum Fortschritt der Arbeit und die laufende Korrektur der Inhalte. Danke auch an das Team von EFS China für die interessanten Einblicke in den chinesischen EV-Markt.

Weiters gilt mein Dank Andreas Lehner von Fraunhofer Austria Research GmbH, der mir vor allem zu Anfang half, den richtigen Fokus für diese Diplomarbeit zu finden.

Ein großer Dank geht auch an Adelheid Astner, Simon Harreither und Kevin Daninger, die sich kurzerhand dazu bereit erklärt haben, meine Arbeit Korrektur zu lesen. Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Freunden und meiner Familie bedanken. Euer bedingungsloser Rückhalt, nicht nur während dieser Diplomarbeit und des Studiums, sondern entlang meines gesamten Lebenswegs, ist für mich von unschätzbarem Wert.

Kurzfassung

Der Automobilsektor steht derzeit vor der enormen Herausforderung, Traktionsbatterien für ihre Elektrofahrzeuge und somit den fortschreitenden Wandel zur Elektromobilität umweltfreundlicher zu gestalten. Um dabei auch das wirtschaftliche Potenzial dieses Vorhabens auszuschöpfen, konzentrieren sich Herstellende zunehmend auf Ansätze der Kreislaufwirtschaft.

Die einschlägige Literatur befasst sich zwar bereits ausgiebig mit dieser Thematik, jedoch existieren bisher nur wenige Studien, die Aufschlüsse über konkrete Handlungen der Agierenden des Sektors bieten. Ziel dieser Arbeit ist deshalb, die aktuellen Fortschritte bei der Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien der führenden Unternehmen der Branche zu erfassen, um aktuelle Prioritäten und zukünftige Entwicklungen umfassend darzustellen. Mit besonderem Augenmerk auf Strategien zur Verlängerung der Lebensdauer von Traktionsbatterien werden in dieser Arbeit außerdem die Herausforderungen, Entscheidungsgründe und Kooperationen untersucht, die den Erfolg des Wandels beeinflussen.

Dazu wird zunächst eine systematische Analyse relevanter wissenschaftlicher Literatur durchgeführt, um aktuelle Aspekte der CE bei Traktionsbatterien zu untersuchen und Herausforderungen für den Sektor zu identifizieren. Darauf aufbauend wird eine Multiple Case Study mit 20 führenden Unternehmen der Branche durchgeführt, um den vorherrschenden Stand der Umsetzung einzelner zirkulärer Strategien darzustellen und Aussagen für den gesamten Sektor abzuleiten. Die notwendigen Informationen zur Durchführung der Studie werden durch eine Analyse grauer Literatur gewonnen und umfassen somit aktuelle und von den Herstellenden selbst veröffentlichte Informationen.

Das Ergebnis dieser Arbeit sind Strategiematrizen, die zeigen welche Strategien derzeit im Fokus der Herstellenden stehen und welche nicht umfassend berücksichtigt werden. Die Analyse zeigt dabei, dass sich Unternehmen momentan vor allem auf Strategien zur Reduktion des Ressourceninputs während der Produktion und demzufolge auch auf das Recycling von Traktionsbatterien konzentrieren. Zur Verlängerung der Lebensdauer beabsichtigen die Herstellenden vorrangig die Wiederverwendung in Energiespeichern zur Unterstützung des elektrischen Energienetzes im industriellen Maßstab. Dabei zeigt sich aber auch ein großes Potenzial für künftige Anwendungen in privaten und mobilen Energiespeichern oder in Fahrzeugen mit geringeren Leistungsanforderungen. Zwar verfolgen mehrere Herstellende bereits die Reparatur von Traktionsbatterien oder deren Wiederverwendung am Aftersales Markt, derzeit jedoch höchstens auf Modulebene. Das Remanufacturing befindet sich gegenwärtig noch im Entwicklungsstadium und findet dementsprechend noch kaum Anwendung.

Abstract

The automotive industry is currently facing the enormous challenge of a more environmentally friendly transition to electric mobility. Traction batteries are at the centre of these efforts. In order to exploit the economic potential of this endeavour, manufacturers are increasingly focusing on circular economy (CE) approaches.

Although the relevant literature already discusses this topic extensively, so far only a few studies exist that provide information about concrete actions of the actors in the sector. Therefore, this thesis presents the current priorities and necessary developments by comprehensively mapping the CE strategies of the leading companies in the automotive sector. With a particular focus on traction battery life extension strategies this thesis also examines the challenges, decision-making rationales, and collaborations that influence the success of change.

To this end, a systematic analysis of relevant scientific literature is first carried out to examine current aspects of CE in traction batteries and identify challenges for the sector. Based on this, a multiple case study will be conducted with 20 leading companies in the sector to present the current status of implementation of individual circular strategies and to derive statements for the sector as a whole. The necessary information to conduct the study will be obtained through an analysis of grey literature and thus primarily comprise current information published by the manufacturers themselves.

The results are strategy matrices that show which strategies manufacturers are currently focussing on and which are currently not comprehensively considered. The analysis shows that companies are focusing primarily on strategies to reduce resource inputs during production and, consequently, on recycling of traction batteries. To extend the service life, manufacturers primarily intend to repurpose traction batteries in energy storage systems to support the electrical energy grid on an industrial scale. This also offers great potential for future applications in private and mobile energy storage systems, or in vehicles with lower power requirements. Although several manufacturers are already pursuing the repair of traction batteries or their reuse in the aftersales market, this is done so far only at module level. The remanufacturing is currently still in the development stage and is therefore hardly used at all.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeine Einleitung in das Themenfeld.....	1
1.2	Problemstellung und Forschungsfragen	3
1.3	Lösungsansatz und Methodik	4
1.4	Aufbau und Struktur der Arbeit	5
2	Theoretische Grundlagen.....	7
2.1	Grundlagen der CE.....	7
2.1.1	Entwicklung der CE.....	8
2.1.2	Ziele und Prinzipien	10
2.1.3	CE und nachhaltige Entwicklung.....	13
2.1.4	Wertschöpfungsmodelle in der CE.....	14
2.1.5	Wandel von der Linearwirtschaft zur CE	17
2.1.6	CE in der EU	19
2.1.7	CE im Automobilsektor	21
2.2	Elektromobilität im Individualverkehr	23
2.2.1	Grundlagen der Elektromobilität.....	23
2.2.2	Elektrifizierte Fahrzeuge	24
2.2.3	Entwicklung der Elektromobilität	26
2.2.4	Wertschöpfungsketten im Automobilsektor	27
2.3	Batterietechnologie.....	28
2.3.1	Batteriespezifische Parameter	28
2.3.2	Batterietypen in EVs	30
2.3.3	Aufbau von Traktionsbatterien	32
2.3.4	Relevante Batteriematerialien	33
2.3.5	LIB-Chemien für Traktionsbatterien	37
3	Aktuelle CE-Strategien bei EVBs	39
3.1	Systematische Literaturanalyse.....	39
3.1.1	Planung der Literaturanalyse	40
3.1.2	Durchführung der Literaturanalyse.....	41
3.2	Aspekte der CE für EVBs	46

3.2.1	Zirkuläre Wertschöpfungsketten	46
3.2.2	Zirkuläre Geschäftsmodelle	49
3.2.3	Innovative Technologien	53
3.2.4	Zirkuläres Produktdesign von Traktionsbatterien	56
3.2.5	Politische Maßnahmen	57
3.3	Herausforderungen für den Automobilsektor	58
4	Methodik	61
4.1	Forschungsansatz der MCS	61
4.1.1	Forschungsstrategie	61
4.1.2	Forschungsdesign.....	61
4.2	Fallauswahl und Stichprobe	62
4.3	Datenerhebung und Datenanalyse	64
4.3.1	Datenquellen.....	64
4.3.2	Datensammlung und Datenorganisation	66
4.3.3	Datenanalyse	66
4.4	Kriterien zur Qualitätsbewertung	67
5	Ergebnisse der MCS	69
5.1	Allgemeine Umsetzung von CE-Ansätzen.....	69
5.2	Umsetzung von CE-Ansätzen bei Traktionsbatterien	70
5.3	Produktions- und Nutzungsphase.....	72
5.3.1	Rethink (R1).....	72
5.3.2	Reduce (R2).....	75
5.4	Verlängerung der Lebensdauer	78
5.4.1	Reuse (R3).....	78
5.4.2	Repair und Refurbish (R4 und R5).....	79
5.4.3	Remanufacture (R6)	80
5.4.4	Repurpose (R7)	81
5.5	Nutzung der Batteriematerialien	86
6	Diskussion und Ausblick	90
6.1	Beantwortung der Forschungsfragen	90
6.2	Diskussion der Ergebnisse	93
6.3	Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse	96

6.4	Nächste mögliche Schritte zur Weiterentwicklung	97
7	Anhang.....	98
7.1	Herausforderungen für den Automobilsektor	98
7.2	Konzeptmatrix	105
8	Literaturverzeichnis	108
9	Abbildungsverzeichnis	122
10	Tabellenverzeichnis	123
11	Abkürzungsverzeichnis	124

1 Einleitung

In der Europäischen Union (EU) ist der Verkehr für rund ein Viertel der gesamten CO₂-Emissionen verantwortlich, wobei etwa 72 Prozent auf den Straßenverkehr, mit dem Personenindividualverkehr als Hauptemissionsträger entfallen (Europäisches Parlament, 2022a). Daher verstärken politische EntscheidungsträgerInnen und Fahrzeugherstellende ihre Bemühungen im Bereich der Elektromobilität, um gängige Technologien wie batterieelektrische Fahrzeuge und Hybridfahrzeuge attraktiver zu gestalten und somit ökologische und gesellschaftliche Ziele erreichen zu können (Bibra et al., 2021).

Mittlerweile ist der Markt für Elektroautos so dynamisch wie kaum ein anderer im Bereich der umweltfreundlichen Energietechnologien. Dies spiegeln auch die stark steigenden Absatzzahlen des Sektors wider. Sowohl im Jahr 2020 als auch 2021 konnte sich die Zahl der neu zugelassenen Elektrofahrzeuge („Electric Vehicles“, EVs) im Vergleich zu den jeweiligen Vorjahren verdoppeln. Schätzungen zufolge könnten je nach Entwicklungsszenario bis zum Jahr 2030 weltweit zwischen 145 und 230 Mio. EVs im Umlauf sein (Bibra et al., 2021; International Energy Agency, 2022).

Aufgrund dieses rasanten Anstiegs sehen sich Automobilherstellende derzeit mit zwei großen Problemfeldern konfrontiert. Zum einen ergeben sich Versorgungsrisiken aus der begrenzten Verfügbarkeit und der weltweit ungleichen Verteilung von Rohstoffen (Van den Brink et al., 2020). Hierbei gelten vor allem Lithium, Kobalt und natürlicher Graphit als kritische Materialien, welche zukünftig von Versorgungsknappheit und daraus resultierend von stark volatilen Preisen betroffen sein könnten (Rajaeifar et al., 2022). Darüber hinaus werfen der Abbau und die Veredelung der zur Batterieproduktion benötigten Materialien eine Vielzahl ökologische und soziale Probleme auf. Darunter fallen etwa massive Eingriffe in die Natur, erheblicher Verbrauch fossiler Energie oder unwürdige Arbeitsbedingungen (Nurdiawati & Agrawal, 2022).

Zum anderen wird aufgrund des vorherrschenden Trends zur E-Mobilität voraussichtlich bis zum Jahr 2030 die erste Welle von Traktionsbatterien eintreffen, die das Ende ihres ersten Lebenszyklus erreicht haben. Diese kann die EU alleine mit über einer Mio. Tonnen ausrangierter Traktionsbatterien überrollen (Kastanaki & Giannis, 2023).

1.1 Allgemeine Einleitung in das Themenfeld

Die genannten Entwicklungen erfordern es, die bisherigen linearen Produktionsweisen durch nachhaltige Konzepte zu ersetzen, um so langfristig ein kreislauffähiges Wirtschaftssystem im Kraftfahrzeugsektor zu etablieren (Nurdiawati & Kumar, 2022).

Die Ansätze der Kreislaufwirtschaft („Circular Economy“, CE) bestehen dabei aus kaskadierenden Kreisläufen, die den Ressourcenkreislauf durch Verlängerung der Lebensdauer eines Produktes oder einer Produktkomponente verlangsamen und durch Wiederverwendung der Materialien am Ende des Lebenszyklus schließen (Albertsen et al., 2021; Ellen MacArthur Foundation, 2013a).

Grundlegende Treiber dieser Transition sind politische Entscheidungen der Vereinten Nationen („United Nations“, UN) wie die Sustainable Development Goals (SDGs), das Pariser Klimaschutzabkommen und auf Ebene der EU der Green Deal, welche allesamt darauf abzielen, die globalen Treibhausgas (THG) Emissionen drastisch zu reduzieren und das Wirtschaftswachstum vom Ressourcenverbrauch zu entkoppeln (Desa, 2016; European Commission, 2019; UFGCC, 2015).

Neben diesen Regulatorien ist es vor allem der durch die Materialien eingebettete Wert, der Stakeholder dazu veranlasst, sich zunehmend mit der weiteren Nutzung von Traktionsbatterien nach dem ersten Lebenszyklus zu befassen (Albertsen et al., 2021). Die Umsetzung konkreter zirkulärer Geschäftsmodelle („Circular Business Models“, CBMs) wird jedoch durch eine Vielzahl von Barrieren kognitiver, organisatorischer oder technischer Natur erschwert (Olsson et al., 2018).

Die einschlägige Literatur befasst sich bereits ausführlich mit Fragen der nachhaltigen Nutzung von Rohstoffen im Zusammenhang mit Traktionsbatterien. So zeigen Lacy et al. (2020) die grundsätzlichen Möglichkeiten für die Einführung von CBMs in zehn verschiedenen Industriesektoren, darunter auch dem der individuellen Mobilität, auf und untersuchen Einsparpotenziale bei Abfällen über den gesamten Produktlebenszyklus (Lacy et al., 2020).

Albertsen et al. (2021) ermitteln in ihrer Arbeit, welche CBMs für Traktionsbatterien bereits von Erstausrüstenden („Original Equipment Manufacturers“, OEMs) in der EU umgesetzt werden und welche internen und externen Schlüsselfaktoren die Umsetzung vorantreiben. Außerdem untersuchen sie, welche politischen Entwicklungen notwendig wären, um die CE weiter zu etablieren (Albertsen et al., 2021). Ergänzend dazu untersuchen Nurdiawati & Kumar (2022) das potenzielle Volumen von EV-Batterieabfällen und die zukünftige Nachfrage nach wichtigen Materialien für die Batterieherstellung unter Berücksichtigung sozialer und technologischer Faktoren in Schweden (Nurdiawati & Kumar, 2022).

Einen wichtigen Beitrag zur Grundlagenforschung einzelner CBMs leisten beispielsweise Bobba et al. (2018) mit ihren Untersuchungen zu Second-Life-Anwendungen von EV-Batterien zur stationären Energiespeicherung. In dieser Arbeit werden einzelne Anwendungen hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit aus ökologischer, technischer und sozialer Sicht analysiert (Bobba et al., 2018). Cong et al. (2021) geben ebenfalls einen umfassenden Überblick über die Behandlung von Altbatterien und

konzentrieren sich auf deren Vorbehandlung, Aufarbeitung und das Recycling. Ergänzend dazu werden auch aktuelle Pilotprojekte und die gängige Praxis der beiden Verwertungsoptionen untersucht (Cong et al., 2021).

Die Literatur behandelt auch ausführlich die Herausforderungen und Chancen, die sich bei der Umsetzung von CE-Strategien ergeben. So beleuchten Alamerew & Brissaud (2020) die umgekehrte Lieferkette, die für ein effizientes Recycling von Altbatterien für EVs erforderlich ist, im Hinblick auf wirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Aspekte (Alamerew & Brissaud, 2020). Rajaeifar et al. (2022) geben einen ganzheitlichen Überblick über die Herausforderungen der Liefer- und Wertschöpfungskette von Traktionsbatterien. Die Verfassenden untersuchen die neuesten Entwicklungen und Forschungsrichtungen zu diesem Thema und gruppieren sie in Bezug auf Nachfrageprognosen, Versorgungsrisiken, regulatorische Fragen, Lebenszyklusanalysen und Rückwärtslogistik (Rajaeifar et al., 2022).

1.2 Problemstellung und Forschungsfragen

Der nachhaltige Umgang mit ausgedienten Traktionsbatterien wird bereits umfangreich und in unterschiedlichen Detaillierungsgraden in der gängigen Fachliteratur behandelt. Da der Markt von EVs und der technologische Fortschritt bei Traktionsbatterien einer hohen Dynamik unterliegen, wurden konkrete Anwendungen von CE-Strategien durch die Hauptagierenden des Sektors noch nicht umfassend untersucht. Diese Arbeit versucht, diese Forschungslücke zu schließen, in dem sie die folgende Forschungsfrage beantwortet:

- *Welche CE-Strategien verfolgen die Hauptagierenden des Automobilsektors im Hinblick auf Traktionsbatterien in Europa?*

Um die Forschungsfrage umfassend zu beantworten, werden in der vorliegenden Arbeit außerdem folgende Teilforschungsfragen behandelt:

- *Welche Herausforderungen ergeben sich für den Sektor hinsichtlich des Übergangs zur CE bei Traktionsbatterien?*
- *Aus welchen Gründen entscheiden sich OEMs bei Traktionsbatterien für ausgewählte Strategiepfade und wie weit ist deren Umsetzung?*
- *Welche Kooperationen gehen die betrachteten Unternehmen ein, um ihre CE-Strategien umzusetzen?*

Das Forschungsziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Strategiematrizen zur CE bei Elektrofahrzeugbatterien („Electric Vehicle Batteries“, EVBs), welche die derzeit gängigen und zukünftigen Praktiken ausgewählter Unternehmen des Sektors aufzeigen und deren Benchmark-Strategien bis 2030 darstellen. Zu diesem Zweck ist es notwendig, relevante CBMs zu identifizieren und ihre Umsetzung bei führenden

Agierenden im Automobilsektor zu analysieren. Dies ermöglicht einerseits einen umfassenden Vergleich der einzelnen CE-Strategien sowie deren Implementierungsgrad und deckt andererseits Stärken und Schwächen des Sektors für die Transition zur CE auf.

Aus dem übergreifenden Forschungsziel und den Teilforschungsfragen resultieren folgenden Teilforschungsziele für dieser Arbeit:

- Analyse der technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen für die Hauptagierenden des Sektors beim Übergang zur CE.
- Untersuchung der Entscheidungsgründe für einzelne Strategiepfade der Unternehmen und Abbildung des derzeitigen Ist-Stands der Umsetzung.
- Ermittlung der laufenden und geplanten Kooperationen der untersuchten Unternehmen in Bezug auf die Förderung der CE.

1.3 Lösungsansatz und Methodik

Um den aktuellen Stand der Forschung zur CE bei Traktionsbatterien darzustellen, wird zuerst eine systematische Literaturanalyse nach Xiao & Watson (2019) durchgeführt. Diese beschreibt einen dreiphasigen Ansatz bestehend aus Planung, Durchführung und Berichterstattung, um einen umfassenden Überblick über relevante Konzepte des Themengebiets zu erhalten und Hypothesen für die weitere Forschung abzuleiten (Xiao & Watson, 2019).

Um die vorherrschenden Ansätze zur Förderung der Zirkularität von EVBs zu untersuchen und ein aussagekräftiges Ergebnis hinsichtlich ihrer praktischen Umsetzung im Sektor zu erhalten, wird eine multiple Fallstudie („Multiple Case Study“, MCS) nach Yin (2009) durchgeführt. Dabei werden die einzelnen Fälle zunächst separat analysiert und anschließend die Ergebnisse dieser Einzelfallstudien miteinander verglichen, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Fällen identifizieren zu können (Yin, 2009). Zu diesem Zweck wird auf der Grundlage des Marktanteils eine Stichprobe der wichtigsten Unternehmen zusammengestellt, die in der EU Personenkraftwagen (PKW) verkaufen. Zusätzlich werden führende Herstellende von Batteriezellen untersucht, deren Produkte in der Automobilproduktion zur Ausstattung von EVs verwendet werden.

Die MCS basiert ebenfalls auf einer systematischen Literaturanalyse. Aufbauend auf die wissenschaftliche Literatur der aktuellen Forschung wird für die Strategiestudien hauptsächlich graue Literatur analysiert, um die aktuellen Entwicklungen des Sektors in die Forschung einzubeziehen. Diese graue Literatur umfasst öffentlich zugängliche Informationen auf den offiziellen Websites der Unternehmen und Veröffentlichungen in branchenspezifischen Zeitschriften (Mahood et al., 2014; Paez, 2017).

Schließlich werden die untersuchten CE-Aktivitäten der Hauptagierenden auf die zirkulären Strategien innerhalb der Produktionskette nach Potting et al. (2017) abgebildet. Diese stellen einen 9R- bzw. 10R-Ansatz zur Bewertung zirkulärer Strategien von Wertschöpfungsketten dar. Die Vorgehensweise bei dieser Arbeit ist in der folgenden Abbildung ersichtlich.

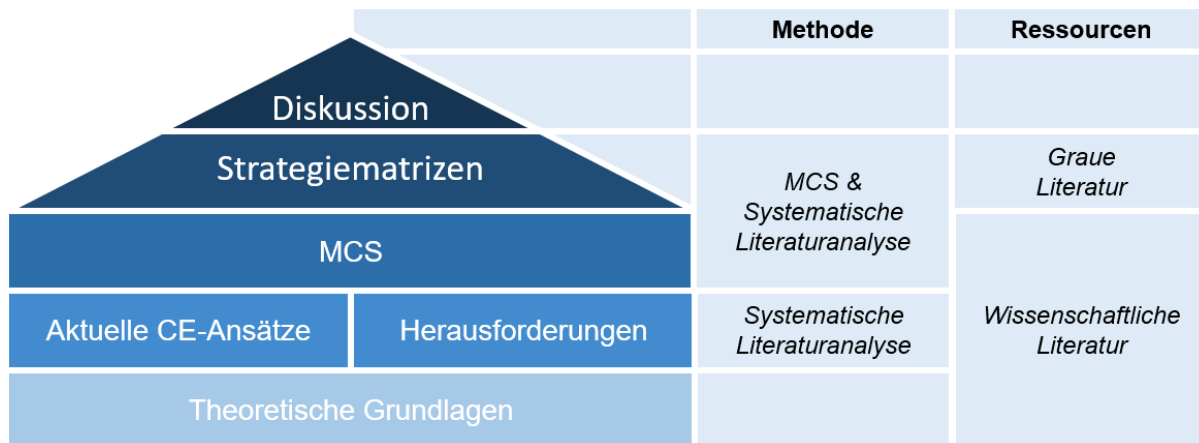


Abbildung 1: Vorgehensweise zur Ergebnisfindung

1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit

Nach dem kurzen Überblick über die Ausgangssituation, bisherige Studien und Forschungsfragen sowie das Forschungsdesign in den vorangegangenen Unterkapiteln, folgt in Kapitel 2 eine umfangreiche Einführung in die theoretischen Grundlagen zur CE bei Traktionsbatterien. Dazu wird zuerst der Begriff der CE definiert, gefolgt von einer Erläuterung der zentralen Begriffe der Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr und der Technologie von Traktionsbatterien.

In Kapitel 3 wird der aktuelle Stand der Forschung zur Umsetzung von CE-Ansätzen in Bezug auf Traktionsbatterien von PKW aufgezeigt. Dazu werden zunächst die Vorgehensweise der systematischen Analyse wissenschaftlicher Literatur skizziert, gefolgt von der Darstellung der aktuellen Erkenntnisse zur CE bei Traktionsbatterien. Abschließend folgt eine Zusammenfassung der Herausforderungen des Automobilsektors hinsichtlich der Transition zur CE bei Antriebsbatterien.

Kapitel 4 widmet sich der Methodik der Forschung und beginnt mit der Beschreibung des Forschungsansatzes. Es folgen die Auswahl und Begründung der untersuchten Unternehmen in der Stichprobe, sowie die für die Analyse verwendete Literatur der MCS. Abschließend wird auf die berücksichtigten Qualitätskriterien der Forschung hingewiesen.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Analyse vorgestellt, beginnend mit einer Übersicht der allgemeinen Umsetzung von CE-Ansätzen in den Unternehmensstrategien. Darauf folgt ein zusammenfassender Überblick der

Umsetzung der zirkulären Strategien in Bezug auf Traktionsbatterien, inklusive Strategiematrizen, welche die von den einzelnen Unternehmen verfolgten CE-Strategien widerspiegeln. Anschließend wird die detaillierte Auswertung der Ergebnisse zu den einzelnen CE-Strategien vorgestellt.

Im abschließenden Kapitel 6 folgt nach der Beantwortung der Forschungsfragen eine kritische Diskussion der gewonnenen Erkenntnisse. Zum Schluss werden die Einschränkungen der Analyse angeführt und der weitere Forschungsbedarf inklusive Handlungsempfehlungen zur Umsetzung von CE-Strategien bei Traktionsbatterien abgeleitet.

2 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel legt das theoretische Fundament und definiert relevante Begriffe der CE, der Elektromobilität und der Technologie von Traktionsbatterien für die folgenden Kapitel. Für die CE werden zuerst grundlegende Konzepte und deren Entwicklung beschrieben und der Übergang von der derzeitigen linearen Wirtschaftsweise hin zu einer zirkulären erläutert. Abschließend werden die Bestrebungen der EU und der aktuelle Aspekte des Automobilsektors in Bezug auf die CE näher beleuchtet.

Im Abschnitt zur Elektromobilität werden zunächst die grundlegenden Charakteristika und Entwicklungen des Automobilsektors dargestellt und die verschiedenen elektrifizierten Antriebskonzepte detailliert behandelt. Darauf folgend werden die Entwicklung des Marktes für EVs und die Wertschöpfungsketten der Branche eingehend thematisiert.

Der Abschnitt zur Batterietechnologie definiert anfangs wesentliche Begriffe für Antriebsbatterien und schafft einen Überblick zu den unterschiedlichen Batterietypen für EVs und deren Aufbau. Darüber hinaus werden die derzeit gängigen Batteriematerialien und Materialkombinationen ausführlich behandelt.

2.1 Grundlagen der CE

Das Konzept der CE gewinnt in Wissenschaft und Praxis zunehmend an Popularität, dennoch unterliegt der Begriff bis dato noch keiner einheitlichen Definition (Kirchherr et al., 2023).

In ihren Grundzügen stellt die CE ein Wirtschaftssystem dar, in dem das Konzept des Lebensendes („End of Life“, EoL) von Produkten vollständig durch die Reduzierung, Wiederverwendung und -verwertung von Materialien ersetzt wird. Die Anwendung erstreckt sich dabei über die Herstellungs-, Vertriebs- und Verbrauchsprozesse der Produkte. Ziel ist es, eine gesellschaftliche Entwicklung entlang der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit zu erreichen, und so wirtschaftlichen Wohlstand, Umweltqualität und soziale Gerechtigkeit in Einklang zu bringen. Die Verwirklichung dieses Ziels erfordert einen ganzheitlichen systemischen Wandel in Form von verantwortungsvollen Geschäftsmodellen („Business Models“, BMs) und Konsummustern, von der Mikroebene der Unternehmen, den Nutzenden und Produkte bis hin zur Makroebene der Städte, Regionen, Nationen und darüber hinaus (Kirchherr et al., 2017).

Die CE stellt somit ein holistisches System des wirtschaftlichen Handelns dar, welches das Wachstum vom Verbrauch rarer Ressourcen entkoppelt. Die produktive Nutzung dieser Ressourcen soll so lange wie möglich erhalten bleiben und am EoL in höchstmöglicher Qualität in das System zurückgeführt werden (Lacy et al., 2020, S. 1-

16). Durch das grundlegende Prinzip der Zirkularität werden Ressourcen und Energie in geschlossenen Kreisläufen geführt und so der Bedarf an Rohmaterialien reduziert (Sopha et al., 2022).

2.1.1 Entwicklung der CE

Die heutige Wirtschaft basiert auf einer linearen Ressourcennutzung, die mit der Gewinnung von Rohstoffen beginnt, über die Herstellung und Verwendung von Produkten bis hin zu deren Entsorgung nach dem Gebrauch reicht. Die Abfälle werden entweder auf Deponien endgelagert oder zur Energieerzeugung thermisch verwertet, wobei beide Möglichkeiten in der Zerstörung der Ressourcen enden (Lacy et al., 2020, S. 1-16).

Diese Art zu wirtschaften besitzt ihren Ursprung in der ersten industriellen Revolution und dem daraus resultierenden Raubbau von Ressourcen. In den 1960er Jahren gab es die ersten wissenschaftlichen Untersuchungen über die Auswirkungen dieser Wirtschaftsweise auf die Umwelt. Daraus entwickelte sich der Grundgedanke, das Ökosystem der Erde durch Rückführung begrenzter Ressourcen als Kreislauf zu betreiben, wodurch die Ressourcen unbegrenzt zur Verfügung stünden (Boulding, 1966; Prieto-Sandoval et al., 2018).

Aus diesen Entwicklungen entstanden ab den späten 1980er Jahren die Ansätze der industriellen Ökologie. Diese vergleicht die Aktivitäten industrieller Ökosysteme mit jenen der Natur, deren Ressourcen sich in einem komplexen Netz von Wechselwirkungen befinden, in dem die Abfallprodukte eines Organismus als Nährstoffe für andere dienen. Diese Eigenschaften werden auf industrielle Produktionsmethoden angewendet, in dem Rohmaterialien, Produkte und Abfälle ein industrielles Ökosystem bilden (Ayres, 1989; Frosch & Gallopoulos, 1989).

Diese Ansätze führten schließlich zur Etablierung der Recyclingökonomie. Wie die lineare Ökonomie erfordert auch eine auf Recycling basierende Wirtschaft den Input von Rohstoffen und produziert Abfälle, konzentriert sich dabei aber auf die Rückgewinnung von Ressourcen. Wobei die Energie für die Prozesse hauptsächlich aus fossilen Quellen stammt (Prieto-Sandoval et al., 2018; Van Buren et al., 2016).

Der mit dieser heute noch üblichen Wirtschaftsweise einhergehende globale Ressourcenverbrauch führt zu einer enormen Überbeanspruchung der Regenerationsfähigkeit natürlicher Ökosysteme, für deren Erhalt derzeit jährlich 1,75 Planeten benötigt würden (Earth Overshoot Day, 2022). Setzt sich diese Kopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch weiter fort, werden zunehmendes Bevölkerungswachstum und steigender Wohlstand dazu führen, dass bis 2050 die Systemleistung von drei Erden benötigt wird (European Commission, 2020b).

Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken, wurde Anfang der 1990er Jahre erstmals unter dem Namen CE ein System definiert, in dem Wirtschaft und Umwelt aufgrund der Eigenschaft des Planeten als geschlossenes Kreislaufsystem in einem Gleichgewichtszustand koexistieren sollen (Pearce & Turner, 1989; Prieto-Sandoval et al., 2018). Abbildung 2 zeigt einen Vergleich der Ressourcenströme von drei ausgewählten Wirtschaftsformen.



Abbildung 2: Vergleich der Ressourcenströme ausgewählter Wirtschaftsformen
(eigene Darstellung nach Van Buren et al. (2016, S. 4))

Heutzutage gilt die CE als eine Wirtschaftsform, die einen starken Fokus auf die sinnvolle Nutzung und Erhaltung natürlicher Ressourcen legt und Abfälle aller Art durch eine hohe Produkt- und Prozesseffizienz vermeidet (Ekins et al., 2020). Derzeit findet das CE-Konzept vor allem in China und der EU Anwendung, jedoch wird es auch in Nordamerika, Japan und Südkorea zunehmend umgesetzt (Ellen MacArthur Foundation, 2013b; Winans et al., 2017).

Das Konzept der CE findet dabei in drei grundlegenden Bereichen Anwendung:

- Entwicklung regulatorischer oder wirtschaftlicher Instrumente zur Förderung von Öko-Industrieparks, Öko-Industrienetzwerken und Symbiosen: Dies umfasst Initiativen, die den Verbrauch von Energie und Rohstoffen durch den Austausch von Ressourcen und Informationen reduzieren.
- Anwendung auf spezifische Wertschöpfungsketten, Stoffströme und Produkte: Von besonderem Interesse sind hier Materialien wie Holz, Kunststoffe, Metalle und Chemikalien, aber auch landwirtschaftliche Produkte, Abfall und Wasser.
- Förderung von Innovationen und Potenzialen im technischen, organisatorischen und sozialen Bereich: Vorrangige Forschungsthemen sind Innovationen von Produkten und Materialien einschließlich zugehöriger Prozesse, Stoffströme und -kreisläufe, Geschäfts- und Wirtschaftsmodellen sowie Innovationen für den Energiesektor (Ellen MacArthur Foundation, 2013b; Winans et al., 2017).

2.1.2 Ziele und Prinzipien

Im Vergleich zu heutigen Wirtschaftsweisen zielt die CE in erster Linie darauf ab, den Verbrauch endlicher natürlicher Ressourcen und die durch die Gewinnung, Verarbeitung und Verwertung von Materialien verursachten Umweltschäden zu verringern. Die Steigerung der Ressourceneffizienz und -produktivität bei gleichzeitiger Minimierung der Abfallproduktion wird als wichtigstes Mittel zur Erreichung dieser Ziele angesehen (Ekins et al., 2020).

Da es sich bei der CE um eine Form der Ökonomie handelt, stellt neben der Verbesserung der Umweltqualität auch die Erzielung eines wirtschaftlichen Nutzens ein Hauptziel dar. Somit soll auch die CE mit Hilfe von Wertschöpfung durch Produkte und Dienstleistungen zum ökonomischen Wachstum beitragen (Kirchherr et al., 2017).

Grundprinzipien der CE

Um ein regeneratives System zu ermöglichen, stützt sich die CE auf drei grundlegende Prinzipien. Das erste Grundprinzip stellt die Vermeidung von Verschwendung in den Fokus, indem einerseits Produkte und Prozesse so gestaltet werden, dass sie sich bestmöglich in natürliche oder technische Materialkreisläufe einfügen. Dies umfasst eine einfache Demontage, Reparatur und Wiederverwendung der Produkte, sowie geschlossene Kreisläufe, die Abfälle minimieren. Darüber hinaus werden die Nutzungsraten von Produkten maximiert, um Verschwendungen von Kapazitäten zu vermeiden (Ellen MacArthur Foundation, 2013a; Lacy et al., 2020, S. 17-42).

Das zweite Prinzip behandelt den Materialeinsatz zur Herstellung von Produkten und unterscheidet dabei zwischen Verbrauchsgütern und Gebrauchsgütern. Verbrauchsgüter werden nach dem Ende ihres Lebenszyklus an die Biosphäre zurückgeführt und sollen demnach aus biologischen Komponenten bestehen, welche ungiftig oder sogar nützlich für die Umwelt sind. Gebrauchsgüter bestehen aus technischen Materialien, welche nicht für eine Rückführung in die Biosphäre geeignet sind und bei denen bereits bei der Produktion die Wiederverwendung im Mittelpunkt steht (Ellen MacArthur Foundation, 2013a; Lacy et al., 2020, S. 17-42).

Das dritte Grundprinzip der CE gilt der Versorgung mit Energie, die zum Erhalt des Kreislaufs benötigt wird. Diese soll vollständig aus Quellen erneuerbarer Energie (EE) gewonnen werden, um einerseits die Umwelt vor Emissionen zu schützen und andererseits die Ressourcenabhängigkeit zu verringern. Dadurch erhöht sich die Resilienz des Systems vor künstlich generierten und ökonomisch ambitionierten Preis- und Angebotsschwankungen einzelner Energiequellen durch einen Mix verschiedener EE (Ellen MacArthur Foundation, 2013a; Lacy et al., 2020, S. 17-42).

Die R-Imperative

Um die Kernideologien und -prinzipien der CE klar zu definieren, wird zur Abgrenzung der Anforderungen üblicherweise eine bestimmte Anzahl von Rs verwendet. Diese beschreiben mögliche Umsetzungsstrategien der CE durch englische Verben, wobei 3R, 4R und 9R bzw. 10R die gängigsten Varianten darstellen.

Die einfachsten und am weitest verbreiteten Prinzipien zur Implementierung der CE sind die 3Rs „reduce, reuse, recycle“. Reduzieren, Wiederverwenden und Recyceln ist ein bekannter Ansatz in der traditionellen Abfallwirtschaft und bildet unter anderem die Grundlage der Umweltpolitik Chinas und Japans und somit auch das Rückgrat der Umsetzung der CE dieser beiden Länder (Reike et al., 2018). Darüber hinaus betrachten die acht führenden Industrieländer und die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung den 3R-Ansatz als Schlüsselkomponente ihrer Initiativen zur Steigerung der Ressourcenproduktivität (OECD, 2011).

Das 4R-Prinzip ergänzt dieses Konzept um einen zusätzlichen restaurativen Anteil. Dadurch ist die CE als ein Ansatz definiert, welcher nicht nur durch die Reduktion der Umweltverschmutzung präventiv wirkt, sondern auf die Behebung bereits entstandener Schäden abzielt (Murray et al., 2017). Dieses Prinzip steht auch im Mittelpunkt der EU-Abfallrahmenrichtlinie, die den rechtlichen Rahmen für die Abfallgesetzgebung in den Mitgliedsstaaten der EU vorgibt (European Commission, 2008).

	Gruppe	Strategie	Beschreibung
Kreislaufwirtschaft ↑ Erhöhung der Zirkularität ↓ Lineare Wirtschaft	Intelligenterer Produkt-herstellung und Nutzung	R0 Refuse	Produkt überflüssig machen, indem seine Funktion aufgegeben wird oder indem dieselbe Funktion mit einem völlig anderen Produkt angeboten wird
		R1 Rethink	Längere und intensivere Nutzung eines Produktes (z. B. durch gemeinsame Nutzung von Produkten)
		R2 Reduce	Effizienzsteigerung der Produktherstellung bzw. Produktnutzung durch geringeren Verbrauch von natürlichen Ressourcen und Materialien
	Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und deren Komponenten	R3 Reuse	Wiederverwendung eines gebrauchten, funktionsfähigen Produkts durch einen anderen Verbraucher
		R4 Repair	Reparatur und Wartung eines defekten Produkts, zur Nutzung in seiner ursprünglichen Funktion
		R5 Refurbish	Wiederherstellung und Aufbesserung von alten, gebrauchten Produkten in Bezug auf Funktionstüchtigkeit und Erscheinungsbild
		R6 Remanufacture	Wiederverwendung von Komponenten gebrauchter Produkte in neuen Produkten mit gleicher Funktion
		R7 Repurpose	Wiederverwendung gebrauchter Produkte oder ihrer Komponenten in neuen Produkten mit unterschiedlicher Funktion
	Sinnvolle Verwertung von Stoffen	R8 Recycle	Wiederverwertung von Materialien, um die gleiche (hochwertige) oder niedrigere (minderwertige) Qualität zu erhalten
R9 Recover		Energetische Weiterverwertung von Materialien	

Abbildung 3: Zirkulären Strategien innerhalb der Produktionskette (eigene Darstellung nach Potting et al. (2017, S. 5))

Die zirkulären Strategien innerhalb der Produktionskette basieren auf einem 9R bzw. 10R-Prinzip und bietet eine detaillierte Abstufung der CE-Ansätze, in der die Nummerierung der Strategien eine leicht verständliche Klassifizierung in Bezug auf ihre Zirkularität liefert. Die einzelnen Strategien unterliegen einer klaren Prioritätenfolge und werden in drei Gruppen zusammengefasst, eine grafische Darstellung ist in Abbildung 3 ersichtlich. Dabei ist die Gruppe der intelligenteren Herstellung und Nutzung von Produkten (R0-R2), jener der Verlängerung der Produktlebensdauer (R3-R7) vorzuziehen. Der stofflichen und energetischen Wiederverwertung der im Produkt enthaltenen Materialien in Form von Recycling und Energierückgewinnung durch Verbrennung von Abfällen (R8-R9) wird dabei die geringste Priorität eingeräumt. (Kirchherr et al., 2017; Potting et al., 2017).

Designprinzipien der CE

In der Recycling-Ökonomie ergibt sich die Wiederverwendung von Materialien als notwendiger Optimierungsschritt, um Entscheidungen zu kompensieren, die während der Design-, Produktions- und Nutzungsphasen getroffen wurden. Im Gegenzug dazu stellt die Wiederverwendung in der CE einen wichtigen integrierten Faktor der Produktfunktionalität dar (Van Buren et al., 2016).

Um diesen zu gewährleisten, müssen bereits während der Designphase die weiterfolgenden Lebensabschnitte des Produkts berücksichtigt werden. Deshalb unterliegt die CE häufig auch einer Auswahl an designspezifischen Prinzipien verwandter Denkschulen. Zu den gängigsten gehören hierbei das Ökodesign, von-Wiege-zu-Wiege („Cradle-to-Cradle“, C2C) und durch die Natur inspirierte Designstrategien (Ellen MacArthur Foundation, 2013a; Prieto-Sandoval et al., 2018).

Das Ökodesign ist ein Konzept des Umweltmanagements, um Umweltaspekte in den Produktentwicklungsprozess und damit verbundene Aktivitäten zu integrieren. Ziel ist durch eine verbesserte Produktgestaltung die Umweltauswirkungen während des gesamten Lebenszyklus eines Produkts zu verringern, ohne Aspekte wie Qualität, Funktionalität oder Kosten zu beeinträchtigen (Pigozzo et al., 2013). Das Ökodesign orientiert sich dabei stark an der Ökobilanz, welche ein häufig angewendetes Instrument zur Bewertung der Umweltauswirkungen und des Ressourcenverbrauchs entlang des Produktlebenszyklus darstellt (Finnveden et al., 2009; Prieto-Sandoval et al., 2018).

Der C2C-Ansatz verwendet natürliche Stoffwechselprozesse biologischer Materialien als Inspiration für die Entwicklung industrieller Stoffwechselprozesse technischer Materialien. Während das traditionelle Produktdesign stark auf die Verringerung negativer Umweltauswirkungen ausgerichtet ist, betont C2C somit bewusst Designentscheidungen mit positiven Auswirkungen auf die Umwelt und die Schaffung sicherer und effizienter Prozesse. Darüber hinaus kann dieses Konzept nicht nur auf

Materialien, sondern auch auf Ressourcen wie Energie und Wasser angewendet werden (Braungart et al., 2007; Ellen MacArthur Foundation, 2013a).

Die Untersuchung der Art und Weise, wie die Natur Lösungen schafft und perfektioniert, wird als Biomimikry bezeichnet. Dabei werden bewährte Muster und Verfahren der Natur auf aktuelle Problemfelder angewendet, um so die Ressourceneffizienz zu maximieren. Die abgeleiteten Ideen werden anschließend hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit anhand eines ökologischen Maßstabs bewertet, welcher auf den Ansätzen der Evolution beruht. Dies führt dazu, dass die Natur nicht mehr dahingehend betrachtet wird, welche Ressourcen aus ihr entnommen, sondern welche Lehren und Erkenntnisse aus ihr gezogen werden können (Benyus, 1997; Ellen MacArthur Foundation, 2013a).

2.1.3 CE und nachhaltige Entwicklung

Die CE ist eng mit dem Konzept der nachhaltigen Entwicklung verbunden, steht jedoch mit dem Begriff der Nachhaltigkeit in unterschiedlichen Relationen. Diese reichen von der Betrachtung der CE als Grundvoraussetzung für ein nachhaltiges System oder grundlegenden Lösungsansatz für die Transition zu einem nachhaltigen System bis zu einem Kompromiss, wenn lediglich bestimmte Aspekte der Nachhaltigkeit gefördert und andere vernachlässigt werden (Geissdoerfer et al., 2017).

Die Brundtland Kommission verfasste 1987 die allgemein anerkannte und bis dato gängigste Definition der nachhaltigen Entwicklung als „...eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der heutigen Generation befriedigen kann, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen“ (Brundtland, 1987).

Damit zielt die nachhaltige Entwicklung darauf ab, das menschliche Wohlergehen durch ein ausgewogenes Zusammenspiel von drei Dimensionen zu optimieren. Die ökologische Dimension bildet die Grundlage des menschlichen Lebens und umfasst alle regenerativen und nicht-regenerativen Ressourcen des globalen Ökosystems. Ziel dieser Dimension ist es, die direkten oder indirekten Leistungen des Ökosystems in einem Umfang zu erhalten, der das Überleben zukünftiger Generationen ermöglicht (Rogers et al., 2012; Von Hauff, 2014).

Darüber hinaus umfasst die ökonomische Dimension alle menschlichen Aktivitäten zur Verbesserung der Lebensqualität durch die Stärkung der Wirtschaftskraft und die damit verbundenen Ressourcen zur Erhaltung der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit. Dazu gehören Sachkapital in Form von Geld, Waren oder Anlagen, Wissenskapital sowie Humankapital (Rogers et al., 2012; Von Hauff, 2014).

Die soziale Dimension befasst sich mit der Stabilität der sozialen und kulturellen Systeme und zielt darauf ab, jedem Menschen ein sicheres, selbstbestimmtes und

respektables Leben zu ermöglichen. Das dazugehörige Sozialkapital umfasst alle materiellen Güter wie Infrastruktur oder öffentliche Gebäude im Bildungs- und Gesundheitsbereich, aber auch immaterielle Güter wie Menschlichkeit, Freiheit oder Gerechtigkeit (Rogers et al., 2012; Von Hauff, 2014).

Die CE wird allgemein von Unternehmen als Möglichkeit gesehen, die breit gefächerte Idee der nachhaltigen Entwicklung in die Praxis umzusetzen. Sowohl die CE als auch die nachhaltige Entwicklung betonen die Notwendigkeit öffentlicher Diskussionen der inter- und intragenerationellen Verpflichtungen, die sich aus den vorherrschenden Umweltproblemen ergeben. Dabei gehen beide Ansätze von globalen Problemen aus, die eine Zusammenarbeit vieler Beteiligter und eine Diversifizierung der Maßnahmen erfordern, um potenzielle Kosten und Bedrohungen zu mindern und Möglichkeiten der Wertschöpfung zu nutzen (Geissdoerfer et al., 2017).

Grundlegende Unterschiede lassen sich in den Zielen der beiden Konzepte erkennen. Während sich die CE auf die Schließung von Stoff- und Energiekreisläufen durch die Vermeidung von Abfällen und Emissionen konzentriert, sind die Ziele der nachhaltigen Entwicklung offen und vielfältig und werden in ihrer Definition an die jeweiligen Beteiligten angepasst (Geissdoerfer et al., 2017).

Der Schwerpunkt der CE liegt auf der wirtschaftlichen Dimension. Es existieren aber auch Vorteile für Umwelt und Gesellschaft aufgrund des geringeren Ressourcenverbrauchs und der geringeren Umweltverschmutzung. Dabei wird die soziale Dimension weitestgehend vernachlässigt und gesellschaftliche Vorteile fallen lediglich als positiver Nebeneffekt an. Dies führt dazu, dass eine vollständige Umsetzung der Idee der nachhaltigen Entwicklung alleine durch die CE nicht möglich ist (Geissdoerfer et al., 2017).

2.1.4 Wertschöpfungsmodelle in der CE

Die Umsetzung der Ziele und Prinzipien der CE erfordert die Entwicklung innovativer BMs, welche die Verlängerung der Produktlebensdauer und den Erhalt des Materialwerts über einen möglichst langen Zeitraum in den Mittelpunkt stellen. Dies setzt die Einbeziehung einer ganzheitlichen Ressourcennutzung und eines regenerativen Produktdesigns, als auch die Einbindung geschlossener Lieferketten einschließlich der Rückwärtslogistik voraus (Ekins et al., 2020).

Im Vergleich zu linearen Produktionsmethoden ergeben sich durch die Grundsätze der CE drei produktionsorientierte und zwei konsumorientierte Möglichkeiten der Wertschöpfung. Während erstere vor allem auf die Maximierung der Materialeffizienz abzielen, fokussieren sich die beiden konsumorientierten Modelle auf die Reduktion der Verschwendung von Lebenszeit und Kapazität und brechen traditionelle

Verbrauchsmuster, in dem sie das Konzept des Verbrauchenden durch jenes des Nutzenden ersetzen (Ellen MacArthur Foundation, 2013a; Lacy et al., 2020, S. 17-42).

Reduktion des Ressourcenbedarfs

Die eingesetzten Ressourcen in der Design-, Beschaffungs- und Herstellungsphase von Produkten bilden die Grundlage weiterer Wertschöpfungsmodelle und haben die Reduktion von Verschwendung und Umweltverschmutzung zum Ziel. Dazu zählen natürliche Ressourcen, organische oder anorganische Materialien sowie EE. Vor allem durch interne Produktionszyklen ergeben sich Einsparpotenziale zum einen bei den im Produkt enthaltenen Kosten für Material, Energie, Arbeit und Kapital, zum anderen bei den damit verbundenen externen Effekten wie der Emission von THG. Je enger diese inneren Kreisläufe sind, desto geringer sind der Aufwand und damit die Kosten, die für die Wiederverwendung des Produkts anfallen (Ellen MacArthur Foundation, 2013a; Lacy et al., 2020, S. 17-42).

Verlängerung des Produktnutzens durch aufeinanderfolgende Zyklen

Dieses Wertschöpfungsmodell zielt darauf ab, die Anzahl der aufeinanderfolgenden Zyklen oder der Verweildauer innerhalb eines Zyklus durch Reparaturen, Upgrades und Wiederaufbereitung von Produkten und Komponenten zu maximieren. Dadurch können Produkte, Bauteile und Materialien länger in Gebrauch bleiben und den Zufluss von neuem Material ersetzen. Diese Maßnahmen müssen bereits in der Designphase berücksichtigt werden, um die Nutzungsdauer für den ursprünglich vorgesehenen Einsatz gezielt zu verlängern (Ellen MacArthur Foundation, 2013a; Lacy et al., 2020, S. 17-42).

Darüber hinaus ermöglicht eine kaskadierte Nutzung von Produkten, Komponenten und Materialien eine Wiederverwendung, die über die ursprüngliche Produktgruppe hinausgeht und somit eine Diversifizierung entlang der gesamten Wertschöpfungskette ermöglicht. Auch hier können externe Effekte und eingebettete Kosten des Materialeinsatzes durch die Wiederverwendung von vorhandenem Material reduziert werden (Ellen MacArthur Foundation, 2013a).

Rückgewinnung von Ressourcen am Ende der Nutzungsdauer

Ziel hierbei ist, die im Produkt enthaltenen Stoffe und Energien durch Sammlung, Bündelung und Verarbeitung in den Produktionskreislauf zurückzuführen und so den Kreislauf zu schließen. Insbesondere bei technischen Materialien steht dabei der Erhalt von Qualität und Reinheit im Vordergrund, um die Effizienz bei der Sammlung und Weiterverteilung von Materialien zu erhöhen. Dadurch können höherwertige Materialien zu geringeren Kosten zurückgewonnen werden, was zu einer Verlängerung der Nutzungsdauer und damit einer Steigerung der Materialproduktivität führt. Die Ressourcenrückgewinnung unterliegt einer klaren Abfallhierarchie

(Abbildung 4) in der bestenfalls eine höherwertige oder zumindest eine gleichwertige Verwertung angestrebt werden sollte, um die ursprüngliche Materialqualität zu erhalten (Ellen MacArthur Foundation, 2013a; Lacy et al., 2020, S. 17-42).



Abbildung 4: Abfallhierarchie in der CE (eigene Darstellung nach Lacy et al. (2020, S. 29))

Gemeinsamer Kauf und Nutzung von Produkten

Dieses Wertschöpfungsmodell zielt auf die Erhöhung des Nutzungsgrades von Produkten ab, indem mehrere Nutzende ein Produkt teilen. Sharing-Plattformen bieten einerseits den Produktbesitzenden die Möglichkeit, ihre nicht benötigten Kapazitäten zu monetarisieren. Andererseits können Unternehmen Mehrwerte generieren, indem sie ihrer Kundschaft einen einfachen und erschwinglichen Zugang zu Produkten und Dienstleistungen bieten und eine Gemeinschaft schaffen (Lacy et al., 2020, S. 17-42).

Anbieten von Produktfunktionen als Dienstleistungen

Bei Produkt-als-Service („Product-as-a-Service“, PaaS) Modellen werden Produkte von den Konsumierenden geleast oder nach Nutzungsvolumen abgerechnet, was ein Umdenken des Produktdesigns im Hinblick auf Modularität und Langlebigkeit erfordert. Dies verändert die Geschäftsbeziehung zwischen Unternehmen und ihrer Kundschaft. Insbesondere bei langlebigen Gütern zielt diese darauf ab, die Produktleistung durch Leasing-, Miet- oder Teilmodelle, anstatt durch den reinen Verkauf von Produkten zu erbringen. Dabei bleiben die Unternehmen Besitze des Produkts und sind für die Aufrechterhaltung seiner Funktionalität und die Handhabung nach der Nutzungsdauer verantwortlich. Klassische Verkaufsmodelle werden dabei durch Anreize und Vereinbarungen ergänzt, die die Rückgabe von Produkten, Komponenten oder Materialien am Ende des ersten Lebenszyklus („End of first Life“, EoFL) vorsehen, um deren spätere Wiederverwendung zu erleichtern. Für die Unternehmen ergeben sich durch den Verkauf zusätzlicher Dienstleistungen, die Monetarisierung von

Nutzungsdaten und den Restwert der Produkte nach ihrer Nutzungsdauer zusätzliche Wertschöpfungsmöglichkeiten (Ellen MacArthur Foundation, 2013a; Lacy et al., 2020, S. 17-42).

2.1.5 Wandel von der Linearwirtschaft zur CE

Der großflächige Übergang zu einer nachhaltigeren Gesellschaft erfordert einen grundlegenden Wandel bestehender Strukturen, wobei sich dieser Wandel auf zwei Säulen stützt (Potting et al., 2017).

Die Änderungen auf sozio-kultureller Ebene umfassen sämtliche gesellschaftlichen Interessen und Bedürfnisse, welche die sozialen, kulturellen und politischen Aspekte des Zusammenlebens einer Gemeinschaft beschreiben. Dazu gehören z.B. Gesetze und Verordnungen, Normen und Richtlinien, aber auch Überzeugungen und Konsumierendesverhalten, die notwendig sind, um ein höheres Maß an Zirkularität zu erreichen. Diese Veränderungen ermöglichen somit die notwendige Verankerung neuer Denkweisen in der breiten Gesellschaft (Potting et al., 2017).

Technologische Innovationen ermöglichen die Bereitstellung der notwendigen produkt- oder prozessspezifischen Lösungen, um eine nachhaltigere Gesellschaft zu etablieren. Darunter fallen z.B. die Entwicklung neuer Materialien, Produkte und Dienstleistungen inklusive deren Herstellungs- und Umsetzungsprozesse. Die Innovationen können dabei entweder radikal oder inkrementell ablaufen. Radikale Innovationen führen zu grundlegend neuartigen Produkten und Dienstleistungen, erfordern jedoch großes Engagement, eine verfügbare Wissensbasis und ein innovationsförderndes Umfeld. Im Gegensatz dazu laufen inkrementelle Innovationen häufig langsamer und schrittweise ab und entstehen aus bereits vorhandenem Wissen, welches auf andere Systeme adaptiert wird (Potting et al., 2017).

Typen des Wandels

Auf Basis der beiden Säulen lassen sich drei Typen des Überganges von der derzeitigen Wirtschaft hin zur CE unterscheiden:

- Technologiezentrierter Wandel: Dieser Typ wird häufig durch radikale Innovationen der Kerntechnologie ausgelöst, erfordert aber auch den sozio-institutionellen Wandel, um gesellschaftliche Akzeptanz für die technologische Innovation zu schaffen.
- Sozio-kulturell zentrierter Wandel: Dabei trägt die technologische Innovation nicht oder nur minimal zum Übergang bei. Dieser Typ stützt sich häufig auf inkrementelle Innovationen der Kerntechnologie und somit auf Weiterentwicklungen bestehender Produkte anstatt auf Neuentwicklungen.
- Kombination aus technologischem und sozio-kulturellem Wandel: Dabei steht zwar ebenfalls der sozio-kulturelle Wandel im Mittelpunkt, wird jedoch durch

radikale oder inkrementelle Technologieinnovationen erleichtert. Diese sind grundsätzlich relevanter für niedrigere Zirkularitätslevel, höhere Level erfordern vermehrt sozio-kulturelle Änderungen (Potting et al., 2017).

Voraussetzungen des Wandels

Der Übergang zur CE unterliegt einer Reihe sozio-kultureller und technologischer Voraussetzungen, die den Erfolg der Umsetzung von CBMs beeinflussen können:

- Wandel von einer produktorientierten zu einer funktionsorientierten Sichtweise: Produkte sind oft nur Hilfsmittel, um eine gewünschte Funktion bereitzustellen oder ein bestimmtes Ergebnis zu erzielen. Dies erfordert einen Bewusstseinswandel bei den Konsumierenden, so dass neben Kosten und Qualität auch die Nachhaltigkeit von Produkten in die Kaufentscheidung einfließt (Kirchherr et al., 2017; Lacy et al., 2020, S. 17-42).
- Berücksichtigung der Zirkularität in der Produktentwicklung: Dabei soll ein möglichst hoher Grad an Zirkularität eine grundlegende Produktfunktion darstellen. Designentscheidungen beziehen sich nicht nur auf die Verwendung von kreislauffähigen oder nachhaltigen Materialien, sondern auch auf die Maximierung der Produktlebensdauer bei gleichzeitiger Minimierung der Umweltauswirkungen (Lacy et al., 2020, S. 17-42).
- Schaffung einer ausgereiften Rückwärtslogistik: Diese ist erforderlich, um eine angemessene Produktrückführung zu ermöglichen und stellt einen der Hauptunterschiede zwischen traditionellen und zirkulären Wertschöpfungsketten dar. Sie kann entweder als geschlossener Kreislauf gestaltet werden, bei dem die Rücknahme des Produkts und dessen Rückführung in die Wertschöpfungskette durch den Einzelhandel, Zulieferfirmen oder Herstellende erfolgt, oder als offener Kreislauf, bei dem Drittparteien beteiligt sind (Lacy et al., 2020, S. 17-42; Sopha et al., 2022).

Vorteile des Wandels

Aus volkswirtschaftlicher Sicht bietet die weitreichende Etablierung der CE drei grundlegende Vorteile auf politischer, ökonomischer und ökologischer Ebene gegenüber der heutigen Wirtschaftsweise:

- Verringerung der Abhängigkeit von Rohstoffimporten: Da die Preise von Gütern stark von den Marktbedingungen abhängen, wird die Knappheit von Ressourcen häufig als Instrument zur Verfolgung politischer Interessen eingesetzt. Durch den dauerhaften Verbleib der Ressourcen in den regionalen Kreisläufen kann eine bessere Kontrolle über die Rohstoffversorgung und damit eine Stabilisierung der Rohstoffpreise erreicht werden.

- Wachstum der Öko-Industrie: Je höher die Kreislaufquote der Materialien ist, desto attraktiver sind kurze Lieferketten und damit regionale Standorte. Dies fördert Branchen, die sich mit zirkulären Wertschöpfungsketten, Umweltschutz und Regeneration beschäftigen. Dadurch bleibt die Wertschöpfung in der Region und es werden lokale Arbeitsplätze geschaffen.
- Reduktion der Umweltverschlechterung: Die Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen sowie die Herstellung, Verwendung und Verwertung von Produkten verursacht enorme Umweltschäden. Die Reduktion des Ressourcenbedarfs und der Emissionen ermöglicht auch eine drastische Verringerung der negativen Auswirkungen auf die Ökosysteme (Van Buren et al., 2016).

2.1.6 CE in der EU

Die CE gewinnt als umfassender Ansatz zur Förderung von Ressourceneffizienz und nachhaltigem Wirtschaftswachstum zunehmend an Bedeutung. Auch die EU verfolgt dieses Konzept mit einer Reihe an Maßnahmen zur Abfallreduzierung und Entkoppelung des Wirtschaftswachstums vom Ressourcenverbrauch, und ist derzeit eine der weltweit führenden Institutionen hinsichtlich globaler CE-Politik (Ellen MacArthur Foundation, 2020).

Die zentrale Leitlinie für die CE-Politik der EU ist der Aktionsplan Kreislaufwirtschaft („Circular Economy Action Plan“, CEAP), der 2015 vorgelegt und 2020 aktualisiert wurde. Darin wird eine Reihe von Maßnahmen und Zielen zur Verbesserung der Ressourceneffizienz und zur Verringerung des Abfallaufkommens festgelegt, um die CE in der EU voranzutreiben. Damit sollen die globale Wettbewerbsfähigkeit und ein nachhaltiges Wirtschaftswachstum gewährleistet werden. Die Maßnahmen umfassen Initiativen zur Förderung des Ökodesigns von Produkten, der Aufbau eines Marktes für Sekundärmaterialien inklusive der Rückgewinnung kritischer Rohstoffe und Reduktionsziele für die Wasser- und Nahrungsmittelverschwendung (Ellen MacArthur Foundation, 2020; European Commission, 2015).

Basierend auf dem CEAP wurde 2018 das EU-Abfallpaket veröffentlicht, welches eine Novellierung von vier EU-Richtlinien vorsieht. Die Änderungen betreffen die Abfallrahmenrichtlinie, die Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle, die Richtlinie über Abfalldeponien und die Richtlinien über Altfahrzeuge, Batterien und Akkumulatoren, Altbatterien und Altakkumulatoren sowie Elektro- und Elektronik-Altgeräte. Im Rahmen des EU-Abfallpaketes wurden neben klaren Recyclingquoten und einer Abfalltrennung auch eine stärkere Umsetzung der Abfallhierarchie und Mindestanforderungen für die erweiterte Herstellendenverantwortung („Extended Producer Responsibility“, EPR) beschlossen. Zudem wurde ein Bericht über kritische Rohstoffe in der EU erstellt (Bourguignon, 2018).

Mit dem europäischen Green Deal wurde im Dezember 2019 ein Initiativpaket vorgestellt, das einen Fahrplan für eine nachhaltigere Wirtschaft in der EU darstellt. Mit dem Hauptziel, bis 2050 der erste klimaneutrale Kontinent zu werden, ist der Green Deal ein ganzheitlicher Ansatz, um aktuelle und zukünftige Klima- und Umweltherausforderungen sektorübergreifend in Chancen zu verwandeln. Der Aktionsbereich erstreckt sich auf alle Wirtschaftszweige und umfasst Maßnahmen zur Bekämpfung des Verlusts der Biodiversität, zur Reduktion der Schadstoffbelastung und Umweltverschmutzung sowie zur Förderung der Ressourceneffizienz. Der Wandel zu einer sauberen und kreislauforientierten Wirtschaft ist dabei eines der Kernelemente des Green Deal, der neben dem Schutz der Umwelt auch die Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit Europas steigern soll. Abbildung 5 zeigt die Handlungsfelder des Green Deals (European Commission, 2019).



Abbildung 5: Der europäische grüne Deal (eigene Darstellung nach European Commission (2019a))

Der 2020 veröffentlichte CEAP stärkt die Pläne der EU, in dem er inhaltlich an die ab 2015 umgesetzten Maßnahmen anknüpft, um den wirtschaftlichen Wandel weiter zu beschleunigen. Der Schwerpunkt liegt dabei zum einen auf der Änderung von Verbrauchsmustern, um Abfälle bereits im Vorhinein zu vermeiden, und zum anderen auf der Entwicklung eines umfassenden und starken politischen Rahmens, damit nachhaltige Produkte, Dienstleistungen und BMs zum Standard werden. Die Maßnahmen konzentrieren sich in erster Linie auf eine nachhaltigere Gestaltung von Produkten und die Verbreitung des Kreislaufprinzips in deren Produktionsprozessen. Darüber hinaus sollen nachhaltige und umweltfreundliche Entscheidungen beim Kauf und der Nutzung von Produkten für Endkonsumierende und öffentlich Auftraggebende attraktiver gestaltet werden. Die Maßnahmen betreffen eine Vielzahl von Branchen, darunter auch die Batterie- und Fahrzeugindustrie (European Commission, 2020b).

Trotz des umfangreichen Engagements und der Fortschritte der EU müssen noch einige Hürden überwunden werden, um das Potenzial der CE voll auszuschöpfen. Besonders die Erhöhung des Anteils recycelter Materialien in Produkten und die Förderung neuer BMs stellen dabei große Herausforderungen dar. Als starker Befürworter der CE wird die EU durch die Förderung von Forschung und Innovation in den relevanten Bereichen eine entscheidende Rolle bei der Lösung dieser Probleme spielen (European Commission, 2020b).

2.1.7 CE im Automobilsektor

Mit über 57 Mio. produzierten Fahrzeugen (Kords, 2022) und einem Umsatz von 2,86 Billionen Dollar (Carlier, 2022) im Jahr 2021 ist der Automobilsektor einer der größten Industriezweige. Damit verbunden sind erhebliche Auswirkungen auf die Gesellschaft durch die Bereitstellung persönlicher Mobilität und die Schaffung von Arbeitsplätzen, aber auch eine zunehmende Bedrohung für die Umwelt durch Emissionen und Abfälle. Aus diesem Grund erhöhen Stakeholder, allen voran Gesetzgebende und Konsumierende, den Druck auf die Automobilbranche, ihre Produkte über den gesamten Lebenszyklus hinweg umweltfreundlicher zu gestalten und damit neben der wirtschaftlichen Positionierung auch soziale und ökologische Faktoren in ihre Entscheidungen miteinzubeziehen (Ellen MacArthur Foundation, 2013a; Mathivathanan et al., 2018).

Während des gesamten Lebenszyklus eines PKW lassen sich insbesondere drei Phasen mit erhöhtem Abfallaufkommen identifizieren. Bereits in der Produktion entstehen etwa 20 Prozent der gesamten THG-Emissionen bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor („Internal Combustion Engine“, ICE) und etwa 47 Prozent bei batteriebetriebenen Fahrzeugen. Darüber hinaus entstehen in dieser Phase Abfälle durch Verpackungen und Ausschuss während des Herstellungsprozesses. In der Nutzungsphase reduzieren die geringe Auslastung der Fahrzeuge sowie der Verbrauch von Kraftstoff, Verschleißteilen und Verbrauchsmaterialien, die Ressourceneffizienz der Fahrzeuge. Am Ende des Lebenszyklus fallen durch die Verschrottung der Fahrzeuge große Mengen an Abfall an (Aguilar Esteva et al., 2021; Lacy et al., 2020, S. 149-162).

Um diese Abfälle zu reduzieren und die Automobilindustrie bis 2030 und darüber hinaus umweltfreundlicher zu gestalten, werden vier grundlegende Ansätze verfolgt (World Economic Forum, 2020).

Dekarbonisierung des Produkts

Der Schwerpunkt liegt hier auf der Energie und den Materialien, die während der Produktion in das Fahrzeug einfließen und während der Nutzungsphase verbraucht werden. Daher umfasst dieser Punkt die Entwicklung alternativer Antriebe, die

Umstellung auf kohlenstoffarme Produktionsverfahren und die großflächige Nutzung von EE. Insbesondere die Umstellung auf Elektromobilität bietet die Möglichkeit, die Emissionen in der Nutzungsphase drastisch zu reduzieren. Zusätzlich kann die Verwendung von Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium oder Kunststoffen anstelle von Stahl den Energieverbrauch und damit die Emissionen von Fahrzeugen zusätzlich senken. Im Vergleich zur konventionellen Stahlerzeugung bietet das Recycling im Elektrolichtbogenofen die Möglichkeit, die THG-Emissionen aufgrund des geringeren Energieverbrauchs und des höheren Anteils an EEs im Prozess um mehr als die Hälfte zu reduzieren (Aguilar Esteva et al., 2021; Lacy et al., 2020, S. 149-162; World Economic Forum, 2020).

Rückgewinnung von Ressourcen

Ziel hierbei ist die Senkung des Verbrauchs nicht-zirkulärer Ressourcen und dahingehend die Fertigung von Fahrzeugen aus recycelten oder erneuerbaren Materialien. Dabei muss die Wiederverwendbarkeit als wichtiges Merkmal bereits in der Entwurfsphase in das Produkt integriert werden. Dies erfordert Investitionen in die Entwicklung fortschrittlicher Verwertungs- und Aufbereitungstechnologien, um Materialien während der Produktion und am Ende des Lebenszyklus effizient und in hoher Qualität zurückzugewinnen zu können (Aguilar Esteva et al., 2021; Lacy et al., 2020, S. 149-162; World Economic Forum, 2020).

Ein Problemfeld sind derzeit die im Leichtbau eingesetzten Metalllegierungen und Kunststoffverbindungen, da diese in der Herstellung und der sortenreinen Wiederaufbereitung oft mehr Energie benötigen als Stahl. Ähnlich verhält es sich bei Antriebsbatterien von EVs, wo ebenfalls weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht, um Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Materialrückgewinnung zu erhöhen. Der Übergang zu Miet- oder Leasingmodellen für bestimmte Fahrzeugkomponenten und die Anwendung neuer digitaler Technologien wie Smart Manufacturing, Robotik oder Internet der Dinge bieten zusätzliche Möglichkeiten zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Die Aufbereitung von Materialien und Komponenten erfordert jedoch eine ausgereifte Rückwärtslogistik, um die Ressourcenkreisläufe zu schließen (Aguilar Esteva et al., 2021; Lacy et al., 2020, S. 149-162; Patel & Singh, 2022; World Economic Forum, 2020).

Erhöhung des Nutzungsgrades

Angestrebt wird hierbei eine drastische Verbesserung der Fahrzeugauslastung durch Erhöhung der jährlichen Personenkilometer pro Fahrzeug, um die THG-Emissionen zu verringern. Ermöglicht wird dies durch neue BMs im Bereich der Fahrzeug- und Fahrgemeinschaften und damit durch speziell auf diese Bedürfnisse zugeschnittene Fahrzeuge, Flotten und Dienste. Mobilität soll dabei nicht mehr als Produkt in Form eines Fahrzeuges, sondern als Dienstleistung konsumiert werden. Dies senkt die

erforderliche Anzahl an Fahrzeugen zur Deckung des Mobilitätsbedarfs und ermöglicht durch intelligente Routenführung die zusätzliche Einsparung von Kraftstoff oder elektrischer Energie. Obwohl diese Lösungen dazu beitragen, die Umweltbelastung durch den Individualverkehr zu reduzieren, können Rebound-Effekte auftreten, wenn diese Mobilitätsoptionen anstelle des öffentlichen Verkehrs genutzt werden (Aguilar Esteva et al., 2021; Lacy et al., 2020, S. 149-162; World Economic Forum, 2020).

Verlängerung der Lebensdauer

Ziel ist es, die Lebensdauer von Fahrzeugen und Komponenten durch Konstruktionsentscheidungen zu optimieren, die eine möglichst einfache Reparatur und Wiederaufbereitung dieser Produkte ermöglichen. Die modulare Bauweise von Fahrzeugen und der Ausbau von Werkstätten als Zentren der CE spielen dabei eine wichtige Rolle, um Verschleißteile und defekte Komponenten schnell und kostengünstig auszutauschen. Durch die Wiederaufbereitung dieser Bauteile wird zum einen die Entsorgung gebrauchter, aber intakter Komponenten vermieden, zum anderen werden die THG-Emission und der Verbrauch nicht-kreislauffähiger Ressourcen reduziert. Umfangreiche Tests gewährleisten hierbei, dass die wiederaufbereiteten Komponenten in ihrer Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit mit Neuteilen vergleichbar sind. Neben den ökologischen Vorteilen, wie geringerer Energieverbrauch und weniger Abfallerzeugung, bieten wiederaufbereitete Komponenten auch den Vorteil geringerer Kosten für die Endkonsumierenden (Aguilar Esteva et al., 2021; Ellen MacArthur Foundation, 2013a; Lacy et al., 2020, S. 149-162; World Economic Forum, 2020).

2.2 Elektromobilität im Individualverkehr

2.2.1 Grundlagen der Elektromobilität

Im Verkehrssektor gewinnen neue Antriebskonzepte und alternative Kraftstoffe angesichts der wachsenden Besorgnis über den Klimawandel und die Energiesicherheit zunehmend an Bedeutung. Dieser Bereich ist für rund ein Viertel der THG-Emissionen in der EU verantwortlich und ist der einzige, in dem die Emissionen in den letzten drei Jahrzehnten gestiegen sind. Daher steht dieser Sektor im Mittelpunkt nationaler und internationaler Regulatorien auf Basis der Pariser Klimaziele. So hat sich die EU im Rahmen des Green Deals das Ziel gesetzt, die verkehrsbedingten Emissionen in den Mitgliedsstaaten bis 2050 um 90 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 zu senken, um so zur Klimaneutralität beizutragen (Europäisches Parlament, 2022a).

Die starke Abhängigkeit des Verkehrssektors von fossilen Energieträgern erschwert den Einsatz von EE in großem Maßstab. Dies führt zu einer hohen Anfälligkeit für

Angebots- und Preisschwankungen des Rohölmarktes. EVs bieten eine vielversprechende Möglichkeit, zur Lösung dieser Probleme. Einerseits unterstützt die Elektrifizierung des Antriebs dabei, die Auspuffemissionen von Fahrzeugen drastisch zu reduzieren. Andererseits ist es bei einem elektrifizierten Antriebsstrang unwichtig, woher die Energie für die Stromerzeugung stammt, was die Nutzung von EEs fördert (Poullikkas, 2015; Yong et al., 2015).

Die Idee, Kraftfahrzeuge mit elektrischer Energie anzutreiben, ist keineswegs neu und wurde bereits vor den Antrieben mit fossilen Brennstoffen durch erste Prototypen elektrifizierter Kutschen in den 1830er Jahren realisiert. Nachfolgende Entwicklungssprünge bei neuen Technologien wie dem Gleichstrommotor oder wiederaufladbaren Batterien führten zu einem ersten starken Wachstum der EV-Industrie am Ende des 19. Jahrhunderts. EVs wurden so zur bevorzugten Wahl für Straßenfahrzeuge, bis 1908 die industrielle Produktion von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor („Internal Combustion Engine Vehicles“, ICEVs) begann. Größere Reichweiten und günstiges Benzin führten schließlich zum Siegeszug der ICEVs und zur vollständigen Verdrängung von EVs um das Jahr 1935. Anfang der 1990er Jahre verschärften mehrere Staaten ihre Vorschriften für Fahrzeugemissionen, was ab 1996 zu den ersten Großserien-Hybridfahrzeugen und ab 2010 zur Kommerzialisierung batterieelektrischer Fahrzeuge führte (Yong et al., 2015).

2.2.2 Elektrifizierte Fahrzeuge

Je nach Grad der Elektrifizierung werden mit Hybridfahrzeugen („Hybrid Vehicle“, HV) und vollelektrischen Fahrzeugen („Fully Electric Vehicle“, FEV) zwei grundlegende Arten von EVs unterschieden. HVs charakterisieren sich durch eine Kombination aus ICE und Elektromotor, während bei FEVs die Antriebsleistung nur durch einen Elektromotor zustande kommt. Alle EVs besitzen die Gemeinsamkeit, dass sie über zumindest einen Elektromotor und einen elektrochemischen Energiespeicher verfügen, wobei je nach Art der Energiezufuhr und -abgabe vier Fahrzeugklassifizierungen definiert werden (Sanguesa et al., 2021; Yong et al., 2015).

Hybrid-Elektrofahrzeuge („Hybrid Electric Vehicles“, HEVs)

HEVs sind die ersten serienmäßig hergestellten EVs und bestehen aus einem konventionellen Antriebsstrang mit ICE, der mit einem Elektromotor und einer Traktionsbatterie gekoppelt ist. Der Elektromotor kann entweder als Generator fungieren, der die Batterie über den ICE auflädt, als Anlasser für den ICE dienen oder zur Antriebsleistung des Fahrzeuges beitragen. HEVs werden nicht durch externe Energiequellen geladen, sondern durch die vom ICE bereitgestellte Energie oder die Regeneration kinetischer Energie beim Bremsen. Dabei wird in der Regel ein gewisser Ladungsstand aufrechterhalten, wodurch kleinere Batteriepacks mit niedrigeren Kapazitäten aber einer hohen Anzahl an Ladezyklen verwendet werden. Die Kopplung

der beiden Antriebstechnologien ermöglicht höhere Systemleistungen und -effizienzen als beim alleinigen Einsatz eines ICEs. Dies führt zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch und damit zu niedrigeren Emissionen. Der Hybridisierungsgrad gibt dabei Auskunft über die maximal verfügbare elektrische Leistung im Vergleich zur Systemleistung (Poullikkas, 2015; Yong et al., 2015).

Plug-in Hybrid-Elektrofahrzeuge („Plug-in Hybrid Electric Vehicles“, PHEVs)

Diese Fahrzeugkategorie stellt eine Weiterentwicklung der HEVs dar, bei der die Aufladung der Antriebsbatterie auch über externe Energiequellen möglich ist. Dadurch kann das Fahrzeug auch mit Energie aus erneuerbaren Quellen betrieben werden, was die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen reduziert. Die Emissionen von PHEV sind jedoch, insbesondere bei rein elektrischer Fahrweise, stark vom verwendeten Energiemix abhängig. Dies kann beispielweise bei hohen Kohlestromanteilen dazu führen, dass PHEVs hinsichtlich ihrer THG-emissionen schlechter abschneiden als moderne, hocheffiziente ICEVs (Poullikkas, 2015; Yong et al., 2015).

Die Plug-in Bauweise ermöglicht darüber hinaus eine vom-Fahrzeugen-zum-Netz („Vehicle-to-Grid“, V2G) Integration und damit eine intelligente Nutzung der Batterie. Die längeren Lade- und Entladeintervalle bei PHEVs erfordern zwar weniger Ladezyklen, aber mehr speicherbare Energie, wodurch die Batteriepacks in der Regel größer ausgeführt werden als bei HEVs (Poullikkas, 2015; Yong et al., 2015).

Brennstoffzellen Elektrofahrzeuge („Fuel Cell Electric Vehicles“, FCEVs)

Diese Fahrzeuge verzichten vollständig auf ICEs und die Antriebsleistung wird nur durch den Elektromotor erbracht. Die dazu erforderliche elektrische Energie wird mittels einer chemischen Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff in einer Brennstoffzelle erzeugt. Zusätzlich verfügt das System über ein Batteriepack, um Lastspitzen abzufangen und Bremsenergie zu regenerieren. Dieses alternative Antriebssystem ist emissionsfrei, sofern der Wasserstoff mit EE erzeugt wird. Brennstoffzellen sind kleiner und leichter als derzeit verfügbare Batterien gleicher Leistung und das Antriebssystem nutzt kleinere Batteriepacks als bei anderen EVs (Poullikkas, 2015; Sanguesa et al., 2021).

Batterieelektrische Fahrzeuge („Battery Electric Vehicles“, BEVs)

Auch bei BEVs wird der Antrieb vollständig über einen Elektromotor realisiert. Die Traktionsbatterie wird dabei, prinzipiell nur noch außerhalb der Nutzungszeit des Fahrzeuges über externe Energiequellen geladen und während des Betriebs lediglich entladen, abgesehen von der Rückgewinnung der Bremsenergie zur Steigerung des Wirkungsgrads. Da bei diesen Fahrzeugen die Antriebsenergie über den gesamten Geschwindigkeitsbereich von der Batterie geliefert wird, sind leistungsfähige Batterien mit langer Lebensdauer erforderlich (Poullikkas, 2015; Yong et al., 2015).

BEVs bieten eine Reihe bedeutender Vorteile gegenüber ICEVs:

- Vermeidung von Auspuffabgasen
- Geringere Abhängigkeit von fossilen Energieträgern
- Verbesserte Fahrleistungen
- Effizienterer und wartungsärmerer Betrieb
- Höherer Fahrkomfort (Andwari et al., 2017; Poullikkas, 2015; Sanguesa et al., 2021).

Dennoch stehen BEVs vor einer Reihe von Herausforderungen, die vor allem aus technischer Sicht umfangreiche Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten erfordern:

- Substitution der teils kritischen Materialien zur Herstellung von EVBs
- Hohe erforderliche Investitionen in Ladeinfrastruktur und Netzausbau
- Soziale Akzeptanz aufgrund hoher Anschaffungskosten und Reichweitenängste (Andwari et al., 2017; Poullikkas, 2015; Sanguesa et al., 2021).

2.2.3 Entwicklung der Elektromobilität

Der weltweite Trend zur Elektromobilität der vergangenen Jahre führte zu einem starken Anstieg der Absatzzahlen von EVs, mit durchschnittlichen Wachstumsraten von über 30 Prozent pro Jahr (International Energy Agency, 2022). Begünstigt wird diese Entwicklung durch politische Anreizinstrumente wie Mehrwertsteuerbefreiung oder Subventionen beim Kauf eines EVs, aber auch durch Vergünstigungen bei der KFZ-Steuer, kostenloses Parken oder Mautbefreiung während der Nutzungsphase (Sanguesa et al., 2021).

Die laufende Einführung strengerer Umweltvorschriften fördert die Umstellung auf die Elektromobilität weiter. So sollen beispielsweise ab 2035 in der EU nur noch emissionsfreie Neuwagen verkauft werden (Europäisches Parlament, 2022b). Norwegen will dieses Ziel bereits zehn Jahre und die Niederlande fünf Jahre früher erreichen. Neben diesen umfassenden Maßnahmen beabsichtigen aber auch einzelne Städte Fahrverbote für ICEVs zu erlassen (Sanguesa et al., 2021).

Die starke Nachfrage nach EVs führt auch zu einer erhöhten Nachfrage an Lithium-Ionen-Batterien (LIBs), sodass sich die produzierte Gesamtkapazität im Jahr 2021 im Vergleich zum Vorjahr auf rund 340 GWh pro Jahr verdoppeln konnte (Ferrara et al., 2021). Schätzungen zufolge könnten bis 2030 zwischen 145 und 230 Mio. EVs im Umlauf sein. Je nach Szenario würde dies eine Verzehnfachung der aktuellen Produktionskapazitäten erfordern, wodurch 90 neue Batteriefabriken, sogenannte Gigafactories, mit einem jährlichen Output von 35 GWh pro Standort notwendig wären (International Energy Agency, 2022).

2.2.4 Wertschöpfungsketten im Automobilssektor

Im Automobilssektor führt der wachsende Anteil von EVs am Fahrzeugmarkt dazu, dass zum einen mehr Ressourcen für Forschung, Entwicklung und Produktion aufgewendet werden und zum anderen neue Geschäftsfelder im Mobilitätssektor entstehen. Dabei tragen etablierte und neue Marktteilnehmende mit BMs, die sich aus den Herausforderungen der Elektromobilität während der Herstellungs- und Nutzungsphase ergeben, zur Generierung neuer Wertschöpfungsanteile bei. Die Wertschöpfungskette lässt sich dabei grundlegend in vor- und nachgelagerte Bereiche unterteilen (Kampker et al., 2018b, S. 42-53).

Die vorgelagerte Wertschöpfungskette umfasst jene Geschäftsbereiche, die für die Produktion von Fahrzeugen erforderlich sind. Dazu gehört die Versorgung mit Rohstoffen und die Herstellung von Komponenten, Modulen und Systemen. Produktverbreiterung und Produktdifferenzierung führten bei OEMs in den vergangenen Jahren zu einem kontinuierlichen Rückgang der Eigenleistungen und die Konzentration auf Kernkompetenzen. Durch den Wandel zur E-Mobilität ist eine grundlegende Verschiebung in Richtung vorgelagerter Wertschöpfungsprozesse zu beobachten, da OEMs durch den Wegfall von ICE und Antriebsstrang versuchen den Verlust ihrer Kernkompetenzen zu kompensieren (Kampker et al., 2018b, S. 42-53).

Neue Möglichkeiten zur vorgelagerten Wertschöpfung ergeben sich bei der Gewinnung und Aufbereitung von Rohstoffen, der Produktion und Entwicklung von Komponenten wie Elektromotoren, Batterien und Leistungselektronik sowie bei der Entwicklung neuer Prozesstechnologien. Um das derzeitige Wertschöpfungsniveau zu erhalten, müssen OEMs an etwa der Hälfte der Wertschöpfungsprozesse des Elektroantriebs beteiligt sein. Um den Bedarf an Traktionsbatterien zu decken, gehen OEMs zusätzlich Gemeinschaftsunternehmen („Joint Ventures“, JVs) und langfristige Lieferverträge mit etablierten Batterieherstellenden ein. Die Verdrängung mechanischer und hydraulischer Bauteile durch Elektrik und Elektronik und der Eintritt neuer Agierende führt auch zu einer umstrukturierten Zulieferhierarchie. Abbildung 6 zeigt die Zulieferpyramide für Traktionsbatterien in der Automobilindustrie (Kampker et al., 2018b, S. 42-53).

Ergänzend dazu umfasst die nachgelagerte Wertschöpfungskette die Geschäftsbereiche, die sich aus dem fertigen Produkt ergeben. Dazu zählen Verkauf, Vermietung und Finanzierung von Fahrzeugen, aber auch Aftersales- und Service-Aktivitäten. Dabei verliert der Verkauf von Betriebsmitteln und Ersatzteilen zunehmend an Bedeutung. Die kürzeren Reichweiten, längeren Ladezeiten und hohen Anschaffungskosten von EVs ermöglichen jedoch neue Wertschöpfungsmöglichkeiten durch die Bereitstellung moderner Mobilitätskonzepte. Zusätzliche Wertschöpfung kann auch mit dem Aufbau der notwendigen Infrastruktur generiert werden. So bieten

Kooperationen mit Unternehmen aus den Bereichen Energie, Kommunikation und IT für OEMs zusätzliche Möglichkeiten am Markt (Kampker et al., 2018b, S. 42-53).

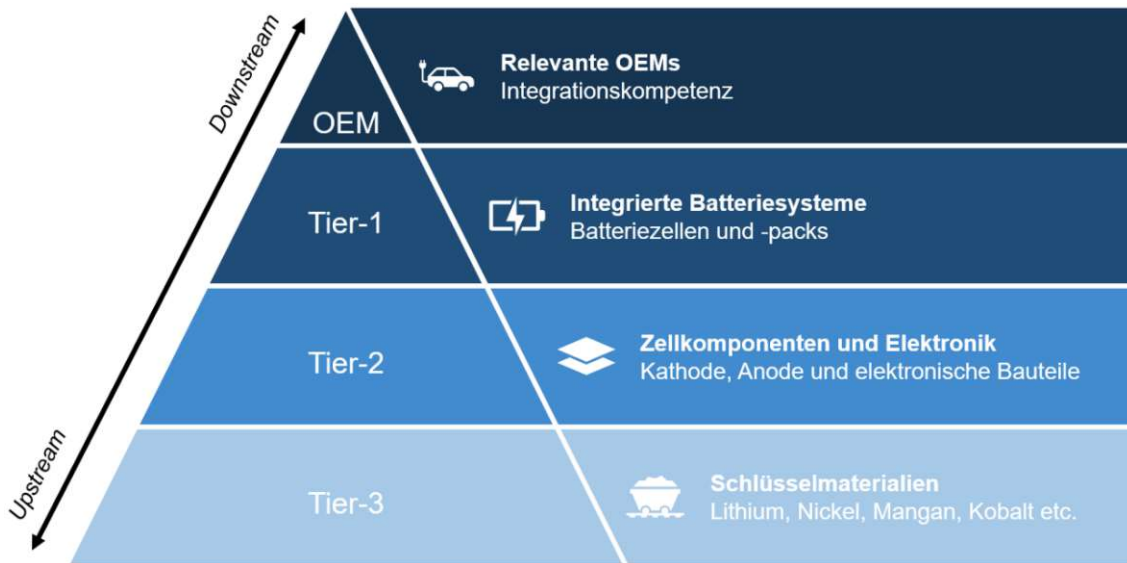


Abbildung 6: Zulieferpyramide für Traktionsbatterien in der Automobilindustrie (eigene Darstellung nach Kampker et al. (2018b, S. 51))

Die wirtschaftliche Verschiebung der Anteile führt auch zu einer möglichen geographischen Verschiebung der Wertschöpfung. Im vorgelagerten Bereich konzentriert sich diese zunehmend auf Regionen mit reichen Rohstoffvorkommen und einer Präsenz etablierter Unternehmen im Batteriesektor. Während sich für die EU und die USA aufgrund der steigenden Nachfrage nach Antriebsbatterien vielversprechende Chancen ergeben, besitzen asiatische Volkswirtschaften wie China, Japan und Südkorea aufgrund der Rohstoffvorkommen und Kompetenzen in der Batterietechnologie bereits Wettbewerbsvorteile (Kampker et al., 2018b, S. 42-53). Derzeit sind lediglich sieben Wirtschaftsräume an diesem Wertschöpfungssektor beteiligt. Den mit Abstand größten Anteil besitzt hierbei China mit 76 Prozent der globalen Produktionskapazität, gefolgt von der EU und den USA mit jeweils sieben Prozent. Südkorea und Japan folgen mit fünf bzw. vier Prozent Anteil, der Rest entfällt auf Produktionsstätten in verschiedenen Ländern Südasiens (International Energy Agency, 2022).

2.3 Batterietechnologie

2.3.1 Batteriespezifische Parameter

Als Energiespeicher ist die Traktionsbatterie die Hauptkomponente und aufgrund technologischer Grenzen auch die größte Herausforderung für die weitere Entwicklung und Marktakzeptanz von BEVs (Sanguesa et al., 2021). Im Folgenden werden die Auslegungs- und Schlüsselparameter von Traktionsbatterien erläutert. Erstere

Parameter definieren die Dimensionierung von Batteriesystemen, zweitens beeinflussen den Erfolg verschiedener Batterietechnologien.

Auslegungsparameter

Die wesentliche Variable bei der Auslegung von Traktionsbatterien für BEVs ist die Batteriekapazität. Diese beschreibt die nutzbare Energiemenge in Wattstunden (Wh) oder Amperestunden (Ah), die vom System gespeichert werden kann. Die Kapazität beeinflusst direkt die Reichweite von BEVs und Größe sowie Kosten der Traktionsbatterie. Diese drei Merkmale bestimmen die Auswahl der Antriebsbatterie bei der Fahrzeugentwicklung. Derzeitige Batteriekapazitäten reichen je nach Fahrzeugklasse von 20 bis 100 kWh, zukünftig werden auch EVBs jenseits der 100 kWh erwartet (Kampker et al., 2018b, S. 342-361; Sanguesa et al., 2021).

Zusätzlich gelten auch Batteriespannung und Batterieleistung als wichtige Parameter bei der Auslegung der Traktionsbatterie. Die Leistung der Batterie steht in direkter Korrelation mit der Leistung des BEVs und definiert so dessen Beschleunigung und maximale Geschwindigkeit. Typischerweise liegt diese in Größenordnungen von etwa 150 kW, je nach Fahrzeugklasse sind auch hier deutlich höhere Leistungen möglich. Die Batteriespannung steht in direktem Zusammenhang mit der ab- bzw. aufnehmbaren Strommenge und somit der Batterieleistung. Hohe Batterieströme erfordern starke elektrische Leitungen und führen zu größeren ohmschen Verlusten. Daher sind hohe Batteriespannungen von bis zu 1000 V erforderlich, um die Batterieströme bei Antriebsbatterien in annehmbaren Grenzen zu halten (Kampker et al., 2018b, S. 342-361).

Schlüsselparameter

Neben den Auslegungsparametern existieren eine Reihe weiterer Kenngrößen, die vor allem zum Vergleich unterschiedlicher Batterietechnologien herangezogen werden. Hierbei stellen die Energiedichte und die Leistungsdichte die wohl relevantesten Parameter dar. Beide Kenngrößen können sowohl volumetrisch als auch gravimetrisch betrachtet werden und geben somit die Energie bzw. die Leistung pro Volumen- oder Masseneinheit an (Bertram & Bongard, 2014, S. 100-105; Kampker et al., 2018b, S. 342-361; Sanguesa et al., 2021).

Darüber hinaus stellt die Lebensdauer eines Energiespeichers eine Kerncharakteristik für den Erfolg von Batterietechnologien dar. Die kalendarische Lebensdauer beschreibt die durchschnittliche Anzahl an Jahren, bevor eine EVB das Ende ihres Lebenszyklus erreicht. Bei derzeit konventionellen Antriebsbatterien liegt diese in der Regel bei acht bis zwölf Jahren. Die Zyklenlebensdauer ist ein Maß für den möglichen Ladungsdurchsatz und liegt in der Größenordnung von rund 3000 Zyklen, dies entspricht einer Fahrzeuglaufleistung von etwa 300.000 Kilometern. Da mit zunehmender Alterung die Kapazität der Batterie abnimmt und der Innenwiderstand

steigt, gelten Antriebsbatterien bei Restkapazitäten von rund 80 Prozent als nicht mehr geeignet für den weiteren Einsatz in BEVs (Kampker et al., 2018b, S. 342-361).

Der Innenwiderstand des Energiespeichers ist ebenfalls ein wichtiges Merkmal von EVBs. Je höher dieser ausfällt, desto mehr elektrische Energie wird während des Lade- bzw. Entladeprozesses in Wärmeenergie umgewandelt und desto geringer ist dessen Wirkungsgrad. Dies ist vor allem für das Schnellladen von BEVs relevant, da hier der Energieverlust deutlich höher ist als beim langsamen Laden (Sanguesa et al., 2021). In Ergänzung zu den genannten Schlüsselparametern sind zur Bewertung der Batterietechnologien auch Faktoren wie Kosten pro kWh und Sicherheit der Technologie relevant (Andwari et al., 2017; Bertram & Bongard, 2014, S. 100-105).

2.3.2 Batterietypen in EVs

Die Batterietechnologie hat in den letzten Jahrzehnten mehrere wichtige Entwicklungsschritte mit umfangreichen Innovationen durchlaufen. Im Mittelpunkt der Forschung stehen seit jeher neue Materialkombinationen, welche die Eigenschaften der Batterien verbessern. Im Folgenden werden die wichtigsten Batterietypen und deren Eigenschaften angeführt (Sanguesa et al., 2021).

Blei-Säure-Batterien

Dieser Batterietyp ist die älteste Form der wiederaufladbaren Batterie und wurde 1859 entwickelt, was zum Siegeszug der EVs Ende des 18. Jahrhunderts führte. Diese Energiespeicher bestehen aus Bleiplatten und einem Bleisäuredepot und sind bis heute der gängigste Bordbatterietyp in Fahrzeugen. Die Gründe dafür sind zum einen die vergleichsweise geringen Kosten von rund 100 \$/kWh, die Möglichkeit des Betriebs bei sehr niedrigen Temperaturen und eine hohe Sicherheit beim Laden sowie eine geringe Selbstentladung. Die Technologie gilt mittlerweile als ausgereift. Aufgrund der geringen Energiedichten von maximal 40 Wh/kg und der geringen Lebensdauer von etwa 1000 Zyklen werden diese Batterietypen nicht mehr als Antriebsbatterien von BEVs vorgesehen (Andwari et al., 2017; Cano et al., 2018)

Batterien auf Nickelbasis

Nickel-Cadmium (Ni-Cd) Batterien bestehen aus einer Nickelkathode und einer Cadmiumanode. Sie besitzen Energiedichten von bis zu 80 Wh/kg und eine Lebensdauer von etwa 2000 Ladezyklen. Allerdings ist Cadmium ein sehr teures und umweltschädliches Element und die Batterien besitzen einen großen Memoryeffekt, wodurch sie heutzutage nicht mehr in EVs verwendet werden (Andwari et al., 2017; Sanguesa et al., 2021).

Bei Nickel-Metallhydrid (Ni-MH) Batterien besteht die negative Elektrode aus einer wasserstoffspeichernden Metalllegierung anstelle von Cadmium. Dieser Batterietyp

zeichnet sich durch einen sehr sicheren Betrieb und ein gutes Tieftemperaturverhalten aus, was auch den Einsatz in kalten Regionen und den Einbau im Frontbereich des Fahrzeuges ermöglicht. Aufgrund ihrer hohen Energiedichte von bis zu 120 Wh/kg waren Ni-MH-Batterien bis vor wenigen Jahren der gängigste Typ für HEVs und PHEVs. Auch diese Technologie gilt inzwischen als ausgereift. Aufgrund der teuren Materialien und demzufolge hohen Kosten von rund 800 \$/kWh, der geringeren Energiedichte im Vergleich zu neueren Batterietechnologien und der geringen Lebensdauer von nur etwa 500 Zyklen ist dieser Technologietyp jedoch kaum noch wettbewerbsfähig. Daher werden Ni-MH-Batterien mittlerweile nicht mehr in BEVs verwendet und eine vollständige Verdrängung ist auch für andere EVs absehbar (Andwari et al., 2017; Cano et al., 2018; Kampker et al., 2018b, S. 341-362; Sanguesa et al., 2021).

Batterien auf Lithiumbasis

Aufgrund ihrer vorteilhaften Eigenschaften und ihres hohen Entwicklungspotenzials sind LIBs derzeit der gängigste und vielversprechendste Batterietyp für den Einsatz in EVs. Die Kathode besteht aus einer Aluminiumfolie, auf die je nach Batteriechemie eine Materialkombination mit drei bis fünf Gewichtsprozent Lithium aufgebracht wird. Die Anode besteht aus einer Kupferfolie mit Graphitschicht. Zwischen den beiden Elektroden befindet sich ein Elektrolyt aus Lithiumsalz, welcher zum Fluss der Lithiumionen beiträgt (Andwari et al., 2017; Sanguesa et al., 2021).

LIBs besitzen eine hohe Energiedichte von bis zu 275 Wh/kg. Dies und die lange Lebensdauer von bis zu 3000 Zyklen, die hohen Leistungsdichten, der geringe Memoryeffekt und der niedrige Innenwiderstand führen zu umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten für diese Batterietechnologie. Hohe Betriebstemperaturen als Folge von Kurzschlüssen aufgrund von Produktionsfehlern oder mechanischen Beschädigungen stellen aber ein erhebliches Sicherheitsrisiko dar, da Temperaturen über 150°C zur Selbstzerstörung der Elektrolyte und somit zur Entzündung oder Explosion führen können (Andwari et al., 2017; Sanguesa et al., 2021).

Die umfangreichen Investitionen, die in den vergangenen Jahren in diese Batterietechnologie getätigt wurden, führten zwischen 2010 und 2018 zu einer Senkung der Kosten für LIBs um 85 Prozent. Bis 2024 werden erstmals Kosten von unter 100 \$/kWh prognostiziert (Ali et al., 2021).

Batterien auf Natriumbasis

Natrium-Ionen-Batterien in Form von Natriumchlorid-Schwefel (Na-S) und Natriumchlorid-Nickel (NaCl-Ni) wurden in der Frühphase der Elektromobilität um die Jahrtausendwende in EVs eingesetzt. Diese Technologie bietet einen hohen Wirkungsgrad und eine lange Lebensdauer von bis zu 4500 Zyklen, bei etwa halb so großen Energiedichten wie LIBs. Sicherheitsbedenken aufgrund der hohen

Betriebstemperaturen von bis zu 350°C führten jedoch dazu, dass sich die Entwicklung auf die LIBs konzentrierte (Sanguesa et al., 2021; Yong et al., 2015).

Da Natrium das sechsthäufigste Element der Erde und damit vergleichsweise preiswert ist, forschen große Batterieherstellende mittlerweile wieder verstärkt an dieser Technologie. Zwar existieren derzeit noch keine ausreichenden Lieferketten zur großtechnischen Bereitstellung von Natrium, jedoch lassen sich etablierte Produktionsverfahren aufgrund der starken Ähnlichkeit zu Lithium relativ einfach anpassen (International Energy Agency, 2022).

2.3.3 Aufbau von Traktionsbatterien

Das Kernelement der Traktionsbatterien von EVs sind die Batteriezellen. Diese stellen die einzelnen Speicherelemente dar und sind derzeit jene Batteriekomponenten, in welche die größten Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen fließen. Die Zellen werden in der Regel in Batteriemodule zusammengefasst, die zusammen mit dem Kühlsystem und dem Thermomanagement, der Leistungselektronik und dem Batteriemanagementsystem (BMS) das Batteriepaket ergeben (Kampker et al., 2018a; Kampker et al., 2018b, S. 341-362).

Das BMS ist das zentrale Steuerungssystem der Traktionsbatterie und trägt neben der Überwachung relevanter Batterieparameter zu einem sicheren und effizienten Betrieb bei. Die einzelnen Batteriezellen werden sowohl in Reihe als auch parallel geschaltet, um die Anforderungen des Antriebssystems zu erfüllen. Da sich die einzelnen Zellen in ihren Eigenschaften leicht unterscheiden, müssen diese Unterschiede vom BMS kompensiert werden. Dies ist vor allem bei Reihenschaltungen relevant, da hier die schwächste Zelle die Gesamtleistung bestimmt. Daher ist ein Lastausgleich zwischen stärkeren und schwächeren Zellen notwendig, um Überlastungen oder hohe Entladeraten zu vermeiden (Andwari et al., 2017; Sanguesa et al., 2021).

Bei den Batteriezellen werden drei grundlegende Bauformen unterschieden, wobei jedes Zelldesign charakteristische Vor- und Nachteile aufweist. Die unterschiedlichen Bauformen sind auch in Abbildung 7 ersichtlich (Kampker et al., 2018b, S. 341-362).

Rundzellen

Diese bestehen aus einem zylindrischen Metallgehäuse, in das gewickelte Elektroden und Separatoren eingebracht werden. Dieses Verfahren ist bereits aus der konventionellen Batteriefertigung weitreichend bekannt. Außerdem ist dieser Zelltyp aufgrund des runden Querschnitts sehr robust gegenüber Beschädigungen und Verformungen. Nachteilig dagegen sind die geringere Packungsdichte und die schlechtere Wärmeableitung, was die Kühlung der Zellen erschwert (Kampker et al., 2018b, S. 341-362).

Pouch Zellen

Diese Zellen bestehen aus auf Länge geschnittenen und gestapelten Elektroden und Separatoren, welche in einer Folie verschweißt sind. Die Vorteile dieses Zelldesigns sind ein höheres Verhältnis von Oberfläche zu Volumen, wodurch eine effizientere Kühlung der Zellen möglich ist. Pouch Zellen sind kostengünstig und das leichtere Gehäuse führt zu höheren möglichen Energiedichten als bei anderen Zellkonzepten. Ein Nachteil ist die geringere Stabilität des Gehäuses, wodurch diese zum Aufquellen neigen und Dichtigkeitsprobleme auftreten können (Kampker et al., 2018b, S. 341-362).

Prismatische Zellen

Bei dieser Bauart sind die Elektroden und Separatoren entweder oval gewickelt oder geschichtet. Das solide Gehäuse bietet sowohl hohe Robustheit gegen mechanische Beschädigung und Aufquellen als auch hohe Packungsdichten und eine gute Wärmeableitung. Diese Eigenschaften machen prismatische Zellen für Anwendungen im automotive Bereich äußerst interessant (Kampker et al., 2018b, S. 341-362).

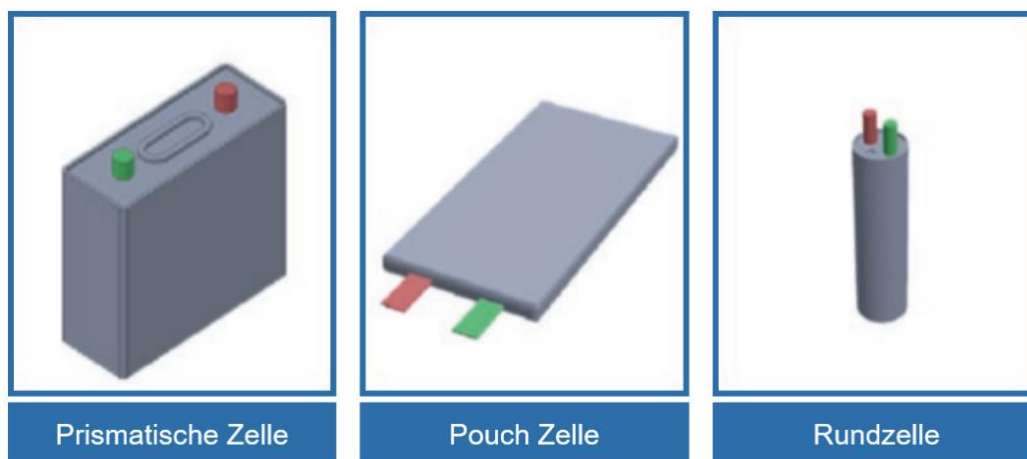


Abbildung 7: Bauformen von Batteriezellen (Eigene Darstellung nach Kampker et al. (2018b, S. 349))

2.3.4 Relevante Batteriematerialien

Durch intensive Weiterentwicklung in den letzten zwei Jahrzehnten konnte sich eine Auswahl verschiedener LIB-Chemien für unterschiedliche Anwendungen und Charakteristika etablieren. Diese Chemien basieren im Allgemeinen auf sechs Materialien, deren Bedeutung, Herkunft und Marktsituation im Folgenden näher erläutert wird (Ali et al., 2021).

Lithium

Dieses ist das Hauptelement moderner Traktionsbatterien und wird in allen LIB-Chemien für die Kathode und in einigen auch für den Elektrolyten verwendet. Das Element besitzt eine Reihe von Eigenschaften, welche für den Einsatz in EVs besonders

attraktiv sind. Dazu gehören etwa das bestmögliche Zellpotenzial und die geringe Masse aufgrund nur eines geladenen Ions mit sehr geringem Radius (Ali et al., 2021).

Lithium wird in der EU aufgrund seiner zunehmenden Bedeutung und der unsicheren Versorgungslage seit 2020 als kritischer Rohstoff eingestuft (European Commission, 2020a). In der EU hat sich die Nachfrage nach Lithium zwischen 2017 und 2021 annähernd verdoppelt, wobei die EU selbst keine relevanten Vorkommen oder bestehende Recycling-Infrastruktur besitzt und somit der Bedarf vollständig durch Importe gedeckt wird (Andwari et al., 2017; International Energy Agency, 2022).

Die reichhaltigsten Lithiumvorkommen befinden sich in Südamerika, wobei insbesondere Chile mit 78 Prozent der Vorkommen und 44 Prozent der Rohstoffverarbeitung die wichtigste Lieferquelle weltweit darstellt. Weitere relevante Versorgungsnationen sind die USA, Australien und China, wobei letzteres mit etwa 39 Prozent der globalen Rohstoffverarbeitung einen erheblichen Anteil zum Primärressourcenverbrauch beiträgt (European Commission, 2020a; International Energy Agency, 2022).

Um die Umweltbelastungen durch den Abbau und die Verarbeitung von Lithium drastisch zu reduzieren, ist die Entwicklung funktionierender Recyclingstrategien zwingend erforderlich. Dies ist insbesondere für die EU relevant, um die Rohstoffabhängigkeit zu reduzieren und daraus folgend die Versorgungssicherheit und Preisstabilität zu erhöhen (Ali et al., 2021).

Kobalt

Kobalt ist ein wichtiger Bestandteil von LIB-Kathoden, da es die Leitfähigkeit und die strukturelle Stabilität der Elektroden erhöht, insbesondere während des Ladevorgangs. Das Element kommt nur selten in der Erdkruste vor und ist folglich hochpreisig. Der starke Anstieg der Rohstoffpreise um das Jahr 2018 führte einerseits zu einem verstärkten Interesse am Recycling des Rohstoffs und andererseits zu Bestrebungen der Herstellenden, den Kobaltgehalt in ihren Batterien zunehmend zu reduzieren. Nichts desto trotz ist eine vollständige Substitution von Kobalt durch andere Elemente vorerst ausgeschlossen (Ali et al., 2021).

Die größten Kobaltvorkommen befinden sich in Afrika, wobei die Demokratische Republik Kongo über rund 68 Prozent der weltweiten Vorkommen verfügt. Die Rohstoffe werden unter verstärktem Einfluss chinesischer Bergbauunternehmen zum Großteil direkt vor Ort, aber auch in China weiterverarbeitet (Baars et al., 2021; International Energy Agency, 2022). Die Angespannte Versorgungslage und daraus resultierende politische und ethische Konflikte in Afrika führen dazu, dass Kobalt ebenfalls von der EU als kritischer Rohstoff eingestuft wird (Ali et al., 2021).

Die EU kann mittlerweile etwa 22 Prozent ihres Gesamtbedarfs durch Recycling und aufgrund reicher Vorkommen in Finnland etwa 14 Prozent ihres Primärbedarfs eigenständig decken (European Commission, 2020a; International Energy Agency, 2022).

Nickel

Aufgrund seines niedrigeren Preises und der vergleichbaren Energiedichte ist Nickel ein häufig verwendeter Ersatz für Kobalt und wird in Zukunft für Batterien mit hoher Reichweite zunehmend wichtiger. Ein zu hoher Nickelanteil in der Kathode kann jedoch dazu führen, dass Nickelatome in die Lithiumionen-zonen diffundieren und so die Diffusionswege des Lithiums blockieren, was über einen längeren Zeitraum zu einem stärkeren Kapazitätsabfall der Batterie führt. Die wichtigsten Regionen zur Schürfung und Aufbereitung von Nickel sind Indonesien, die Philippinen und Russland, wobei letzteres etwa 20 Prozent des weltweiten Bedarfs an hochreinem Nickel in Batteriequalität bereitstellt (Ali et al., 2021; International Energy Agency, 2022).

Mangan

Mangan gilt aufgrund seines niedrigeren Preises im Allgemeinen als wirtschaftlicher wie Nickel oder Kobalt und trägt zur Erhöhung der thermischen Stabilität von Traktionsbatterien bei. Ein zu hoher Mangananteil in der Kathode kann jedoch zu einer Verringerung der spezifischen Kapazität führen. Die Versorgung von Mangan gilt aufgrund reicher weltweiter Vorkommen als gesichert. Zu den wichtigsten Abbaugebieten gehören Südafrika, Australien und China, wobei derzeit rund 90 Prozent des weltweiten Manganbedarfs in China aufbereitet werden (Ali et al., 2021; International Energy Agency, 2022).

Aluminium

Aluminium wird aufgrund seiner guten elektrischen Leitfähigkeit ebenfalls häufig als Kathodenmaterial eingesetzt. Jedoch benötigt die Gewinnung von Aluminium aus Aluminiumsilikaten große Mengen an Energie, wodurch der Preis des Rohstoffes stark von den Energiepreisen abhängt. Aluminium kann leicht recycelt werden, die Technologie dafür ist ausgereift und etabliert (Ali et al., 2021).

Natürlicher Graphit

Graphit stellt das wichtigste Anodenmaterial dar. Bis auf wenige Ausnahmen dient es als Trägermaterial für die Lithiumionen in der Anode und ist somit Hauptbestandteil derzeit gängiger LIBs. Mit 47 Prozent der weltweiten Vorkommen und 69 Prozent der weltweiten Verarbeitungskapazitäten nimmt China die führende Rolle bei der Versorgung des Weltmarktes mit Graphit ein. Die EU verfügt mit den Lagerstätten in Norwegen zwar über 8 Prozent der weltweiten Vorkommen, ist aber bei der Deckung

des Primärmaterialbedarfs fast vollständig auf Importe angewiesen. Auch der Sekundärbedarf kann durch Recycling zu lediglich drei Prozent gedeckt werden. Diese Umstände führen auch dazu, dass die EU natürlichen Graphit als kritischen Rohstoff einstuft (Dunn et al., 2021; European Commission, 2020a; International Energy Agency, 2022).

Zusätzlich zu den sechs genannten LIB-Materialien für konventionelle LIB-Chemien gewinnen mit Eisen und Titan zwei weitere Materialien zunehmend an Bedeutung. Eisen wird aufgrund seiner stabilisierenden und ungiftigen Eigenschaften zunehmend als Kathodenmaterial verwendet. Zudem ist das Element in großen Mengen verfügbar, weltweit verbreitet und somit vergleichsweise günstig (Ali et al., 2021). Titan gilt ebenfalls als vielversprechendes Element für den Einsatz in LIBs. Hier soll es als Anodenmaterial anstelle von Graphit eingesetzt werden, um unter anderem die Lebensdauer und die Sicherheit der Batterien deutlich zu erhöhen. Obwohl die Erdkruste sehr reich an Titan ist, ist die EU bei der Deckung ihres Primärmaterialbedarfs vollständig auf Importe angewiesen und kann nur 19 Prozent ihres Gesamtbedarfs durch Recycling decken, so dass auch Titan seit 2020 als kritischer Rohstoff eingestuft wird. Zu den wichtigsten Aufbereitungsnationen zählen China, Russland und Japan (Ali et al., 2021; European Commission, 2020a).

Abbildung 8 zeigt die Preisentwicklung der wichtigsten Rohstoffe für LIBs seit 2015. Trotz teilweise stark volatiler Rohstoffpreise konnten die Kosten für Batterien in diesem Zeitraum um etwa 65 Prozent gesenkt werden. Aufgrund der aktuell fast exponentiell steigenden Nachfrage nach Traktionsbatterien sind die Preise für Lithium, Kobalt und Nickel in den letzten zwei Jahren jedoch wieder stark angestiegen (International Energy Agency, 2022).

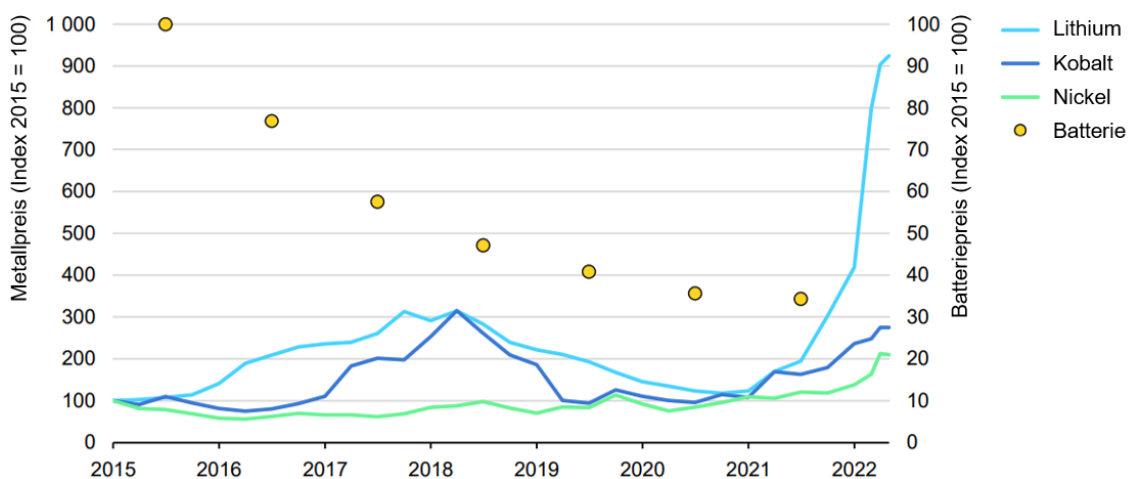


Abbildung 8: Batteriematerialpreise von 2015 bis 2022 (eigene Darstellung nach International Energy Agency (2022, S. 141))

2.3.5 LIB-Chemien für Traktionsbatterien

Kathoden auf Ni-Basis sind derzeit die am weitesten verbreitete Zusammensetzung für LIBs im Automobilssektor, mit einem Marktanteil von etwa 85 Prozent im Jahr 2021 (International Energy Agency, 2022). Mit Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC) und Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (NCA) lassen sich zwei grundlegende Kathodenzusammensetzungen unterscheiden (Ali et al., 2021).

NMC-Kathoden ermöglichen eine hohe spezifische Leistung und einen geringen Innenwiderstand, wodurch sie sich sehr gut für den Einsatz in EVs eignen. Diese Kathoden werden in der Regel mit einem dreistelligen numerischen Code bezeichnet, der den Anteil von Nickel, Mangan und Kobalt wiedergibt. Der Trend geht hierbei von nickelarmen Chemien wie NMC111 zu immer nickelreicheren Zusammensetzungen wie NMC811, wobei ein hoher Nickelgehalt in der Kathode höhere Kapazitäten und geringere Kosten ermöglicht, jedoch auch zu einem instabilerem Batterieverhalten führt (Ali et al., 2021; Dunn et al., 2021; International Energy Agency, 2022).

NCA-Kathoden zählen ebenfalls zu den nickelreichen Zusammensetzungen und besitzen z.B. Im Fall der NCA85-Kathode höhere Nickelgehalte und etwa gleich hohe Kobaltgehalte wie die NMC811, denen noch geringe Mengen Aluminium zugesetzt werden. Dieser Kathodentyp ermöglicht hohe spezifische Leistungen und hohe spezifische Energien, allerdings sind diese Batterien teurer als vergleichbare NMC-Varianten und werden daher hauptsächlich in höherpreisigen EVs eingesetzt (Ali et al., 2021; International Energy Agency, 2022).

Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP) gewinnen zunehmend an Bedeutung und machten im Jahr 2021 rund 15 Prozent der insgesamt hergestellten LIBs aus (International Energy Agency, 2022). Diese Zusammensetzung verzichtet vollständig auf Nickel und Kobalt in der Kathode und besteht stattdessen hauptsächlich aus Eisenphosphat. Neben den kostengünstigen Rohstoffen zeichnen sich diese Batterien durch einen geringen Innenwiderstand und eine gute thermische Stabilität aus, wodurch sie sich gut für die Zelle-zu-Pack („Cell-to-Pack“, C2P) Integration in das Fahrzeug eignen. Im Gegensatz zur konventionellen Konfiguration werden die Batteriezellen dabei nicht zuerst in Module zusammengefasst, sondern direkt im Batteriepack untergebracht (Ali et al., 2021; International Energy Agency, 2022; Kampker et al., 2018b, S. 341-362).

Der Ersatz der Graphitanode durch Lithium-Metall Kombinationen ist ein wichtiger Entwicklungsschritt in der Batterietechnologie und ermöglicht eine Lebensdauer von bis zu 6000 Zyklen. Eine mögliche Form dieser Batterien sind Lithium-Titanat-Zusammensetzungen, welche derzeit bereits als Anodenmaterial in High-End-EVs und für militärische oder luftfahrttechnische Anwendungen eingesetzt werden. In Kombination mit Hochspannungskathoden wie LFP ergeben sie eine hohe Kapazität

und Effizienz, eine hohe Zyklenlebensdauer und große Sicherheit gegen thermisches Durchgehen. Jedoch sind die Energiedichten vergleichsweise gering (Ali et al., 2021).

Ein weiterer zukünftiger Entwicklungsschritt sind Festkörperbatterien, bei denen der derzeit gängige flüssige Elektrolyt durch einen Feststoff-Elektrolyt ersetzt wird. Damit lassen sich Energiedichten erreichen, die rund 70 Prozent über denen heutiger Hochleistungsbatterien mit Graphitanoden liegen. Aufgrund der derzeit noch sehr hohen Produktionskosten und Sicherheitsbedenken beim Betrieb wird diese Technologie erst gegen Ende des Jahrzehnts für Massenanwendungen zur Verfügung stehen (International Energy Agency, 2022; Kampker et al., 2018b).

Darüber hinaus existieren eine Vielzahl weiterer Forschungsfelder für innovative Batteriematerialien, wie z.B. die Anwendung von Graphen oder Lithium-, Aluminium- bzw. Natrium-Luft Kombinationen mit vielversprechenden Eigenschaften (Sanguesa et al., 2021).

3 Aktuelle CE-Strategien bei EVBs

Um den aktuellen Wissenstand zu den CE-Strategien bei Traktionsbatterien von EVs umfassend abzubilden, wird eine systematische Literaturanalyse durchgeführt. Die ausgewählte Literatur wird hinsichtlich der behandelten CE-Ansätze für EVBs und deren Herausforderungen zur Umsetzung im Automobilsektor untersucht. Die Ergebnisse aus dieser Literaturanalyse bilden die Basis für die anschließende Analyse der CE-Strategien ausgewählter Unternehmen.

3.1 Systematische Literaturanalyse

Die systematische Literaturanalyse dient der Evaluierung des derzeitigen Stands der Forschung und baut auf der zentralen Forschungsfrage auf:

- *Welche CE-Strategien verfolgen die Hauptagierenden des Automobilsektors im Hinblick auf Traktionsbatterien in Europa?*

Um diese Thematik umfassend zu beleuchten, wird die systematische Literaturanalyse in Form einer deskriptiven Literaturlauswertung durchgeführt. Bei dieser Analyseverfahren wird die aktuelle Literatur im Hinblick auf die zentrale Forschungsfrage oder eines Teilbereichs dieser untersucht. Im Gegensatz zu anderen Methoden zielt die deskriptive Untersuchung nicht auf eine Erweiterung der Literatur ab, sondern bildet lediglich den zum Zeitpunkt der Untersuchung vorherrschenden Stand der Literatur ab. Das Kernthema der Literaturanalyse in diesem Kapitel sind CE-Ansätze für Traktionsbatterien von PKW (Xiao & Watson, 2019).

Zur weiteren Konkretisierung der systematischen Literaturanalyse, wird die Form der textuell-narrativen Synthese nach Xiao & Watson (2019) gewählt. Dabei werden einerseits relevante Informationen informell aus den Studien entnommen, welche dann zur Gegenüberstellung von Sachverhalten in Untergruppen eingeteilt und hinsichtlich Gemeinsamkeiten und Unterschiede verglichen werden. Darüber hinaus werden ausgewählte Merkmale der Studien standardisiert extrahiert und qualitativ verglichen. Um in diesem Kapitel den aktuellen Stand der Forschung zu bewerten, werden die untersuchten Studien hinsichtlich den inhaltlich behandelten Ansätzen untersucht und diese den zirkulären Strategien nach Potting et al. (2017) zugeordnet. Auf diese Weise kann eine belegbare Aussage zu aktuellen CE-Ansätzen in der einschlägigen Literatur getroffen werden (Xiao & Watson, 2019).

Nach Xiao & Watson (2019) besteht die Literaturanalyse dabei aus acht Schritten, die den drei grundlegenden Phasen Planung, Durchführung und Berichterstattung zugeordnet sind. Die Phasen und ihre jeweiligen zugehörigen Schritte sind in Abbildung 9 ersichtlich. Diese werden im Folgenden allgemein beschrieben und deren Umsetzung in der vorliegenden Analyse erläutert (Xiao & Watson, 2019).

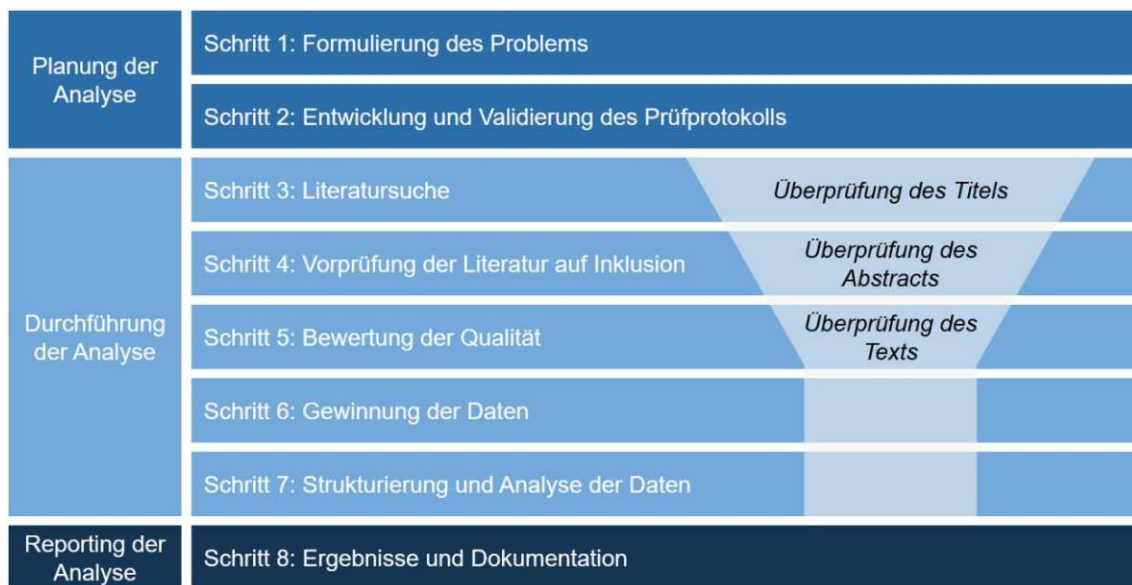


Abbildung 9: Prozess der systematischen Literaturanalyse (eigene Darstellung nach Xiao & Watson (2019, S. 11))

3.1.1 Planung der Literaturanalyse

Dieses Unterkapitel befasst sich mit den Maßnahmen, die in der Vorbereitung getroffen werden, um den Erfolg der Analyse zu beeinflussen.

Schritt 1: Formulierung des Problems

Da es sich bei der Literaturanalyse um eine Forschungsuntersuchung handelt, basiert die Analyse auf der zentralen Forschungsfrage und zielt auf die Beantwortung dieser ab. Um die aus der Analyse erhaltene Datenmenge zu begrenzen, wird demnach das Thema der Forschung möglichst exakt eingegrenzt. Zu diesem Zweck wird mit Hilfe einer ersten Literaturrecherche eine Einschätzung über den Umfang des zu sichtenden Materials und demzufolge dem Detaillierungsgrad des Forschungsthemas abgeleitet (Xiao & Watson, 2019).

In der vorliegenden Arbeit wird auf Basis der zentralen Forschungsfrage eine erste Literaturrecherche auf der Plattform Scopus durchgeführt. Der Suchbegriff „circular AND economy AND electric AND vehicle AND battery“ lieferte hierbei zum Zeitpunkt der Untersuchung 200 Treffer, wodurch das Forschungsthema im ersten Iterationsschritt als ausreichend detailliert befunden wird.

Schritt 2: Entwicklung und Validierung des Prüfprotokolls

Das Prüfprotokoll ist ein wichtiger Bestandteil der systematischen Literaturanalyse und gibt die Methoden zur Durchführung der Untersuchung vor. Dazu werden zuerst die im Zuge der Überprüfung zu untersuchenden Faktoren der einzelnen Studien definiert. Diese enthalten z.B. die Forschungsfragen, die untersuchten Faktoren sowie die

Ergebnisse der Studie. Abschließend erfolgt die Validierung der Vorgehensweise, um eine qualitativ hochwertige Überprüfung zu erzielen (Xiao & Watson, 2019).

In dieser Arbeit wird als Prüfprotokoll eine Review-Matrix erstellt. Diese definiert und dokumentiert die für die Untersuchung der Studien relevanten Faktoren. Dadurch sind die Inhalte und Parameter der einzelnen Studien übersichtlich veranschaulicht, rückverfolgbar dokumentiert und für eine aussagekräftige Analyse vereinheitlicht. Die Validierung der zu untersuchenden Faktoren in der Review-Matrix erfolgt durch die Betreuenden der Arbeit.

3.1.2 Durchführung der Literaturanalyse

Im folgenden Unterkapitel werden die Schritte allgemein und speziell für diese Arbeit erläutert, die für die Literaturanalyse durchgeführt werden.

Schritt 3: Literatursuche

Da die Qualität der Literaturanalyse stark von der gesammelten Literatur abhängt, zielt dieser Schritt darauf ab, geeignete Studien für die Untersuchung zu finden. Dabei kann grundsätzlich auf drei Hauptquellen zurückgegriffen werden. Elektronische Datenbanken gelten als wichtigste Quelle für Literatursammlungen und stellen heutzutage die erste Anlaufstelle für die Suche dar. Hierbei ist zu beachten, dass mehrere Datenbanken für die Suche verwendet werden, da sich die Datenbanken hinsichtlich der publizierten Studien unterscheiden. Bei der Rückwärtssuche werden die Literaturverzeichnisse ausgewählter Studien nach relevanten Publikationen durchsucht. Hierbei können jedoch nur Artikel gefunden werden, welche vor der Ausgangsstudie veröffentlicht wurden. Um auch Publikationen zu finden, welche sich auf eine bestimmte ausgewählte Quelle beziehen, kann zusätzlich eine Vorwärtssuche durchgeführt werden (Sandberg, 2017, S. 68-80; Webster & Watson, 2002; Xiao & Watson, 2019).

Um ein umfassendes Ergebnis der Literatursuche zu erhalten, wird diese auf den Datenbanken Google Scholar (GS), Scopus (SC) und Science Direct (SD) durchgeführt. Die Suchbegriffe für die Datenbanksuche werden aus den Forschungsfragen abgeleitet, mit den zentralen Begriffen „Circular Economy“ und „Traction Battery“ als Ausgangspunkt der Suchbegriffsdefinition. Basierend auf diesen Begriffen werden Synonyme, alternative Bezeichnungen und verwandte Begriffe definiert und mit Hilfe der Booleschen Operatoren „OR“ und „AND“ zu Suchstrings verknüpft. Abbildung 10 zeigt die Begriffe, aus denen sich die Suchstrings zusammensetzen. Um fehlende Suchbegriffe und daraus folgend die Vernachlässigung relevanter Literatur zu minimieren, werden ausgewählte Artikel einer Vorwärts- bzw. Rückwärtssuche unterzogen (Xiao & Watson, 2019).

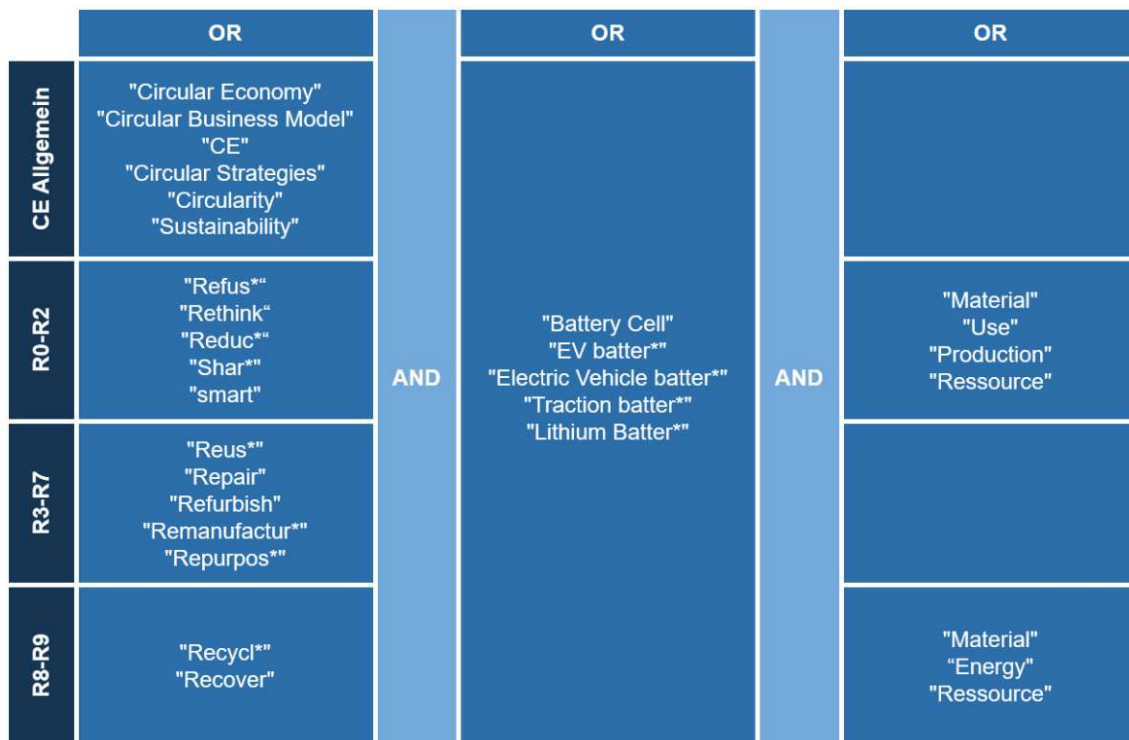


Abbildung 10: Zusammenstellung der Suchstrings für die systematische Literaturrecherche zum aktuellen Forschungsstand

Da die Suche nach dem Begriff „Circular Economy“ auf der Datenbank Scopus zum Untersuchungszeitpunkt 69.571 Treffer ergab, werden für die Literatursuche Ein- und Ausschlusskriterien definiert, um die Ergebnisse einzugrenzen. Eine Analyse der Jahre, in denen Studien zum Thema „Circular Economy“ auf Scopus publiziert wurden, lässt einen signifikanten Aufwärtstrend ab dem Jahr 2018 erkennen, was auf ein zunehmendes Forschungsinteresse an diesem Thema in den vergangenen fünf Jahren schließen lässt. Diese Entwicklung ist auch in Abbildung 11 ersichtlich. Somit werden in die Untersuchung lediglich Publikationen eingeschlossen, welche ab einschließlich 2018 veröffentlicht wurden (Sandberg, 2017, S. 68-80; Xiao & Watson, 2019).

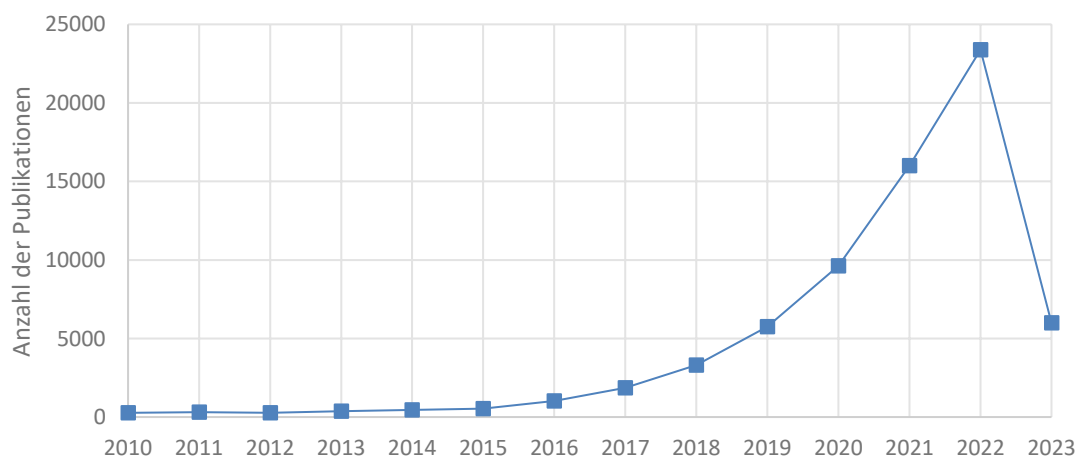


Abbildung 11: Publikationen zum Begriff „Circular Economy“ auf Scopus

Ergänzend dazu werden zur weiteren Konkretisierung der Suchergebnisse lediglich Studien berücksichtigt, die auf Deutsch oder Englisch veröffentlicht wurden. Aufgrund des Schwerpunktes dieser Arbeit auf die CE-Strategien von führenden Unternehmen im Automobilsektor, werden bei der Suche auf SC und SD die Fachbereiche, denen die Studien zugeordnet sind, auf wirtschaftlich-technische Disziplinen festgelegt. Weiters erfolgt eine Einschränkung der Publikationen auf wissenschaftliche Papers, Reviews und Articles. Auf der Plattform GS werden aufgrund fehlender Möglichkeiten zur Präzisierung keine Einschränkungen hinsichtlich Artikeltyp und Fachbereich vorgenommen. Tabelle 1 bietet eine Übersicht der Ein- und Ausschlusskriterien der Literatursuche (Sandberg, 2017, S. 68-80; Xiao & Watson, 2019).

Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien der Literatursuche

Plattform	Kriterium	eingeschlossen	ausgeschlossen
Scopus (SC)	Publikationsjahr	2018 bis 2023	vor 2018
	Artikeltyp	Article Conference Paper Review Conference Review	andere
	Fachbereiche	Engineering Energy Environmental Science Business, Management and Accounting Economics, Econometrics and Finance	andere
	Sprachen	Deutsch, Englisch	andere
Science Direct (SD)	Publikationsjahr	2018 bis 2023	vor 2018
	Artikeltyp	Review Articles Research Articles	andere
	Fachbereiche	Engineering Energy Environmental Science Business, Management and Accounting	andere
	Sprachen	Deutsch, Englisch	andere
Google Scholar (GS)	Publikationsjahr	2018 bis 2023	vor 2018
	Sprachen	Deutsch, Englisch	andere

Die Sortierung der Suchergebnisse auf den Datenbanken erfolgt nach Relevanz. Da die Literatursuche trotz festgelegten Kriterien in der Regel eine vierstellige Zahl an Ergebnissen ergibt, die Literaturrecherche jedoch lediglich einen selektiven Überblick über aktuelle Forschungsthemen bieten soll, wird die Suche bei jedem Suchbegriff nach 200 Treffern beendet (Xiao & Watson, 2019). Die Suchbegriffe und die Anzahl der gewonnenen Studien sind in der Tabelle 2 angeführt.

Schritt 4: Vorprüfung der Literatur auf Inklusion

Dieser Schritt erfolgt simultan zur Literatursuche, dabei wird geprüft, ob die in der Suche gefundenen Quellen in die Untersuchung einbezogen oder ausgeschlossen werden. Dies geschieht, indem die Abstracts daraufhin überprüft werden, ob ihr Inhalt die Themen der Forschungsfragen aufgreift. Es werden lediglich Studien

berücksichtigt, welche entweder CE-Strategien oder Herausforderungen beim Übergang zur CE bei Traktionsbatterien behandeln. Weiters werden aufgrund der Forschungsfragen nur Studien berücksichtigt, die diese Entwicklungen entweder in Europa oder aufgrund seiner Vormachtstellung im Bereich der Elektromobilität in China untersuchen. Besteht bei Studien Unklarheit bezüglich der Erfüllung der Einschlusskriterien, werden diese miteingeschlossen (Xiao & Watson, 2019).

Bei der Datenbankrecherche anhand der Suchbegriffe wurden insgesamt 390 Abstracts gesichtet und 78 Studien für die weitere Untersuchung ausgewählt. Zusätzlich wurden 25 Studien durch die Vorwärts- und Rückwärtssuche in den Quellenverzeichnissen mit denselben Kriterien untersucht, sechs wurden in die weitere Analyse aufgenommen. Eine vollständige Auflistung der Suchbegriffe und Ergebnisse ist in Tabelle 2 ersichtlich.

Tabelle 2: Suchbegriffe und Ergebnisse der Literatursuche

	Suchstring	ID	Treffer gesamt	Treffer durchsucht	Abstract geprüft	Vorgeprüfte Auswahl	Finale Auswahl
CE Allgemein	("Circular Economy" OR "Circular Business Model" OR "CE" OR "Circular Strategies" OR "Circularity" OR "Sustainability") AND ("Battery Cell" OR "EV batter*" OR "Electric Vehicle batter*" OR "Traction batter*" OR "Lithium Batter*")	SC1	401	200	74	24	22
		SD1	6051	200	38	7	5
		GS1	7140	200	18	3	1
Smartere Nutzung und Herstellung R0-R2	("Refus*" OR "Rethink" OR "Reduc*" OR "Shar*" OR "smart") AND ("Battery Cell" OR "EV batter*" OR "Electric Vehicle batter*" OR "Traction batter*") AND ("Material" OR "Use" OR "Production" OR "Ressource")	SC2	12430	200	16	4	0
		SD2	8474	200	14	2	2
		GS2	7530	200	10	2	0
Verlängerung des Lebenszyklus R3-R7	("Reus*" OR "Repair" OR "Refurbish" OR "Remanufactur*" OR "Repurpos*") AND ("Battery Cell" OR "EV batter*" OR "Electric Vehicle batter*" OR "Traction batter*")	SC3	2009	200	58	8	3
		SD3	1577	200	42	5	5
		GS3	1270	200	26	4	4
Nutzung der Batteriematerialien R8-R9	("Recycl*" OR "Recover") AND ("Battery Cell" OR "EV batter*" OR "Electric Vehicle batter*" OR "Traction batter*") AND ("Material" OR "Energy" OR "Resource")	SC4	3043	200	40	4	2
		SD4	1931	200	34	8	5
		GS4	2320	200	20	1	1
Rückwärts-Suche		RS	-	-	17	4	3
Vorwärts-Suche		VS	-	-	8	2	2
		Summe	54176	2400	415	78	55

Schritt 5: Bewertung der Qualität

Nach der Untersuchung der Abstracts werden in diesem Schritt die Studien einer Volltextsuche unterzogen. Ziel hierbei ist es, Studien auszuschließen, welche nicht die

vordefinierten Anforderungen erfüllen. Ausschlussgründe sind hierbei (Sandberg, 2017, S. 68-80; Xiao & Watson, 2019):

1. Relevanz: Studie bietet keinen relevanten Beitrag zum Themenkomplex der Forschungsfragen der Arbeit
2. Umfang: Studie behandelt relevante Themenfelder entweder zu detailliert oder nicht detailliert genug für den Rahmen der Arbeit
3. Qualität: Unklare, unvollständige oder undurchsichtige Methodik; Format und Aufbau der Studie entsprechen nicht den Standards wissenschaftlicher Studien
4. Aktualität: Inhalt der Studie ist nicht mehr aktuell oder wurde durch neuere Studien überholt (Sandberg, 2017, S. 68-80; Xiao & Watson, 2019)

Die Qualitätsbewertung stellt den letzten Schritt der Literatursuche und Eingrenzung der für die Untersuchung verwendeten Studien dar. Dabei wurde die Zahl der zu untersuchenden Studien auf 55 reduziert.

Schritt 6 und 7: Gewinnung, Strukturierung und Analyse der Daten

Um den aktuellen Forschungsstand zu den CE-Strategien bei Traktionsbatterien selektiv abzubilden, werden die in den ausgewählten Studien enthaltenen Inhalte in zwei Matrizen dokumentiert. Ziel hierbei ist, die Informationen der Studien möglichst umfassend und einheitlich aufzubereiten und zu organisieren, um den Vergleich der Studieninhalte zu ermöglichen (Xiao & Watson, 2019).

Die Review Matrix enthält eine übersichtliche Auflistung der untersuchten Studien und dient als Dokumentation ihrer wichtigsten Merkmale. Darunter fallen etwa die behandelten Forschungsfragen, Methodiken und Ergebnisse der Studien. Zusätzlich wird bei der Analyse der Inhalte unterschieden, ob die Studien entweder einzelne CE-Strategien detailliert oder die Herausforderungen in Bezug auf die Umsetzung von Strategien behandelt. Ergänzend dazu werden die Studien den fünf Themengebieten Wertschöpfungsketten, BMs, Technologien, Designkriterien und Politik zugeordnet.

Darüber hinaus wird eine Konzeptmatrix erstellt, welche die untersuchten Studien den zirkulären Strategien nach Potting et al. (2017) zuordnet. Diese dient als Übersicht, welche Strategien aktuell von Forschenden ausführlich bzw. weniger ausführlich untersucht werden und ist in Anhang 7.2 angefügt.

Schritt 8: Ergebnisse und Dokumentation

Der letzte Schritt der systematischen Literaturanalyse ist die Berichterstattung und detaillierte Dokumentation der Vorgehensweise, um die Reproduzierbarkeit der Forschungsergebnisse für andere Forscher zu gewährleisten (Xiao & Watson, 2019).

Da die Vorgehensweise der Literaturanalyse mit den Ergebnissen der jeweiligen Analyseschritte bereits in den vorhergehenden Unterpunkten ausführlich beschrieben

wurde, wird der Ablauf der systematischen Literaturanalyse an dieser Stelle nicht mehr explizit angeführt. Die Ergebnisse der Analyse zum derzeitigen Forschungsstand hinsichtlich der Implementierung von CE-Strategien bei EV-Traktionsbatterien bzw. den Herausforderungen, welche sich bei der Umsetzung der Strategien ergeben, folgt in den nachstehenden Unterkapiteln. Die Literaturanalyse konzentriert sich dabei vor allem auf die Handhabung der Batterien nach ihrem ersten Lebenszyklus, spiegelt jedoch auch in diesem Zusammenhang relevante Aspekte aus der Produktions- und Nutzungsphase der EV-Batterien wider.

3.2 Aspekte der CE für EVBs

Die systematische Literaturanalyse zeigt, dass das Konzept der CE auch im Kontext der Elektromobilität als vielversprechender Ansatz gilt, um die Verschwendung von Ressourcen zu reduzieren. Eine zentrale Rolle spielen hierbei Maßnahmen, welche die Zirkularität von Traktionsbatterien erhöhen.

Die Studien können dabei hinsichtlich der aktuellen Forschungsgebiete in fünf Themenbereiche eingeteilt werden, welche die Umsetzung von Strategien der CE im Automobilsektor beeinflussen. Diese umfassen Entwicklungen der Wertschöpfungs- und Lieferketten in Unternehmensnetzwerken, BMs auf Unternehmensebene, innovative Technologien zur Wiederverwendung und Verwertung, das zirkuläre Produktdesign von Traktionsbatterien und politische Maßnahmen zur Schaffung eines regulativen Rahmens. Zur Abbildung des aktuellen Stands der Forschung werden dazu zuerst für jeden Themenbereich aktuelle Konzepte aus der Literatur und deren Einfluss auf die Umsetzung der zirkulären Strategien dargestellt, anschließend folgt eine tabellarische Auflistung der in den Quellen genannten Herausforderungen (Alamerew & Brissaud, 2020; Baars et al., 2021; Potting et al., 2017).

3.2.1 Zirkuläre Wertschöpfungsketten

Wertschöpfungs- und Lieferketten behandeln die Bewegung von Materialien, Produkten und Dienstleistungen in Wirtschaftssystemen und gelten daher als Schlüsselkomponente für die Umsetzung von BMs und für den Wandel von der Linearwirtschaft zur CE. Die optimale Wertschöpfungskette besteht dabei aus kaskadierenden Kreisläufen, um die Lebensphase der Produkte bestmöglich zu nutzen und dem Recycling am Ende des Lebenszyklus, um die Materialien wieder dem Produktionskreislauf zuzuführen (Rajaeifar et al., 2022).

Produktherstellung und -nutzung

Die Zirkularität der Wertschöpfungsketten wird bereits vor der Nutzungsphase definiert und hängt neben dem umweltfreundlichen Design der Traktionsbatterien unter anderem von der Reduktion des Materialbedarfs ab (Hua et al., 2020). Seitens der

Batterieherstellenden wird diese Strategie hauptsächlich durch die Erhöhung des Rezyklatanteils und der Reduktion des Kobaltbedarfs ersichtlich (Schulz-Mönninghoff et al., 2023). Zweiteres äußert sich entweder durch eine Substitution des Kobalts durch eine Erhöhung des Nickelanteils in NMC- oder NCA-Chemien, bzw. durch eine vollständige Vermeidung von Kobalt durch LFP-Kathoden (Ali et al., 2021). Beide Entwicklungen reduzieren zwar den Bedarf kritischer Materialien und begünstigen so grundsätzlich die Nachhaltigkeit von Traktionsbatterien, die Beweggründe für diese Entwicklungen sind jedoch aufgrund der hohen Rohstoffpreise und höheren möglichen Kapazitäten vorrangig wirtschaftlicher und technologischer Natur (Baars et al., 2021; Tao et al., 2021).

Neben der Entwicklung neuer Batteriechemien stellt auch die anforderungsorientierte Dimensionierung der Speicherkapazität des EVs eine vielversprechende Möglichkeit dar, den Rohstoffbedarf zu reduzieren. Derzeit bewegt sich der Trend aufgrund der Reichweitenangst von Nutzenden zu maximal möglichen Batteriegrößen. Vor allem für Kleinwagen ist diese Entwicklung aber häufig nicht notwendig und eine an die Nutzungsbedingungen angepasste Batteriegröße ausreichend (Gloeser-Chahoud et al., 2021b).

Verlängerung der Produktlebensdauer

Nach dem ersten Lebenszyklus ergeben sich mit Reuse, Repair, Refurbishing, Remanufacturing und Repurposing mehrere Möglichkeiten zur Handhabung von Traktionsbatterien. Diese fünf Strategien verfolgen mit der Verlängerung der Nutzungsphase ein gemeinsames Ziel. Unterschiede ergeben sich hierbei im weiteren Einsatzbereich und den Aufbereitungsprozessen, welche die Batterien dafür durchlaufen (Gloeser-Chahoud et al., 2021b).

Reuse beschreibt hierbei die erneute Wiederverwendung der vollständigen oder Teile der Traktionsbatterie für den ursprünglich vorgesehenen Zweck, also den weiteren Einsatz im Automobilbereich in einem EV gleichen oder vergleichbaren Typs (Hill et al., 2019). Je nach Tiefe der Wiederaufbereitung können mehrere Strategien unterschieden werden. Repair bezeichnet die bestmögliche Wiederherstellung der ursprünglichen Batterieeigenschaften und ist in der Regel durch den Austausch einzelner Bauteile, von einzelnen Sicherungen bis zu kompletten Modulen, gekennzeichnet. Refurbishing und Remanufacturing verfolgen grundsätzlich dasselbe Ziel, ersteres jedoch auf Modulebene und zweiteres auf Zellebene (Albertsen et al., 2021; Gloeser-Chahoud et al., 2021b). Hierbei folgt nach einem umfassenden Batterietest und Screening die vollständige oder teilweise Zerlegung der Batteriepacks. Anschließend werden gealterte Module oder Zellen ausgetauscht, regroupiert und wieder assembliert (Hua et al., 2020).

Beim Repurposing werden die vollständige, oder Teile von Traktionsbatterien für nicht automotiv Zwecke umgewidmet und nicht mehr für ihre ursprüngliche Anwendung vorgesehen. Dies entspricht in der Regel einem Downcycling der Batterie und führt somit zu einem geringeren Zirkularitätslevel (Gloeser-Chahoud et al., 2021b; Hill et al., 2019). Ähnlich zum Reuse-Fall besteht auch hier die Prozesskette aus Batterietest, Screening, Demontage und anschließender Neugruppierung von Batteriepacks oder Komponenten. Die Neugruppierung ermöglicht das Zusammenfassen von Packs oder Komponenten mit ähnlichen Charakteristika, verlangsamt dadurch die Batteriealterung und reduziert die Wahrscheinlichkeit für Überladung, Überentladung oder thermisches Durchgehen (Hua et al., 2020).

Aus Sicht der CE besteht die ideale Lösung aus einer Abfolge von Remanufacturing der ausgedienten Traktionsbatterie nach dem ersten Lebenszyklus, anschließender Wiederverwendung der Restkapazität in nicht-automotiv Anwendungen, nachfolgendem Recycling sowie Rückführung der Materialien. Grundsätzlich sollte zur Erhöhung der Nutzungsrate der Batterien und somit zur Reduktion der Umweltauswirkungen die Wiederverwendung dem Recycling vorgezogen werden, bzw. das Recycling erst nach mindestens einer zweiten Verwendungsphase erfolgen (Ali et al., 2021; Gloeser-Chahoud et al., 2021b; Hua et al., 2020).

Nutzung der Batteriematerialien

Das Recycling ausgedienter Batterien dient zwei grundlegenden Zwecken in der Wertschöpfungskette. Einerseits kann durch die Rückführung der Materialien die Abhängigkeit von Primärrohstoffen reduziert werden, andererseits reduziert die Verwertung der Batterien die Menge an elektrochemischen Abfällen, wodurch auch der ökologische Fußabdruck verringert wird (Hill et al., 2019).

Durch die Vielzahl unterschiedlicher Zellchemien, Batterie- und Zellgeometrien und Batteriekonfigurationen ist das Recycling von Traktionsbatterien sehr komplex. Die Prozessschritte bestehen grundsätzlich aus der Vorbehandlung und der Materialrückgewinnung. Die Vorbehandlung beginnt mit der Entladung der Batterie, um Kurzschlüsse während des Recyclingprozesses zu vermeiden und einer Demontage der Batteriepacks auf Modul- oder Zellebene. Anschließend werden diese geschreddert, die Materialien vorsortiert und die Kathodenmaterialien entweder pyrometallurgisch oder hydrometallurgisch zurückgewonnen. Recyclingunternehmen konzentrieren sich aus Wirtschaftlichkeitsgründen derzeit lediglich auf die Rückgewinnung von Kathodenmaterialien hohen Werts, wie Kobalt oder Nickel. Lithium und Graphit werden aufgrund fehlender Rentabilität derzeit nicht industriell recycelt (Ferrara et al., 2021; Hua et al., 2020; Rajaeifar et al., 2022).

Zur Generierung von Kreisläufen in der Lieferkette ist die Entwicklung einer ausgereiften Rückwärtslogistik mit etablierten Sammelnetzwerken und optimierten

Transportrouten für die Zweitnutzungs- und Verwertungsstrategien essenziell. Zwar existieren bereits funktionierende Netzwerke für die Handhabung von Bleisäurebatterien, jedoch eignen sich diese aufgrund des höheren erwarteten Rücklaufvolumens und der größeren Produktkomplexität von LIBs nicht für die Rückwärtslogistik von Traktionsbatterien (Alamerew & Brissaud, 2020; Nurdiawati & Agrawal, 2022).

Die hohe Komplexität des Produkts mit mehreren Beteiligten entlang der Wertschöpfungskette erfordert es auch, die Rückwärtslogistik durch die Sammlung und den Austausch von Informationen zwischen den Beteiligten möglichst transparent und nachverfolgbar zu gestalten. Dies setzt die Verfügbarkeit von Informationen über die Historie und enthaltene Materialien der Batterie über alle Lebensabschnitte voraus (Nurdiawati & Agrawal, 2022).

3.2.2 Zirkuläre Geschäftsmodelle

Für Unternehmen im Automobilbereich, welche sich mit Traktionsbatterien befassen, lassen sich derzeit drei grundlegende lineare BMs identifizieren. Darunter fallen erstens der traditionelle Verkauf von Produkten und Services bzw. die Bereitstellung von Instandhaltungs- und Supportdienstleistungen für bereits verkaufte Produkte. Zweitens, die Durchführung von Forschungs- und Entwicklungsleistungen oder Beratungsdienstleistungen zu diversen Themengebieten. Drittens, die Übernahme von umweltbezogenen Services, wie die Entsorgung von Abfällen. Darüber hinaus lassen sich mit BMs bezüglich der gemeinsamen Nutzung von Produkten, der Bereitstellung einer fortschrittlichen Energieinfrastruktur und der Schaffung von umfassenden Produkt- und Materialkreisläufen drei zukünftige Aktivitätencluster identifizieren, deren Umsetzung Unternehmen im Ökosystem der Traktionsbatterien derzeit und in Zukunft beschäftigt (Toorajipour et al., 2022).

Sharing BM

Im Strategiecluster der intelligenteren Produktherstellung und -nutzung bietet die Steigerung der Nutzungseffizienz das größte Potenzial zur Etablierung von BMs, welche die Zirkularität von Traktionsbatterien erhöhen (Potting et al., 2017). Grundsätzlich erfolgt dies durch eine gemeinsame Nutzung von Produkten durch mehrere Beteiligte, wodurch Unternehmen ihre bestehenden Wertschöpfungsketten durch Diversifikation und Integration zusätzlicher Aktivitäten vertikal erweitern (Reinhardt et al., 2019).

Im Batteriekontext kann mit dem Batterieleasing oder Batterie-as-a-Service („Battery-as-a-Service“, BaaS) ein CBM identifiziert werden, bei dem die Hauptagierenden entweder Besitze der Batterien sind und sie weiteren Beteiligten zur Verfügung stellen, oder die Hauptagierenden nutzen die Batterien bzw. die Fahrzeuge der

weiteren Beteiligten als Dienstleistung über eine definierte Zeitspanne (Toorajipour et al., 2022). Diese CBMs erfordern einen Wandel traditioneller Eigentumsmodelle, da Konsumierende die Batterie nicht mehr besitzen, sondern über einen separaten Vertrag von den Herstellenden leasen. Dadurch ergeben sich einerseits Möglichkeiten rentabler BMs für OEMs mit hoher Akzeptanz seitens der Nutzenden (Hill et al., 2019). Zusätzlich wird die Konkurrenzfähigkeit ihrer EV-Flotte gegenüber konventionellen ICEVs gefördert, da die Batterien nicht von den Nutzenden erworben werden und so die Fahrzeuge zu einem niedrigeren Preis angeboten werden können. Darüber hinaus erhöhen Leasingmodelle die Transparenz, tragen so zur Erhöhung der Rücklaufquoten bei und fördern somit die Etablierung von Zweitnutzungs- und Verwertungsoptionen (Ahuja et al., 2020; Gloeser-Chahoud et al., 2021a; Reinhardt et al., 2019).

Eine weitere Ausprägung der Rethink-Strategie stellen Carsharing-BMs dar. Auch hierbei wird die Nutzungsrate der Fahrzeuge erhöht, indem in der Regel nicht das Produkt EV, sondern die Dienstleistung E-Mobilität von den Nutzenden erworben wird. Hierbei existieren mehrere Varianten, welche sich in der Zeit der Inanspruchnahme der Dienstleistung unterscheiden. Beispiele dafür sind etwa der gemeinsame Erwerb eines Fahrzeuges von mehreren Nutzenden, das Anbieten von Leihfahrzeugen durch einen Flottenbetreiber, Peer-to-Peer Carsharing oder Fahrgemeinschaften (Hill et al., 2019). Diese Sharing-Modelle führen zwar indirekt zu einer Nutzungsintensivierung der Batterie, beziehen sich jedoch vorrangig auf das Fahrzeug im Ganzen. Aus diesem Grund werden sie im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

Energieinfrastruktur BM

Bei BMs zum Aufbau zukünftiger Energieinfrastrukturen stellt etwa die V2G-Integration von Fahrzeugen und somit eine Nutzung der Traktionsbatterien im Energienetz eine vielversprechende Anwendung der Rethink-Strategie dar. Dabei werden Fahrzeuge bei Nichtgebrauch in das Energienetz integriert und speichern im Idealfall elektrische Energie aus Zeiten des Überangebots, um sie zu Spitzenlastzeiten wieder zur Verfügung zu stellen. Die fahrzeugseitige Realisierung dieser Einbindung ist durch die Ausstattung des Fahrzeuges mit der bidirektionalen Ladetechnologie technisch machbar, jedoch ist der Aufbau der erforderlichen Infrastruktur, beispielsweise für Energieverteilung und Vergütung, sehr komplex. Die V2G-Integration von Traktionsbatterien bietet zwar gegenüber der konventionellen Nutzung zum Antrieb von EVs nur selten wirtschaftliche Vorteile, gegenüber Second-Life-Anwendungen kann jedoch durch diese Anwendung ein höherer ökonomischer Nutzen erzielt werden. Nichtsdestotrotz bestehen Unklarheiten hinsichtlich der Auswirkungen auf die Batterielebensdauer und demzufolge die Verantwortung über Garantieleistungen (Etxandi-Santolaya et al., 2023; Hill et al., 2019).

Ergänzend dazu bieten Batterietauschstationen eine mögliche Lösung für die Entwicklung einer Ladeinfrastruktur mit indirekterer Einbindung der Batterien in das

Energienetz. Dabei wird eine entladene Batterie in kurzer Zeit durch eine geladene ersetzt. Diese erfordern zwar bereits funktionierende Leasingmodelle, ermöglichen aber die Vermeidung konventioneller Ladevorgänge an Schnellladestationen. Dies führt einerseits zur Reduktion der Batteriealterung durch die Vermeidung der hohen Ladeströme bei Schnellladeprozessen, andererseits können auch mögliche Aufwände für den Ausbau der notwendigen Netzinfrastrukturen reduziert werden. Darüber hinaus ermöglichen Tauschstationen die zeitliche Planung der Ladung, beispielsweise zu Zeiten hohen Energieangebots und folglich geringer Energiepreise. Jedoch ist dieses BM stark abhängig von der Standardisierung der Batteriepacks und erfordert höhere Investitionskosten als der Aufbau von Ladeinfrastrukturen (Hill et al., 2019; Reinhardt et al., 2019).

Looping BM

Neben dem Aus- und Aufbau von Energieinfrastrukturen durch die intelligentere Nutzung während des ersten Lebenszyklus der Batterien, besitzt im Business-to-Business Bereich vor allem das Repurposing zukünftig eine tragende Rolle in der Entwicklung und Anwendung von CBMs. Bei der Weiterverwendung ausgedienter Traktionsbatterien als stationäre Energiespeicher stehen zwei netzbezogene Anwendungen im Fokus der Forschung. Einerseits bieten solche Energiespeicher durch Spitzenglättung und Lastverteilung ebenfalls die Möglichkeit Überproduktionen elektrischer Energie, ohne Abschaltung von Erzeugungsanlagen, auszugleichen, über einen definierten Zeitraum zu speichern und in Zeiten höheren Verbrauchs wieder in das Netz zurückzuspeisen. Somit ermöglichen diese Anwendungen die Reduktion des Energiebedarfs von Industrien und den Stromhandel durch Batteriefarmen. Andererseits tragen diese Energiespeicher auch zur Regulierung kurzfristig auftretender Spannungs- oder Frequenzschwankungen im Energienetz bei. Beide Anwendungen sind vor allem bei zunehmendem EE-Ausbau erforderlich (Bobba et al., 2018; Hua et al., 2020; Olsson et al., 2018).

Ergänzend zur Zweitnutzung von Traktionsbatterien können solche Energiespeicher auch zur Einlagerung von neu produzierten Batteriesystemen, welche für den Ersatzteilmarkt vorgesehen sind, genutzt werden. Der Hintergrund dabei ist jener, dass Herstellende für den Aftersales-Markt ein gewisses Kontingent an Batteriekomponenten bereitstellen, die Fertigung außerhalb der Serienfertigung jedoch in der Regel mit hohen Stückkosten einhergeht. Die Einlagerung und Nutzung dieser Batterien ist insofern sinnvoll, da Batterien nicht nur durch ihre Ladezyklen, sondern auch kalendarisch altern, wobei der Einsatz in stationären Energiespeichern durchaus positive Auswirkungen auf die Alterung der Batterien aufweisen kann. Werden die eingelagerten Batterien entnommen, kann im Gegenzug eine Altbatterie eingelagert werden, um die Kapazität des Energiespeichers zumindest größtenteils aufrechtzuerhalten (Gloeser-Chahoud et al., 2021b).

Das Repurposing stellt auch eine Möglichkeit für BMs zur Etablierung von Produkt- und Materialkreisläufen dar, da neben den netzbezogenen Anwendungen auch weitere Nutzungsszenarien möglich sind. So können Energiespeicher auf Basis wiederverwendeter EV-Batterien auch für kommerzielle Zwecke, wie Backup Energiespeicher zur Sicherung des Betriebs während eines Stromausfalls von Telekommunikationsanlagen, Datacentern oder Krankenhäusern und vergleichbaren kritischen Infrastrukturen Anwendung finden. Werden EV-Ladestationen mit solchen Energiespeichern ausgestattet bietet dies den Vorteil der Entlastung des Energienetzes und ermöglicht schnellere Ladezeiten (Hua et al., 2020; Moore et al., 2020; Olsson et al., 2018).

Als drittes Anwendungsfeld für wiederverwendete Traktionsbatterien kommen Business-to-Consumer-Szenarien, wie etwa die Verwendung als Backup Speicher oder zur Speicherung eigens erzeugter Wind oder Solarenergie von Gebäuden und Haushalten mit oder ohne Netzanschluss, in Frage. Zusätzlich können diese Batterien in industriellen Fahrzeugen wie Gabelstaplern oder Baumaschinen, bzw. in kleineren motorisierten EVs wie E-Bikes und E-Scootern verwendet werden (Hua et al., 2020; Olsson et al., 2018).

Die Aufbereitung von Traktionsbatterien zu Energiespeichern kann entweder auf Pack-, Modul- oder zukünftig auch auf Zellebene erfolgen. Dabei erfordert die Demontage die Berücksichtigung und Förderung entsprechender Designkriterien sowie ausgereifte Diagnose- und Demontageprozesse. Wertschöpfung wird dabei entweder über den Verkauf oder die Vermietung der Speicherlösungen, den Verkauf von Packs und Modulen, Energiearbitrage oder die Durchführung von Dienstleistungen generiert (Albertsen et al., 2021; Gloeser-Chahoud et al., 2021b).

Hinsichtlich Remanufacturing ist aktuell aufgrund hoher Prozesskosten bei der Wiederaufbereitung, geringen Rücklaufmengen und fehlenden Batteriestandards noch nicht vollständig geklärt, wie diese Strategie zur Nutzung des Restwertes in gewinnbringende BMs integriert werden kann (Reinhardt et al., 2019). Vu et al. (2020) zeigen aber, dass das Remanufacturing von Traktionsbatterien im Vergleich zum Verkauf der Batterien am Ersatzteilmarkt und der Wiederverwendung in Energiespeichern durchaus eine höhere Rentabilität aufweisen kann (Vu et al., 2020).

Bei den BMs zum Recycling werden mit Open-Loop und Closed-Loop zwei Ausprägungen unterschieden. Erstes bezeichnet das konventionelle Recycling bestehend aus Sammlung, Trennung und Verkauf der Materialien. In der Regel sind OEMs aufgrund geringer und nicht kostendeckender Erträge an diesen Aktivitäten nicht involviert, sondern beauftragen externe Recyclingunternehmen dafür. Um teure Purifikationsschritte zu vermeiden, findet jedoch häufig ein Downcycling der Materialien statt (Albertsen et al., 2021).

Im Gegenzug dazu gilt das Closed-Loop-Recycling durchaus als interessanter Anwendungsfall, vor allem zur Verwertung von Produktionsabfällen und für Prozessoptimierungen ausgewählter Batteriechemien. Die wiedergewonnenen Materialien werden entweder in der eigenen Produktion wiederverwendet, um den Zukauf von Rohmaterialien zu vermeiden, oder an andere Zellproduzierende weiterverkauft, wenn dies aufgrund kürzerer Transportwege wirtschaftlich sinnvoller erscheint (Albertsen et al., 2021).

Um die ökologischen und ökonomischen Vorteile der einzelnen CE-Strategien zu maximieren wird eine Kombination mehrerer Strategien empfohlen, wobei ein Looping-BM bestehend aus Remanufacturing, Repurposing, Recycling und einem geeigneten Abfallmanagement diesbezüglich das größte Potenzial bietet (Wrålsen et al., 2021). Diese kombinierten CBMs offerieren für Unternehmen die Möglichkeit des Handels mit obsoleten Traktionsbatterien und tragen so signifikant zur Verbesserung der Nachhaltigkeit im Batteriesektor bei. Jedoch erfordert die Umsetzung den Wandel von derzeit vorherrschenden unternehmenszentrierten Modellen hin zu symbiotischen Modellen in einem Multi-Stakeholder-Netzwerk (Reinhardt et al., 2019). Dies erleichtert auch die Überwindung von Hürden für den Wandel zur CE im Ökosystem der Traktionsbatterien (Sopha et al., 2022).

3.2.3 Innovative Technologien

Die Überwindung vorherrschender Herausforderungen bei der Implementierung von CE-Strategien erfordert die Anwendung fortschrittlicher Technologien. Zu den relevantesten Entwicklungsbereichen zählen hierbei Technologien zur Datenverarbeitung, Batterietests, Demontageprozesse und Verwertungstechnologien.

Technologien zur Datenverarbeitung

Das Sammeln und Austauschen von Informationen entlang der Wertschöpfungskette gilt als eine der wichtigsten Voraussetzungen, um die Zirkularität von Traktionsbatterien zu erhöhen. Bewerkstelligt werden kann dies unter anderem durch die Anwendung eines digitalen Batteriepasses. Auch der aktuelle Vorschlag der Europäischen Kommission zur Überarbeitung der EU-Batterierichtlinie sieht die Einführung eines solchen digitalen Batteriepasses vor (Berger et al., 2022).

Dabei können die erforderlichen Datensätze in vier Informationskategorien eingeteilt werden. Produktbezogene Informationen erleichtern die Produktidentifizierung und enthalten etwa Informationen zum Batterietyp, Batteriechemie und Serien- bzw. Chargennummern. Informationen zur Nachhaltigkeit und Kreislauffähigkeit des Produkts erweitern die produktbezogenen Informationen um ökologische Eigenschaften und Aspekte der Batterien. Informationen zum Produktstatus bieten Auskunft über die Leistungseigenschaften des Produkts und helfen somit bei der

Entscheidung der vorgesehenen Anwendung. Informationen über die Wertschöpfungskette geben Aufschluss über die am Lebenszyklus der Traktionsbatterie Beteiligten (Berger et al., 2022; Reinhardt et al., 2019).

Die Verarbeitung dieser riesigen Informationsmengen erfordert die umfassende Anwendung fortschrittlicher digitaler Technologien. Die anfallenden Daten müssen sowohl in und zwischen den Unternehmen gesammelt, analysiert, gespeichert und verteilt werden. Zur Datensammlung und -verteilung kommen hierbei beispielsweise Internet der Dinge oder Blockchain Technologien infrage. Die Analyse der Daten kann etwa durch die Anwendung von künstlicher Intelligenz und die Datenspeicherung durch Cloud Computing erleichtert werden (Hua et al., 2020; Toorajipour et al., 2022).

Technologien zum Testen von Traktionsbatterien

Zur Feststellung der Leistungsfähigkeit und zur Entscheidung über weitere mögliche Zweitnutzungsoptionen ist die umfassende und zerstörungsfreie Testung der Traktionsbatterien erforderlich. Relevante Bewertungsindikatoren sind hierbei etwa die Produktsicherheit durch eine Einstufung der Batteriekomponenten in Sicherheitslevel, der Gesundheitszustand der Batterie durch die Identifikation des bereits erfolgten Kapazitätsverlustes und die Vorhersage der Restlebensdauer. Darüber hinaus bieten Kosten- und Nutzenindikatoren Vorhersagemöglichkeiten über die Wirtschaftlichkeit möglicher Zweitnutzungsoptionen (Etxandi-Santolaya et al., 2023).

Die Ermittlung der Leistungsfähigkeit kann dabei entweder durch Messung der Zellparameter im Batteriepack oder durch die Entwicklung modellbasierter und datengetriebener Methoden erfolgen. Um degradierte Batteriezellen beurteilen und austauschen zu können, ist eine schnelle und günstige Demontage erforderlich (Etxandi-Santolaya et al., 2023).

Technologien zur Demontage von Traktionsbatterien

Während die Produktion von Traktionsbatterien einen sehr hohen Automatisierungsgrad aufweist, werden Demontageprozesse aufgrund der geringen Rücklaufmengen derzeit noch größtenteils manuell durchgeführt. Da die Demontage für alle Wiederverwendungs- und Verwertungswege relevant ist, ist eine zunehmende Automatisierung dieser Prozesse unbedingt erforderlich, um die Demontage schneller und kostengünstiger durchführen zu können. Dabei kann der Demontageprozess je nach Verwertungsweg unterschiedlich gestaltet werden. Werden Batterien recycelt, ist beispielsweise eine Tiefenentladung der Batterie erforderlich und die Demontage kann grob auf Modulebene erfolgen. Repurposing oder Remanufacturing erfordern hingegen eine präzise und nicht-zerstörerische Demontage (Gloeser-Chahoud et al., 2021b).

Ein effizientes Kreislaufsystem soll die Wiederverwendung einzelner Komponenten der Wiederverwendung einzelner Materialien vorziehen. Aus diesem Grund ist die Entwicklung effizienter Demontageprozesse notwendig, um zirkuläre Wertschöpfungsketten zu realisieren. Idealerweise berücksichtigen diese automatisierten Prozesse datengesteuerte Modelle und Informationen des Batterielebenszyklus, wie Produktions- und Nutzungsdaten, zur Bewertung der Entscheidungswege. Ziel hierbei ist, die Nutzung auf Modul- oder bestenfalls Zellebene zu optimieren, erfordert jedoch eine entsprechende Berücksichtigung durch geeignete Designkriterien in der Entwicklungsphase (Gloeser-Chahoud et al., 2021a).

Technologien zur Verwertung von Traktionsbatterien

Die Wiederverwendung von Traktionsbatterien stellt zwar aus Sicht der CE eine höherwertige Strategie als das Recycling der Batteriematerialien dar, verzögert jedoch grundsätzlich den Materialkreislauf wichtiger Kathodenmaterialien. Dabei gelten EVBs aufgrund der hohen Konzentrationen an Lithium, Nickel, Kobalt und Kupfer vor allem bei zunehmender Elektrifizierung des Verkehrs als wichtige Rohstoffquelle (Ahuja et al., 2020; Rosenberg et al., 2023). Um die Wirtschaftlichkeit der Rückgewinnung von Traktionsbatterien zu erhöhen ist es notwendig Technologien, Prozesse und Umweltverträglichkeit der Verwertung zu verbessern (Alamerew & Brissaud, 2020).

Das pyrometallurgische Recycling stellt die am häufigsten angewendete Form dar, dabei werden die in den Batterien enthaltenen Metalloxide thermisch behandelt, um sie zu einer Legierung zu reduzieren. Das Verfahren besteht aus einfachen Prozessen, die aufgrund der hohen Verarbeitungskapazität bereits weit verbreitet im industriellen Maßstab eingesetzt werden. Die hohen Prozesstemperaturen erfordern jedoch große Mengen Energie, zusätzlich entstehen während der Schmelzprozesse giftige Gase. Das Verfahren wird hauptsächlich für die Rückgewinnung von Kobalt, Nickel und Mangan verwendet (Hua et al., 2020; Rajaeifar et al., 2022).

Beim hydrometallurgischen Recycling werden die Aktivmaterialien zuerst in organischen oder anorganischen Säuren bzw. alkalischen Lösungen ausgelaugt, in Reduktionsmitteln aufgelöst und die Metalle durch Verfahren wie Elektrolyse oder Extraktion von Lösungsmitteln abgetrennt. Die Rückgewinnung der Metalle aus wässrigen Lösungen wird derzeit intensiv erforscht und bietet aufgrund des niedrigen Energieverbrauchs und der hohen Reinheit großes Potenzial zur großindustriellen Anwendung. Jedoch sind die Prozessschritte sehr komplex und erfordern große Mengen an Reaktionsmitteln (Hua et al., 2020; Rajaeifar et al., 2022).

Die Nachteile der beiden gängigen Prozesse verdeutlichen die Notwendigkeit umweltfreundlicherer Recyclingmethoden. Ein derzeitiges Forschungsgebiet stellt beispielsweise die Biohydrometallurgie dar. Dabei werden im Auslaugungsschritt Mikroorganismen eingesetzt, die Metalle aus Abfällen lösen. Dadurch lassen sich

Vorteile bei Energieverbrauch, Rückgewinnungsrate, Umweltauswirkungen und Investitionskosten erzielen. Ein weiterer Ansatz besteht in der Verwendung von Lösungsmittelgemischen basierend auf natürlichen organischen Säuren anstelle der umweltschädlichen Mineralsäuren. Diese ermöglichen eine enorme Senkung des Schmelzpunktes, sind in der Regel ungiftig, biologisch abbaubar und lassen sich einfach und kostengünstig herstellen (Ferrara et al., 2021).

Das größte Potenzial wird derzeit in der Entwicklung direkter Recyclingmethoden gesehen. Dabei werden die Aktivmaterialien der Kathode und Anode ohne Strukturersetzung des ursprünglichen Verbundes selektiv extrahiert und in neuen Elektroden wiederverwendet. Dies führt dazu, dass komplexe und zeitaufwändige Vorbehandlungen vermieden werden können. Dazu ist aber die Entwicklung neuer Materialien, wie Bindemittel, und die Neukonzeption der Batteriezellen, um die Entnahme der Aktivkomponenten zu ermöglichen, erforderlich. Verfahren dieser Art befinden sich derzeit im Forschungsstadium und sind noch nicht industriell anwendbar (Ferrara et al., 2021; Hua et al., 2020).

3.2.4 Zirkuläres Produktdesign von Traktionsbatterien

Neben der Entwicklung und Nutzung fortschrittlicher Technologien ist vor allem das Design der Batterien entscheidend, um die Zirkularität von Traktionsbatterien zu erhöhen. Im Vordergrund steht hierbei die Förderung der Demontagefähigkeit. Die Entscheidungen über diese Designkriterien werden zwar in der Entwicklungsphase, und somit am Beginn des Lebenszyklus getroffen, besitzen aber großen Einfluss auf die Möglichkeiten zur wirtschaftlichen und technischen Umsetzung von Zweitnutzungs- und Materialrückgewinnungsstrategien (Hua et al., 2020).

Die Industrie priorisiert derzeit die Umsetzung von Designkriterien, welche sich auf die Herstellungsphase der Batterien konzentrieren. Diese umfassen etwa die Fokussierung auf Qualität und Leistungsfähigkeit des Produkts, die Berücksichtigung der geltenden Gesetzeslage und saubere Produktionsprozesse inklusive der Vermeidung umweltschädlicher Materialien. Designkriterien die sich mit dem Ende des ersten Lebenszyklus befassen werden seitens der Industrie als wenig praktikabel angesehen und finden deshalb kaum Anwendung (Picatoste et al., 2022).

Für Batteriezellen sind hierbei vor allem Standards zur Vereinheitlichung von Zellchemien und -geometrien sowie eine saubere Trennung von Kathode und Anode relevant, um eine Zweitverwendung oder Verwertung der Batterien zu vereinfachen. Darüber hinaus bieten die Optimierung der Zellchemie hinsichtlich einer Maximierung der Lebensdauer und die Vermeidung seltener Materialien mögliche Potenziale zur leichteren Umsetzung von herstellungs- und nutzungsphasenorientierten CE-Strategien (Mossali et al., 2020; Quijano-Ortiz & Seepersad, 2022).

Für Batteriemodule und -packs bietet ebenfalls eine Standardisierung der Geometrie großes Potenzial, um die Demontagefähigkeit zu fördern. Darunter fallen neben den Abmessungen auch die Anordnung und Anzahl der Batteriezellen im Modul bzw. der Module im Pack. Weiters gilt die Ausführung der Kontakte und Befestigungen der Komponenten als ausschlaggebend für eine wirtschaftliche Demontage. Dabei sollen form- und kraftschlüssige Verfahren wie Steck- und Schraubverbindungen gegenüber stoffschlüssigen Verfahren wie Schweißen, Löten oder Kleben bevorzugt werden. Diese Befestigungsmittel erfordern ebenfalls eine Standardisierung. Um zusätzlich redundante Bauteile zu vermeiden sollten wenige große Module anstelle von vielen kleinen vorgesehen werden (Mossali et al., 2020; Quijano-Ortiz & Seepersad, 2022).

3.2.5 Politische Maßnahmen

Der Wandel zur CE im Automobilsektor erfordert grundlegende Veränderungen in diversen Bereichen. Neben den unterschiedlichen Stakeholdern wie OEMs und Verwertungsunternehmen gilt aber allen voran die Politik als federführendes Element bei der Umsetzung der Strategien der CE (Nurdiawati & Agrawal, 2022).

Derzeit gelten in Bezug auf Traktionsbatterien in der EU folgende regulatorischen Maßnahmen:

- Batterierichtlinie (2006/66/EG): Diese behandelt die Anforderungen für die Verwendung von Schadstoffen und das Abfallmanagement etwa in Form von konkreten Zielvorgaben zu Sammel- und Recyclingquoten von Batterien im Allgemeinen. Darüber hinaus definiert die Richtlinie die Verantwortlichkeiten beim in Verkehr bringen von Batterien und regelt somit die Umweltverträglichkeit während ihres gesamten Lebenszyklus.
- Altfahrzeugrichtlinie (2000/53/EG): Die Altfahrzeugrichtlinie behandelt sämtliche Aspekte der Handhabung ausgedienter Fahrzeuge und Komponenten durch die Definition von Anforderungen zu Wiederverwendung, Recycling und Verwertung inklusive Rückgewinnungszielen. Hierbei finden jedoch EVs keine spezifische Erwähnung.
- REACH (Verordnung (EG) 1907/2006): Diese Verordnung regelt allgemein die Verwendung von Schadstoffen durch Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Chemikalien.
- Abfallverordnung (2008/98/EG): Die Abfallverordnung setzt Definitionen für Abfall und Recycling von Abfällen im Allgemeinen. Außerdem werden in ihr Grundkonzepte wie etwa die EPR festgelegt (Hill et al., 2019; McCrossan & Shankaravelu, 2021).

Das derzeitige rechtliche Rahmenwerk ist aufgrund fehlender spezifischer Bestimmungen bezüglich Behandlung, Wiederverwendung oder Recycling nicht zur Regulation des erwarteten Anstiegs an Traktionsbatterien geeignet. Das Fehlen dieser

Bestimmungen führt zur Verunsicherung von Herstellenden und Nutzenden hinsichtlich der Handhabung der Batterien am Ende des ersten Lebenszyklus und verhindert so mögliche Investitionen in fortschrittliche Zweitnutzungs- oder Verwertungstechnologien (Malinauskaite et al., 2021). Darüber hinaus werden EV-Batterien laut Batterieverordnung zurzeit noch als Industriebatterien deklariert, wodurch sich Unsicherheiten bezüglich der Herstellendenverantwortung ergeben. Zusätzlich existieren noch keine vorgegebenen Schemata für die Sammlung der Batterien am Lebensende (Albertsen et al., 2021).

Derzeit erfolgt seitens EU eine Überarbeitung der veralteten Batterierichtlinie mit umfassenden Maßnahmen entlang der gesamten Lieferkette. Diese fördern etwa den Informationsaustausch durch die Einführung eines Batteriepasses und klarere Bedingungen zur EPR in den Lieferketten durch die Stärkung der Sorgfaltspflicht. Ergänzend dazu fördert die Richtlinie die Definition von Ökodesignmaßnahmen durch neue materialspezifische Sammel- und Recyclingziele, Mindestgehalte an Rezyklaten in Batterien und Regelungen zum CO₂-Fußabdruck von Produkten (Albertsen et al., 2021; Malinauskaite et al., 2021).

3.3 Herausforderungen für den Automobilsektor

Aus der Literaturanalyse lassen sich eine Vielzahl an Herausforderungen für den Wandel zur CE bei Traktionsbatterien ermitteln, welche in der nachstehenden Tabelle 3 angeführt sind. Dabei erfolgt die Einteilung der Herausforderungen nach den zuvor Ermittelten Aspekten der CE. Eine vollständige Auflistung der in der Literatur genannten Herausforderungen ist in Anhang 7.1 ersichtlich.

Tabelle 3: Herausforderungen für den Automobilsektor

Aspekt	Herausforderung	Quellen
Wertschöpfungs-kette	Verfügbarkeit von Daten zu Batteriehistorie und Batteriestatus	(Alamerew & Brissaud, 2020); (Olsson et al., 2018); (Hill et al., 2019); (Haram et al., 2021); (Hua et al., 2021); (Ahuja et al., 2020); (Gebhardt et al., 2022)
	Transparenz und Rückverfolgbarkeit entlang der Wertschöpfungskette	(Gebhardt et al., 2022); (Hua et al., 2020); (Nurdiawati & Agrawal, 2022); (Hill et al., 2019); (Agrawal et al., 2021); (Ali et al., 2021)
	Sammlung, Verwaltung und Austausch der anfallenden Datenmengen	(Gebhardt et al., 2022); (Nurdiawati & Agrawal, 2022); (Sopha et al., 2022); (Berger et al., 2022)
	Kooperation der Beteiligten entlang der Wertschöpfungskette	(Olsson et al., 2018); (Sopha et al., 2022); (Hua et al., 2020); (Rajaeifar et al., 2022); (Gloeser-Chahoud et al., 2021b); (Albertsen et al., 2021); (Reinhardt et al., 2019); (Li et al., 2020)
	Kosten und Regulatorien der Rückwärtslogistik (Transport, Lagerung, etc.)	(Rajaeifar et al., 2022); (Olsson et al., 2018); (Nurdiawati & Agrawal, 2022); (Slattery et al., 2021); (Gloeser-Chahoud et al., 2021b); (Sopha et al., 2022)
	Aufbau von geeigneten Rücknahme- und Sammelsystemen	(Nurdiawati & Agrawal, 2022); (Albertsen et al., 2021); (Olsson et al., 2018); (Sopha et al., 2022); (Rajaeifar et al., 2022); (Li et al., 2020); (Alamerew & Brissaud, 2020)

	Sicherheitsaspekte bei Transport, Verwertung und Wiederverwendung von ausgedienten Batterien	(Alamerew & Brissaud, 2020); (Sopha et al., 2022); (Reinhardt et al., 2019); (Hua et al., 2020)
	Geringe Anteile an Rezyklaten in den Batterien	(Gebhardt et al., 2022); (Malinauskaite et al., 2021)
	Niedrige Sammelraten	(Ferrara et al., 2021); (Hill et al., 2019)
	Sinkende Recyclingprofitabilität aufgrund der Reduktion des Kobaltanteils	(Rajaeifar et al., 2022); (Gloeser-Chahoud et al., 2021b); (Hill et al., 2019)
	Verfügbarkeit und ökologische Faktoren der Ressourcen zur Batterieherstellung	(Hill et al., 2019); (Malinauskaite et al., 2021); (Rajaeifar et al., 2022)
Geschäftsmodelle	Bedarf an Forschung und Entwicklung hinsichtlich Wiederverwendung und Verwertung	(Ferrara et al., 2021); (Martinez-Laserna et al., 2018); (Li et al., 2020); (Nurdiawati & Agrawal, 2022); (Ali et al., 2021)
	Mangel an wirtschaftlichen und techno-ökonomisch machbaren BMs	(Rajaeifar et al., 2022); (Hu et al., 2022); (Hua et al., 2020); (Alamerew & Brissaud, 2020); (Sopha et al., 2022); (Toorajipour et al., 2021); (Nurdiawati & Agrawal, 2022); (Olsson et al., 2018)
	Mangelndes Interesse an der Umsetzung von CBMs seitens der Unternehmen	(Olsson et al., 2018); (Sopha et al., 2022); (Li et al., 2020)
	Nicht erkennen des Wertschöpfungspotenzials der Beteiligten	(Olsson et al., 2018); (Toorajipour et al., 2021)
	Geringes Vertrauen und Qualitätsbedenken der Kundschaft bei Zweitnutzung	(Hua et al., 2020); (Sopha et al., 2022); (Huster et al., 2022)
	Unsicherheiten bezüglich der Wettbewerbsfähigkeit von aufbereiteten Batterien	(Sopha et al., 2022); (Hill et al., 2019); (Martinez-Laserna et al., 2018); (Hua et al., 2020); (Rajaeifar et al., 2022); (Wrålsen et al., 2021)
	Unsicherheiten bezüglich der Wertentwicklung von Batterien	(Reinhardt et al., 2019); (Albertsen et al., 2021); (Sopha et al., 2022); (Rajaeifar et al., 2022)
	Fehlende Planungssicherheit der Rücklaufmengen	(Sopha et al., 2022); (Haram et al., 2021); (Ahuja et al., 2020); (Li et al., 2020)
	Wirtschaftlichkeit von Zweitnutzungsoptionen	(Haram et al., 2021); (Ferrara et al., 2021); (Rajaeifar et al., 2022); (Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
	Wirtschaftlichkeit des Recyclings	(Rajaeifar et al., 2022); (Hua et al., 2020); (Gloeser-Chahoud et al., 2021b); (Sopha et al., 2022); (Agrawal et al., 2021); (Hill et al., 2019); (Nurdiawati & Agrawal, 2022); (Gloeser-Chahoud et al., 2021a)
	Ökologisches Bewusstsein und Verhalten der Beteiligten	(Albertsen et al., 2021); (Schulz et al., 2021); (Sopha et al., 2022); (Wrålsen et al., 2021)
		Markt für Gebrauchtbatterien erst in Entwicklung
Technologie	Nutzung fortschrittlicher IT-Technologien	(Toorajipour et al., 2021); (Hua et al., 2020); (Sopha et al., 2022); (Gloeser-Chahoud et al., 2021b); (Gebhardt et al., 2022)
	Effiziente, akkurate und zerstörungsfreie Diagnose auf Pack-, Modul- und Zellebene	(Hua et al., 2020); (Albertsen et al., 2021); (Reinhardt et al., 2019); (Etxandi-Santolaya et al., 2023); (Haram et al., 2021); (Rajaeifar et al., 2022); (Sopha et al., 2022)
	Fehlende Teststandards	(Albertsen et al., 2021); (Reinhardt et al., 2019)
	Screening und Regruppierung	(Hu et al., 2022); (Hua et al., 2020)
	Bestimmung der Zweitnutzungsanwendung	(Hua et al., 2020); (Ahuja et al., 2020); (Li et al., 2020)
	Modellierung der Batterieeigenschaften	(Hu et al., 2022); (Hua et al., 2020); (Martinez-Laserna et al., 2018)
	Umweltauswirkungen und Energieverbrauch derzeitiger Recyclingtechnologien	(Hua et al., 2020); (Ferrara et al., 2021)

	Hoher Anteil manueller Tätigkeiten bei Demontage und daraus folgende Notwendigkeit zur Automatisierung	(Hua et al., 2020); (Rajaeifar et al., 2022); (Gloeser-Chahoud et al., 2021b); (Hill et al., 2019); (Haram et al., 2021)
	Unsicherheit bezüglich der Entwicklung von Wiederverwendungs- und Verwertungstechnologien	(Li et al., 2020); (Albertsen et al., 2021); (Wrålsen et al., 2021)
	Fehlende effiziente und wirtschaftliche Basistechnologien für Wiederverwendung und Verwertung	(Li et al., 2020); (Wrålsen et al., 2021); (Ferrara et al., 2021); (Rajaeifar et al., 2022); (Hua et al., 2020); (Ahuja et al., 2020); (Sopha et al., 2022); (Reinhardt et al., 2019); (Alamerew & Brissaud, 2020); (Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
	Fehlende Prozessstandards	(Schulz et al., 2021); (Sopha et al., 2022)
	Hohe Kosten und Unsicherheiten bei Technologieinvestments	(Olsson et al., 2018); (Sopha et al., 2022); (Wrålsen et al., 2021)
Produktdesign	Berücksichtigung des Designs zur einfachen Demontage	(Rajaeifar et al., 2022); (Hua et al., 2020); (Albertsen et al., 2021); (Sopha et al., 2022); (Gloeser-Chahoud et al., 2021a); (Quijano-Ortiz & Seepersad, 2022); (Mossali et al., 2020) et al., 2020); (Alamerew & Brissaud, 2020); (Gloeser-Chahoud et al., 2021b); (Malinauskaite et al., 2021)
	Einfluss der Batteriekapazität auf Nachhaltigkeitsaspekte	(Etxandi-Santolaya et al., 2023); (Gloeser-Chahoud et al., 2021a)
	Fehlende Designstandards	(Li et al., 2020); (Rajaeifar et al., 2022); (Olsson et al., 2018); (Sopha et al., 2022); (Wrålsen et al., 2021); (Gloeser-Chahoud et al., 2021a); (Quijano-Ortiz & Seepersad, 2022); (Hill et al., 2019); (Ahuja et al., 2020); (Albertsen et al., 2021); (Gloeser-Chahoud et al., 2021b); (Alamerew & Brissaud, 2020); (Gebhardt et al., 2022)
	Vielfalt und schnelle Weiterentwicklung von Zellchemien und Geometrien	(Hua et al., 2020); (Rajaeifar et al., 2022); (Albertsen et al., 2021); (Gloeser-Chahoud et al., 2021a); (Haram et al., 2021); (Malinauskaite et al., 2021); (Schulz et al., 2021)
Politik	Datenschutz	(Hua et al., 2020); (Nurdiawati & Agrawal, 2022); (Sopha et al., 2022)
	Definition und Regulation von Zweitnutzungsoptionen	(Alamerew & Brissaud, 2020); (Li et al., 2020); (Hua et al., 2020); (Nurdiawati & Agrawal, 2022); (Gloeser-Chahoud et al., 2021b); (Olsson et al., 2018); (Ferrara et al., 2021); (Ahuja et al., 2020); (Hill et al., 2019)
	Mangel an geeigneten Regulatorien allgemein	(Hua et al., 2020); (Sopha et al., 2022); (Wrålsen et al., 2021); (Reinhardt et al., 2019); (Hill et al., 2019); (Haram et al., 2021); (Malinauskaite et al., 2021); (Alamerew & Brissaud, 2020); (Nurdiawati & Agrawal, 2022); (Albertsen et al., 2021); (Hu et al., 2022); (Sopha et al., 2022)
	Regulatorien zur Erhöhung der Transparenz	(Nurdiawati & Agrawal, 2022); (Schulz et al., 2021)
	Regulatorien und Anreize zur Entwicklung und Förderung von CBMs	(Li et al., 2020); (Sopha et al., 2022); (Ali et al., 2021); (Nurdiawati & Agrawal, 2022)

4 Methodik

Ziel dieses Kapitels ist die detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise zur Untersuchung aktueller CE-Strategien im Automobilsektor in Europa. Somit wird der methodische Rahmen festgelegt, um die Forschungsfragen zu beantworten.

4.1 Forschungsansatz der MCS

4.1.1 Forschungsstrategie

Als Forschungsstrategie wird für die vorliegende Arbeit eine qualitative Forschung mit deduktivem Ansatz gewählt. Qualitative Forschung zielt in der Regel auf die ausführliche Untersuchung weniger Sachverhalte und die interpretative Auswertung dieser ab. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Beantwortung offener Fragen. Dies ist auch hier der Fall, da einzelne Unternehmen im Hinblick auf ihre Aktivitäten der CE von Traktionsbatterien untersucht werden, um ein Gesamtbild der Branche zu erstellen (Bell & Bryman, 2011, S. 26-28).

Die meisten qualitativen Forschungen gewinnen neue Erkenntnisse in einem spezifischen Themenbereich und generieren daraus neue Theorien. Dieses Vorgehen wird als induktiver Ansatz bezeichnet. Jedoch können, wie im vorliegenden Fall, qualitative Forschungen auch zur Überprüfung von bestehenden Theorien angewendet werden. Bei diesem deduktiven Ansatz werden aus der allgemeinen Theorie Hypothesen abgeleitet und diese durch die eigenen Ergebnisse bestätigt oder widerlegt. Im konkreten Fall werden dazu die aus der Literatur gewonnen CE-Strategien hinsichtlich ihrer Umsetzung in relevanten Unternehmen im Ökosystem der Traktionsbatterien überprüft (Bell & Bryman, 2011, S. 26-28).

4.1.2 Forschungsdesign

Die Untersuchung der Umsetzung von CE-Strategien wird als MCS durchgeführt. Bei dieser Art von Fallstudien handelt es sich um eine vergleichende Forschung, bei der die einzelnen Fälle zunächst eingehend untersucht und anschließend Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen den Fällen ermittelt werden. Der Fokus der Forschung liegt dabei auf den einzelnen Fällen und ihren einzigartigen Kontexten, wobei eine klare Abgrenzung des Forschungsumfangs erforderlich ist (Yin, 2018). Zu diesem Zweck wird eine Stichprobe von 20 relevanten Unternehmen untersucht, welche im Bereich der EVs tätig sind. Eine genauere Beschreibung der Stichprobe wird im folgenden Unterkapitel gegeben.

Obwohl MCS aufgrund der detaillierten Betrachtung mehrerer Fälle in der Regel als zeit- und ressourcenintensiv gelten, bieten sie aussagekräftigere Erkenntnisse als

Einzelfallstudien und werden daher als robuster angesehen. Darüber hinaus bietet dieses Forschungsdesign folgende Vorteile (Yin, 2018):

- Die Möglichkeit, Muster zwischen den einzelnen Fällen zu erkennen und Unterschiede und Ähnlichkeiten der Unternehmen aufzudecken. Die Betrachtung und der Vergleich mehrerer Unternehmen fördern zudem auch die Schaffung von Verallgemeinerungen für den Sektor.
- Die Förderung des Verständnisses kontextueller Entscheidungsfaktoren der Unternehmen zu den einzelnen Strategien durch Einblicke in die Einflüsse von internen und externen Faktoren. Der Vergleich der Strategien führt zu neuen Theorien und fördert somit die Theorieentwicklung, darüber hinaus können Aussagen über die Effektivität einzelner Strategien getroffen werden.
- Durch die Triangulation der Informationsquellen und die Einbindung mehrerer Unternehmen in die Untersuchung kann die Thematik aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden. Dies fördert zusätzlich das Verständnis über die Komplexität der strategischen Entscheidungsfindung und ermöglicht es, bestehende Theorien zu bestätigen oder zu widerlegen (Yin, 2018).

Neben der Definition des Umfangs und der Abgrenzung der Fälle, werden zur umfassenden Beantwortung der Forschungsfrage zusätzlich Hypothesen formuliert. Diese limitieren den Umfang der Studie weiter und erhöhen so die Durchführbarkeit der Forschung (Yin, 2018). Dabei werden aus der bereits analysierten Literatur Hypothesen zu den CE-Strategien gebildet, welche durch die Erkenntnisse aus der MCS entweder bestätigt oder widerlegt werden (Bell & Bryman, 2011, S. 11-14).

Basierend auf den Forschungsfragen und der Literaturanalyse werden folgende Hypothesen untersucht:

- Die Unternehmen im Bereich der Traktionsbatterien konzentrieren sich verstärkt auf CE-Strategien geringer Zirkularität, wie Recycling oder Repurposing.
- Die Gründe für die Umsetzung von CE-Strategien in den Unternehmen sind vorrangig politischer oder wirtschaftlicher Natur.
- Zur Umsetzung von CE-Strategien sind die Unternehmen auf zuverlässige Kooperationen und Partnerschaften mit anderen Unternehmen angewiesen.

4.2 Fallauswahl und Stichprobe

Die Stichprobe stellt das Kernelement der Forschung dar, demzufolge besitzt die Auswahl der zu untersuchenden Fälle einen starken Einfluss auf den Erfolg und die Aussagekraft der MCS. Da die Auswahl an großen EV-Unternehmen am europäischen Markt begrenzt ist, wird ein einstufiges Auswahlverfahren durchgeführt (Yin, 2018).

Um eine aussagekräftige Stichprobe zu erhalten werden 20 Unternehmen aus dem Automobil- bzw. Batteriesektor ausgewählt. Die Mehrheit dieser Unternehmen sind Automobilherstellende, die EVs auf dem europäischen Markt anbieten. Die Auswahl dieser 17 Unternehmen basiert auf ihrem globalen Marktvolumen im Jahr 2021 (Statista, 2023a). Das globale Marktvolumen wird dem europäischen vorgezogen, um auch Herstellende miteinzubeziehen, deren Marktpräsenz in Europa zwar derzeit noch gering ist, aber in den kommenden Jahren durch neue attraktive Modelle oder aggressivere Marktstrategien zunehmen könnte (International Energy Agency, 2023).

Die ausgewählten Automobilherstellenden lassen sich in drei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe besteht aus traditionellen OEMs, die aufgrund des langjährigen Absatzes von ICEVs bereits eine gute Ausgangsposition auf dem europäischen Markt für den Verkauf von EVs besitzen. Die zweite Gruppe besteht aus jüngeren OEMs, die allgemein als besonders innovativ gelten und sich mit ihren EVs bereits in verschiedenen Märkten positionieren konnten. Die dritte Gruppe besteht aus chinesischen OEMs, die sowohl mit ICEVs, als auch EVs auf dem chinesischen Markt erfolgreich sind und ihre Aktivitäten auf den europäischen Markt ausweiten (International Energy Agency, 2023). Dabei werden nicht die einzelnen Marken, sondern die konzernweiten Aktivitäten zur CE bei Traktionsbatterien untersucht. Die Stichprobe umfasst Automobilherstellende aus Europa, Nordamerika, China, Japan und Südkorea.

Da die Automobilherstellenden in vielen Fällen ihre Batteriekomponenten von der Zelle bis zum Pack nicht oder nur teilweise konzernintern produzieren und somit auf die Expertise spezialisierter Unternehmen aus dem Batteriesektor zurückgreifen (International Energy Agency, 2023), werden die drei relevantesten Batterieherstellenden ebenfalls in die Stichprobe aufgenommen. Die Auswahl dieser Unternehmen erfolgt wieder nach ihrem Marktvolumen im Jahr 2021 (Statista, 2023b). Tabelle 4 zeigt die ausgewählten Unternehmen für die weitere Untersuchung.

Tabelle 4: Stichprobe der MCS

Gruppe	ID	Unternehmen	Gruppe	ID	Unternehmen
Traditionelle automotive OEMs	VW	Volkswagen	Innovative EV-OEMs	TE	Tesla
	ST	Stellantis		BY	BYD Auto
	BM	BMW Group		NI	NIO
	MB	Mercedes-Benz Group	Traditionelle chinesische OEMs	GW	Great Wall Motor
	VO	Volvo Cars		DO	Dongfeng Motor
	GM	General Motors		SA	SAIC Motor
	FO	Ford Motor		BA	BAIC Group
	HY	Hyundai Motor	Batterie-produzierende	CA	CATL
RE	Renault	LG		LG Chem	
TO	Toyota Motor	PA		Panasonic Energy	

4.3 Datenerhebung und Datenanalyse

4.3.1 Datenquellen

Die Datenerhebung für die Fallstudie erfolgt vergleichbar zur Vorgehensweise in Kapitel 3 nach Xiao & Watson (2019) mit Hilfe einer systematischen Literaturanalyse. Der Hauptunterschied besteht darin, dass anstelle der wissenschaftlichen Literatur vorrangig graue Literatur analysiert wird, um die CE-Strategien der Unternehmen zu untersuchen. Die Einbeziehung mehrerer Informationsquellen ist notwendig, um die Glaubwürdigkeit der Studie zu erhöhen (Baxter & Jack, 2008; Yin, 2018).

Der Begriff graue Literatur beschreibt Quellen, welche nicht in kommerziellen Publikationen veröffentlicht wurden und somit keinen Peer-Review-Prozess durchlaufen haben. Dazu gehören etwa Artikel in Magazinen und Zeitungen, wissenschaftliche Dissertationen oder Konferenzberichte. Die Einbeziehung von grauer Literatur bietet den Vorteil, dass Informationen, die in der wissenschaftlichen Literatur nicht verfügbar sind, in die Studie einbezogen werden können. Dies kann die Aktualität und Vollständigkeit der Forschung erhöhen (Mahood et al., 2014; Paez, 2017).

In dieser Fallstudie werden in erster Linie Inhalte von den Websites der jeweiligen Herstellenden, also von den Unternehmen selbst publizierte Informationen, als graue Literatur einbezogen. Da so die Informationen direkt von den untersuchten Agierenden bezogen werden, kann deren Zuverlässigkeit sichergestellt werden. Darüber hinaus werden Artikel aus renommierten branchenspezifischen Zeitschriften und namhaften Presseinstitutionen untersucht. Die Ein- und Ausschlusskriterien für die Literatursuche sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Ein- und Ausschlusskriterien für die Literatursuche

Plattform	Kriterium	eingeschlossen	ausgeschlossen
Google	Publikationsjahr	2020 bis 2023	vor 2020
	Quelle	Websites der Unternehmen industriespezifische Magazine Presseartikel	andere
	Sprachen	Deutsch, Englisch	andere

Um graue Literatur in die Studie einbinden zu können, muss deren Zitierfähigkeit und Zitierwürdigkeit gegeben sein. Zitierfähig bedeutet hierbei, dass die Informationen öffentlich zugänglich sind. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Quellen über Suchmaschinen gefunden werden können. Als zitierwürdig gelten Quellen, wenn sie einerseits für die Forschung relevant sind und zum anderen die Herkunft der Informationen in den Artikeln nachvollziehbar anführen. Weiters werden bei Artikeln

aus Zeitschriften etc. nur jene miteinbezogen, welche mit dem Namen der verfassenden Person und dem Datum der Veröffentlichung versehen sind (Sandberg, 2017, S. 77-78).

Für die Literatursuche wird eine Internetrecherche über die Suchmaschine Google durchgeführt. Dieses Vorgehen bietet das Potenzial die Sensitivität und Präzision der Suche zu maximieren, erfordert aber eine geeignete Suchstrategie. Eine hohe Sensitivität stellt sicher, dass keine relevanten Quellen vernachlässigt werden, während eine hohe Präzision dazu führt, dass nichtrelevante Quellen rasch ausgefiltert werden. Nachteilig an der Verwendung von Suchmaschinen ist ihre begrenzte Reproduzierbarkeit, da die Suchergebnisse durch den geographischen Standort des Forschenden beeinflusst werden. Darüber hinaus bieten Suchmaschinen wenige Möglichkeiten zur Filterung der Suchergebnisse (Mahood et al., 2014; Paez, 2017).

	OR		OR		OR		
*1	"[Unternehmen]"	AND	"Battery" "Electric Vehicle"	"Batterie" OR "Elektrofahrzeug"	AND	"Circular Economy" "Sustainability" "End of Life" "Circularity"	"Kreislaufwirtschaft" "Nachhaltigkeit" "Lebensende" "Zirkularität"
*2						"Rethink" "Reduce" "Reuse" "Repair" "Refurbish" "Remanufacture" "Repurpose" "Second Life"	"Umdenken" "Reduzieren" "Wiederverwenden" "Reparieren" "Aufarbeiten" "Wiederaufbereiten" „Umfunktionieren“ "2nd Life"

Abbildung 12: Zusammenstellung der Suchstrings für die systematische Literaturrecherche der MCS

Ähnlich wie bei der systematischen Literatursuche aus Kapitel 3 werden auch für diese Suche Phrasen erstellt. Diese umfassen neben allgemeinen Begriffen zur Thematik auch die Bezeichnungen der zirkulären Strategien nach Potting et a. (2017). Die Suchbegriffe werden in Englisch und Deutsch angeführt und mit den Booleschen Operatoren „AND“ und „OR“ kombiniert. Dabei werden pro Unternehmen zwei Suchphrasen erstellt, um eine höhere Sensitivität der Suche zu erzielen. Abbildung 12 zeigt die Zusammensetzung der Suchphrasen aus den einzelnen Begriffen, in Tabelle 6 sind die vollständigen Suchstrings aufgelistet. Aufgrund sich rasch wiederholender Ergebnisse in höhergelisteten Treffern werden zur Begrenzung des Umfangs für jede Suchphrase die ersten 100 Treffer geprüft.

Tabelle 6: Suchphrasen der Literatursuche

ID	Suchstring
*1	"[Unternehmen]" AND ("Battery" OR "Electric Vehicle" OR "Batterie" OR "Elektrofahrzeug") AND ("Circular Economy" OR "Sustainability" OR "End of Life" OR "Circularity" OR "Kreislaufwirtschaft" OR "Nachhaltigkeit" OR "Lebensende" OR "Zirkularität")
*2	"[Unternehmen]" AND ("Battery" OR "Electric Vehicle" OR "Batterie" OR "Elektrofahrzeug") AND ("Rethink" OR "Reduce" OR "Reuse" OR "Repair" OR "Refurbish" OR "Remanufacture" OR "Repurpose" OR "Umdenken" OR "Reduzieren" OR "Wiederverwenden" OR "Reparieren" OR "Aufarbeiten" OR "Wiederaufbereiten" OR "Umfunktionieren" OR "Second Life" OR "2nd Life")

4.3.2 Datensammlung und Datenorganisation

Der Umfang der untersuchten Literatur erfordert eine sorgfältige Erfassung der Informationen in einer Datenbank. Besondere Beachtung soll hierbei auf eine gute Dokumentation und Organisation gelegt werden, um die Replizierbarkeit der Studie zu gewährleisten (Baxter & Jack, 2008; Yin, 2018).

Zu diesem Zweck wird in dieser Arbeit eine Matrix der Fallbeschreibungen erstellt. Diese enthält neben allgemeinen Informationen wie Titel, verfassende Person und Quellenangabe auch die wichtigsten Erkenntnisse aus der Inhaltsanalyse und die Zuordnung der Quellen zu den jeweiligen Herstellenden und 9R-Strategien. Das vollständige Protokoll zur systematischen Literatursuche ist in Tabelle 7 ersichtlich.

Tabelle 7: Protokoll der Literatursuche

Unternehmen	ID	Treffer geprüft	Quellen gelesen	Quellen gewählt	Unternehmen	ID	Treffer geprüft	Quellen gelesen	Quellen gewählt
Volkswagen	VW1	100	23	4	Tesla	TE1	100	18	3
	VW2	100	15	2		TE2	100	20	1
Stellantis	ST1	100	21	3	BYD	BY1	100	21	4
	ST2	100	16	2		BY2	100	28	2
BMW	BM1	100	20	4	NIO	NI1	100	22	4
	BM2	100	25	1		NI2	100	22	4
Mercedes-Benz	MB1	100	16	3	Great Wall Motor	GW1	100	16	4
	MB2	100	18	3		GW2	100	20	2
Volvo	VO1	100	23	4	Dongfeng	DO1	100	18	1
	VO2	100	14	2		DO2	100	19	1
General Motors	GM1	100	11	3	SAIC	SA1	100	18	1
	GM2	100	9	0		SA2	100	16	3
Ford	FO1	100	22	4	BAIC	BA1	100	20	2
	FO2	100	18	1		BA2	100	16	2
Hyundai	HY1	100	16	3	CATL	CA1	100	24	3
	HY2	100	14	4		CA2	100	18	3
Renault	RE1	100	31	7	LG	LG1	100	15	2
	RE2	100	16	2		LG2	100	19	4
Toyota	TO1	100	19	3	Panasonic	PA1	100	18	3
	TO2	100	18	3		PA2	100	21	1
					Summe		4000	754	108

4.3.3 Datenanalyse

Die Auswertung der Ergebnisse aus der Literaturrecherche erfolgt zeitgleich zur Datenerhebung und wird in drei Schritten durchgeführt:

- Zuerst werden die einzelnen Fälle separat analysiert. Dabei werden zentrale Erkenntnisse und Themen aus der Inhaltsanalyse der Quellen extrahiert. Die zu den jeweiligen Unternehmen gefundenen Inhalte werden dann den zirkulären Strategien nach Potting et al. (2017) zugeordnet. Dies führt zur Erstellung einer zusammenfassenden Strategiematrix, die eine übergreifende Matrix der CE-

Strategien aller untersuchten Unternehmen darstellt (Baxter & Jack, 2008; Phaal et al., 2004; Yin, 2018).

- Anschließend werden die gesammelten Fälle miteinander verglichen, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Strategien der Unternehmen zu identifizieren. Dies dient dazu, Muster zu erkennen, die zur Beantwortung der Forschungsfragen und Prüfung der Hypothesen beitragen (Baxter & Jack, 2008; Yin, 2018).
- Im letzten Schritt werden die gefundenen und aufbereiteten Informationen mit den Hypothesen verglichen und bewertet, ob die Erkenntnisse aus der Literatur diese befürworten oder widersprechen. Es werden auch Erklärungen für Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung entwickelt und abschließende Schlussfolgerungen gezogen (Baxter & Jack, 2008; Yin, 2018).

4.4 Kriterien zur Qualitätsbewertung

Um die Qualität der Forschung zu gewährleisten, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Die Forschungsfragen sind klar formuliert und die aufgestellten Hypothesen sind verständlich
- Das Forschungsdesign ist für die Beantwortung der Forschungsfrage geeignet
- Die Auswahl der Strategie und der Stichprobengröße für die Fallstudie erfolgt zielgerichtet
- Die Daten werden systematisch erhoben und organisiert
- Die Daten werden korrekt analysiert (Baxter & Jack, 2008)

Um eine qualitativ hochwertige Forschung durchzuführen, wird darauf geachtet, dass Validität und Reliabilität während des gesamten Forschungsprozesses aufrechterhalten werden. Dabei werden vier Faktoren berücksichtigt:

- **Konstruktvalidität:** Diese beschreibt die Vermeidung von subjektiven Urteilen zur Bestätigung der Meinung des Forschenden. Dieser Einfluss wird durch die Triangulation von Datenquellen, d.h. die Einbeziehung unterschiedlicher Quellen, vermieden. Dadurch erfolgt eine Beantwortung der Forschungsfragen aus mehreren Perspektiven.
- **Interne Validität:** Diese behandelt, inwieweit die beobachteten Zusammenhänge zwischen Fällen und Erkenntnissen glaubwürdig sind und inwiefern diese extern beeinflusst werden. Zur Sicherstellung der internen Validität ist die Einhaltung einer klaren Beweiskette und der Ausschluss alternativer Erklärungen von Bedeutung.
- **Externe Validität:** Um diese zu gewährleisten, müssen die Ergebnisse der Studie über die untersuchten Fälle hinaus verallgemeinerbar sein. Konkret wird

durch die Beantwortung von Wie- und Warum-Fragen geprüft, ob auf der Grundlage der Einzelfälle allgemeine Aussagen für den gesamten Sektor getroffen werden können.

- Reliabilität: Dieser Faktor kann mit der Rückverfolgbarkeit der Forschung gleichgesetzt werden, d.h. ob die Datenerhebung und -auswertung nachvollziehbar durchgeführt wird und eine Wiederholung der Prozesse zu den gleichen Ergebnissen und Schlussfolgerungen führt. Dies wird erreicht, indem die Forschungsschritte akkurat protokolliert und die Ergebnisse klar dokumentiert werden (Yin, 2018).

5 Ergebnisse der MCS

Dieses Kapitel bietet eine umfangreiche Zusammenfassung der Ergebnisse der systematischen Recherche grauer Literatur. Zuerst wird die Berücksichtigung von CE-Ansätzen in den Unternehmensstrategien erläutert. Anschließend folgt ein Überblick zu den CE-Ansätzen bei Traktionsbatterien und eine detaillierte Betrachtung der Aktivitätencluster Produktion und Nutzung, Verlängerung der Lebensdauer und Nutzung der Batteriematerialien. Dabei werden vorrangig Ergebnisse vorgestellt, welche die Umsetzung der CE-Strategien in Europa betrachten. In Ausnahmefällen werden jedoch auch besonders innovative und für den Sektor relevante Lösungen außerhalb Europas vorgestellt.

5.1 Allgemeine Umsetzung von CE-Ansätzen

Die Mehrzahl der untersuchten Unternehmen verfolgt bereits CE-Ansätze entlang des automobilen Lebenszyklus und hat diese fest in ihren Konzernstrategien verankert. Diese Ansätze beziehen sich vorrangig auf den Einsatz kreislauffähiger Materialien und das Schließen von Materialkreisläufen im Allgemeinen. Eine zusammenfassende Übersicht zur CE in den Unternehmensstrategien ist in Tabelle 8 ersichtlich.

Vier Unternehmen (BM, MB, TO, ST) setzen in ihren Strategien auf einen 4R-Ansatz zur Berücksichtigung von CE-Aspekten, es herrscht jedoch kein einheitlicher Konsens zur Definition und jedes Unternehmen besitzt eine eigene Interpretation dieses 4R-Ansatzes. Volkswagen verfolgt zwar ebenso einen 4R-Ansatz, deklariert diesen aber nicht als solchen, sondern definiert in der übergreifenden Konzernstrategie vier Handlungsstränge zur Umsetzung von Aspekten der CE (Volkswagen, 2022b).

Renault und Stellantis verfolgen ambitionierte Vorhaben mit der Gründung von Tochterunternehmen, welche sich rein mit den Geschäftsmöglichkeiten durch Anwendung von CE-fördernden Aktivitäten beschäftigen. Renault baut derzeit mit der Re-Factory ein Zentrum für CE im französischen Flins auf und widmet sich dort in vier Abteilungen der Aufbereitung sowie Reparatur von Fahrzeugen, der Erforschung neuer Einsatzmöglichkeiten für EVBs, dem effizienten Ressourcenmanagement und der Weiterentwicklung industriellen Knowhows (Renault, 2022a). Darüber hinaus ist eine weitere Re-Factory in Sevilla geplant. Zusätzlich gründete der Konzern im Jahr 2022 mit The Future is Neutral ein Tochterunternehmen, welches umfassende Lösungen zur Verwendung von Autos als Rohstoffquelle für alle Handelnden der Branche erarbeitet (Hampel, 2022a). Stellantis plant ebenso den Aufbau eines eigenen C2C-Geschäftsbereiches mit einem geplanten Umsatz von zwei Milliarden Euro bis 2030. Umgesetzt wird dies im ersten regionalen Hub in Mirafiori in Italien und in weiteren geplanten regionalen CE-Zentren bzw. durch die Schaffung lokaler Kreisläufe zur Effizienzsteigerung und Einsparung rarer Ressourcen (Stellantis, 2022).

Volvo und General Motors publizieren zwar, dass die CE zentraler Teil der zukünftigen Konzernentwicklung sei, veröffentlichen aber keine detaillierten Pläne diesbezüglich (Ecomento, 2021b; General Motors, 2022).

Die CE-Vorhaben der genannten Konzerne schließen in mehreren Teilbereichen auch die Handhabung von Traktionsbatterien mit ein. Drei der betrachteten Konzerne (CA, HY, LG) fokussieren sich darüber hinaus in ihren veröffentlichten Strategien verstärkt auf den nachhaltigen Umgang mit EVBs.

Haupttreiber dieser Entwicklungen ist das Erreichen der vollständigen CO₂- bzw. Klimaneutralität der Unternehmen im Zeitraum zwischen 2035 und 2045 (CA, GM, GE, HY, ST, TE, VO, VW). Einzige Ausnahme hierbei stellt Renault, mit dem Vorhaben einer negativen CO₂-Bilanz bis zum Jahr 2030, dar (Renault, 2022a).

Tabelle 8: Allgemeine Umsetzung von CE-Ansätzen in den Konzernstrategien

Unternehmen	ID	CE-Ansätze in Konzernstrategie	Quellen
BMW	BM	Allgemeiner 4R-Ansatz mit Rethink, Reduce, Reuse, Recycle	(BMW, 2021)
CATL	CA	CE in Vision und Mission des Unternehmens verankert; Schließen der Kreisläufe bei EVBs; Produktion, Anwendung, kaskadierende Nutzung und Recycling von Batterien	(CATL, 2022a, 2023)
General Motors	GM	CE wichtiger Bestandteil der zukünftigen Strategie von GM	(General Motors, 2022)
Hyundai	HY	Aufbau eines umweltfreundlichen Batterie-Ökosystems entlang des gesamten Lebenszyklus; Fokus auf volle Nutzung der Batterie-Kapazität von der Produktion bis zum Recycling	(Hyundai, 2020)
LG Chem	LG	Aufbau eines Closed-Loop-Systems für nicht-wiederverwendbare Batterien und Produktionsabfälle	(LG Chem, 2022)
Mercedes-Benz	MB	allgemeiner 4R-Ansatz mit Reuse, Remanufacture, Repurpose, Recycle; zirkuläres Design, Werterhaltung und Schließen der Rohstoffkreisläufe als Kernthemen	(Mercedes-Benz, 2022, 2023)
Renault	RE	CE umfassend in Unternehmensstrategie etabliert; Renault will führendes Unternehmen hinsichtlich CE bei Fahrzeugen in Europa werden	(Hampel, 2022a; Renault, 2022a)
Stellantis	ST	CE wichtiger Teil der Unternehmensstrategie bis 2030; allgemeiner 4R-Ansatz mit Remanufacture, Repair, Reuse, Recycle	(Rematec, 2023; Stellantis, 2022)
Toyota	TO	Allgemeiner 4R-Ansatz mit Reduce, Reuse, Recycle, Recover	(Toyota, 2022)
Volkswagen	VW	Einsatz kreislauffähiger Materialien; Rückführung von Materialien in den Kreislauf; Wieder und Weiterverwendung kreislauffähiger Materialien; BMs zur Vereinfachung der Rückgewinnung von Rohstoffen	(Volkswagen, 2022b)
Volvo Cars	VO	Arbeit nach den Prinzipien der CE geplant	(Ecomento, 2021b)

5.2 Umsetzung von CE-Ansätzen bei Traktionsbatterien

Die Analyse der Umsetzung von Strategien der CE bei Traktionsbatterien ergibt, dass sich die untersuchten Unternehmen vorrangig mit möglichen Ansätzen, die sich mit der Produktions- und Nutzungsphase oder mit der Wiederverwendung in nicht-automotive Anwendungen bzw. dem Recycling der Traktionsbatterien beschäftigen, befassen.

Die Untersuchungen zeigen, dass 14 Konzerne Aktivitäten erarbeiten oder implementieren, welche die bisherige Produktions- und Nutzungsweise von Traktionsbatterien hinterfragen und durch innovative Konzepte die Kreislauffähigkeit von EVBs fördern (R1). Ergänzend dazu beschäftigen sich 15 der untersuchten Unternehmen mit der Reduktion des Material- und Energiebedarfs für ihre Traktionsbatterien während der Herstellungs- und Nutzungsphase (R2).

Bei den Ansätzen zur Verlängerung der Lebensdauer stellt das Repurposing (R7) die am häufigsten umgesetzte Strategie dar. 14 der untersuchten Unternehmen veröffentlichten Informationen zu Projekten in denen ausgediente Traktionsbatterien für anderweitige Zwecke wiederverwendet werden. Die höherwertigen CE-Ansätze zur Lebensdauererlängerung (R3, R4, R5, R6) werden hingegen jeweils von weniger als der Hälfte der Unternehmen verfolgt.

Im Gegenzug dazu zeigt die Analyse, dass sich beinahe alle untersuchten Unternehmen mit dem Recycling (R8) von Traktionsbatterien beschäftigen. Die detaillierten Ergebnisse der Analyse zu den jeweiligen Aktivitätsclustern sind in den folgenden Unterkapiteln angeführt. Tabelle 9 zeigt eine Zusammenstellung, welche CE-Aktivitäten von den jeweiligen Unternehmen verfolgt werden. Zur Vermeidung und Substitution (R0) und zur thermischen Rückgewinnung (R9) von Traktionsbatterien konnten keine Aktivitäten ermittelt werden.

Tabelle 9: Strategiematrix zu CE-Aktivitäten bei Traktionsbatterien

Unternehmen	ID	Nutzung/Herstellung		Verlängerung des Lebenszyklus					Material
		R1 Rethink	R2 Reduce	R3 Reuse	R4 Repair	R5 Refurb	R6 Reman	R7 Repurp	R8 Recycle
BAIC	BA	x*	x	x*	-	-	-	x*	x*
BMW	BM	x	-	-	-	-	-	x	x
BYD	BY	x	x	-	-	-	-	x*	x*
CATL	CA	x	x	-	x	-	-	x	x
Dongfeng	DO	x*	-	-	-	-	-	-	-
Ford	FO	-	x	-	x	x	x*	-	x
General Motors	GM	x	x	-	-	-	x*	x*	x*
Great Wall Motor	GW	-	x	-	-	-	-	-	x
Hyundai	HY	x	-	-	-	-	x	x	x
LG Chem	LG	-	x	-	-	x	-	x*	x
Mercedes-Benz	MB	-	x	-	-	x	x	x	x
NIO	NI	x	x	-	-	-	-	-	x
Panasonic	PA	x	x	-	-	-	-	-	x*
Renault	RE	x	-	x	x	x	-	x	x
SAIC	SA	x*	-	-	-	-	-	x*	x*
Stellantis	ST	x	x	-	x	x	x	x	x
Tesla	TE	-	x	-	-	-	-	-	x
Toyota	TO	-	x	x	x	-	x	x*	x
Volkswagen	VW	x	x	-	x	x	x	x	x
Volvo Cars	VO	x	x	-	x	x	-	x	x

* nur außerhalb von Europa

- keine Informationen veröffentlicht / wird nicht verfolgt

5.3 Produktions- und Nutzungsphase

Die Analyse zeigt, dass alle betrachteten Unternehmen Aspekte der CE in den Lebensabschnitten von der Produktentwicklung bis zum Einsatz in der Erstanwendung berücksichtigen. Im Folgenden werden die Ergebnisse zu den CE-Ansätzen Rethink und Reduce erläutert.

5.3.1 Rethink (R1)

Unter dem Rethink-Ansatz werden nach Potting et al. (2017) sämtliche Aktivitäten der Unternehmen betrachtet, welche die Produktnutzung intensivieren. Diese umfassen Batterieleasing und -mietmodelle, Infrastrukturen und Technologien zum Batteriewechsel als Alternative zu Ladestationen und die V2G Einbindung von EVs als Energiespeicher in das Energieversorgungsnetz. Ergänzend dazu werden mit der Umsetzung von Standards und Designkriterien zwei Ansätze untersucht, welche die Zirkularität von Traktionsbatterien im Allgemeinen erhöhen und durch ihre Berücksichtigung die Anwendung anderer CE-Strategien fördern. Die Rethink-Strategien, welche von den Unternehmen verfolgt werden, sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Strategiematrix Rethink

Unternehmen	ID	Standardisierung	Designkriterien	Batterieleasing	Batteriewechsel	V2G	Quellen
BAIC	BA	-	-	-	x*	-	(Ibold & Yun, 2022)
BMW	BM	-	x	-	-	x	(BMW, 2023)
BYD	BY	x	-	-	-	-	(APA-OTS, 2023)
CATL	CA	x	x	-	x*	-	(CATL, 2022b, 2023; Hampel, 2022b)
Dongfeng	DO	-	-	-	x*	-	(Ibold & Yun, 2022; Schaal, 2022a)
Ford	FO	-	-	-	-	-	
General Motors	GM	x	-	-	-	-	(General Motors, 2022)
Great Wall Motor	GW	-	-	-	-	-	
Hyundai	HY	x	x	x*	-	x	(Hyundai, 2020, 2021a, 2021b)
LG Chem	LG	-	-	-	-	-	
Mercedes-Benz	MB	-	-	-	-	-	
NIO	NI	-	-	x	x	-	(Doll, 2022; Manthey, 2023; NIO, 2023a, 2023b)
Panasonic	PA	x	-	-	-	-	(Neef, 2023)
Renault	RE	-	x	x	-	x	(Mobilize, 2022; Renault, 2020a, 2022a; Werwitzke, 2020)
SAIC	SA	x*	-	-	x*	-	(Hampel, 2022b; Neißendorfer, 2022)
Stellantis	ST	-	x	-	-	x	(Rematec, 2023; Stellantis, 2021a)
Tesla	TE	-	-	-	-	-	
Toyota	TO	-	-	-	-	-	
Volkswagen	VW	x	-	-	-	x	(Volkswagen, 2021b)
Volvo Cars	VO	-	x	-	-	x	(Randall, 2021)

* nur außerhalb von Europa

- keine Informationen veröffentlicht / wird nicht verfolgt

Standardisierung

Zwar existieren zurzeit noch keine branchenweiten Standards zur Vereinheitlichung von Geometrie, Chemie oder Integration von Batteriezellen oder -packs in EVs, jedoch verfolgen einige Unternehmen bereits konzerninterne Standardisierungsstrategien, um die Variantenvielfalt bei Traktionsbatterien zu reduzieren.

Dabei entwickeln die Unternehmen ergänzend zu ihren skalierbaren EV-Plattformen Batterielösungen, welche für eine Vielzahl von Modellen und Fahrzeugsegmenten eingesetzt werden können. Volkswagen standardisiert mit der Einheitszelle die Batteriedimensionen für den Modulare E-Antriebs-Baukasten und möchte mit dieser zukünftig 80 Prozent der Fahrzeuge ausstatten (Volkswagen, 2021b). Vergleichbare Ansätze mit standardisierten Batteriepacks und modularen Plattformen werden auch von anderen Herstellenden (HY, GM, SA, CA) verfolgt.

Die ersten Ansätze zur weitläufigeren Standardisierung von Zelldimensionen lassen sich bei Rundzellen erkennen. Panasonic vereinheitlicht den Durchmesser der Batteriezellen. Die Höhe ist in definierten Abstufungen variabel, wobei die 4680 Rundzelle als neuester Standard gilt. Die Verwendung dieser Zelle wird von mehreren untersuchten OEMs angedacht (BM, GM, NI, TE) (Neef, 2023).

Designkriterien zur Förderung der Zirkularität

Wie die wissenschaftliche Literatur zeigt, gilt die Berücksichtigung von Demontage, Reparierbarkeit und Nutzung für weitere Lebenszyklen beim Batteriedesign als wichtige Voraussetzung zur Förderung der Kreislauffähigkeit von Traktionsbatterien. Sechs der analysierten Unternehmen verfolgen Bestrebungen in diese Richtung (BM, CA, HY, RE, ST, VO), Details zu den Vorhaben werden aber kaum öffentlich kommuniziert.

BMW und CATL beschäftigen sich mit der Umsetzung von reparatur- und demontagefreundlichen Batteriedesigns (BMW, 2021; CATL, 2023). Renault und Hyundai berücksichtigen bei der Entwicklung der Traktionsbatterien bereits mögliche weitere Lebenszyklen (Hyundai, 2020; Renault, 2022a). Stellantis gibt ebenfalls an, sich auf Designkriterien zur Erhöhung der Zirkularität der Traktionsbatterien zu fokussieren (Rematec, 2023) und Volvo entwickelt die Batterien grundsätzlich für eine Nutzungsdauer von 15 Jahren (Randall, 2021).

Batterieleasing und Batteriemiete

Obwohl BaaS-Modelle aufgrund ihrer hohen Rücklaufquote im Allgemeinen als CE-fördernd gelten, verfolgte lediglich Renault als einziges europäisches Unternehmen dieses BM in der EU (Renault, 2020a). Renault hat dieses Serviceangebot aber im Jahr 2020 aufgrund sinkender Rentabilität größtenteils eingestellt (Werwitzke, 2020).

NIO ist derzeit das einzige Unternehmen am europäischen Markt, das Fahrzeuge mit BaaS-Modellen anbietet und diese auch priorisiert. Dabei können die jährliche Laufleistung der Fahrzeuge und die Laufzeit des Abonnements individuell gewählt werden (NIO, 2023b). Darüber hinaus sind Batterieleasing und -mietmodelle für Hyundai fester Bestandteil der Unternehmensstrategie, bietet jedoch diese Services nicht in Europa an (Hyundai, 2020, 2021a).

Batteriewechseltechnologie

Batteriewechsel-Stationen stellen eine Alternativlösung zum konventionellen Laden der Traktionsbatterie dar. Bislang ist NIO europaweit der einzige Anbieter, der mit seinen NIO Power Swap Stationen die Infrastruktur für diese innovative Technologie aufbaut. Bis zum Ende des Jahres 2023 plant NIO 120 dieser Stationen in Europa zu errichten. Dazu kooperiert das Unternehmen mit Konzernen aus dem Energiesektor wie Shell, EnBW Energie Baden-Württemberg und Mer. Weltweit plant NIO 4000 Stationen bis 2025 zu betreiben (Manthey, 2023; NIO, 2023a).

Der Batteriewechsel erfolgt in drei bis fünf Minuten, anschließend wird die Batterie langsam und zeitlich planbar auf einen Ladungsstand von 90 Prozent geladen. Zusätzlich werden bei jedem Wechsel Zustand und Funktionsfähigkeit der Batterie geprüft. Je nach Bedarfsfall können dabei Batterien unterschiedlicher Kapazitäten gewählt werden. Darüber hinaus ermöglicht dieses System einen einfachen Wechsel zu neueren Batterietechnologien in bestehenden Fahrzeugen. Die neueste Generation dieser Batteriewechsel-Stationen kann als virtuelles Kraftwerk betrieben werden. Dabei dienen bis zu 21 eingelagerte Traktionsbatterien als Energiespeicher, um im Smart Grid zur Frequenzregulierung und Lastspitzenverschiebung beizutragen (Doll, 2022; Manthey, 2023; NIO, 2023a).

Ein vergleichbares Konzept verfolgt CATL mit dem Batterietauschsystem Evogo, derzeit jedoch nur in China. Dieses basiert auf CATLs modularen Batterieblock Choco-SEB, einem massenproduzierbaren Batteriepack welcher speziell für Anwendungen zur gemeinsamen Nutzung von EVBs entwickelt wurde. Das System ist laut CATL mit 80 Prozent der derzeitigen und allen bis 2025 eingeführten BEV-Plattformen kompatibel. Pro Fahrzeug können je nach Nutzungsanforderungen bis zu drei Batterieblöcke integriert werden, wobei ein Block eine Reichweite von etwa 200 Kilometern ermöglicht und so zur Reduzierung unnötig hoher Batteriekapazitäten beiträgt. Der Wechsel der Batterieblöcke erfolgt vergleichbar zu NIO in speziellen Tauschstationen, wobei der Tausch eines Blocks in etwa einer Minute erfolgt (CATL, 2022b).

In China entwickeln sich Batteriewechsel-Stationen als konkurrenzfähige Alternative zu Schnellladestationen, vor allem für Fahrzeuge im Dauereinsatz wie Taxis oder Fahrzeuge von Ride-Hailing Dienstleistern. Die Analyse zeigt, dass drei der vier

traditionellen chinesischen OEMs (DO, SA, BA) bereits Batteriewechsel-Stationen in China betreiben und beabsichtigen, diese Infrastruktur weiter auszubauen. Grundsätzlich gehen Batteriewechselsysteme immer mit BaaS-Modellen einher und fördern so die Standardisierung und den Rücklauf von Traktionsbatterien (Ibold & Yun, 2022).

V2G Integration

Die Möglichkeit EVs als Energiespeicher in das Energienetz einzubinden, wird von sechs der untersuchten OEMs (VW, ST, BM, VO, RE, HY) für die nächsten Generation der EVs beabsichtigt. Renault erforscht derzeit die V2G Einbindung von Fahrzeugen mit drei Projekten. Auf der portugiesischen Insel Porto Santo und auf der französischen Insel Belle-Ile-en-Mer erforscht Renault zusammen mit The Mobility House die Umsetzung von Smart Islands mit jeweils zwei Fahrzeugen des Typs ZOE. Zusätzlich testet Renault in Utrecht die Eingliederung von 150 Fahrzeugen des Typs ZOE in lokale Smart Grids (Renault, 2020b, 2022a).

5.3.2 Reduce (R2)

Diese Strategie beschreibt die Reduktion des Ressourceninputs und somit die Steigerung der Effizienz während der Produktions- und Nutzungsphase des Produkts (Potting et al., 2017). Die Studie der Unternehmen ergibt, dass sich die Handelnden des Sektors vorrangig mit Ansätzen beschäftigen, welchen die Herstellung von Traktionsbatterien ressourceneffizienter gestalten. Dabei können mit der Entwicklung innovativer Zellchemien und der C2P-Bauweise von Traktionsbatterien zwei verbreitete Konzepte ermittelt werden. Zusätzlich versorgen die Beteiligten des Sektors die Fertigungsstätten zunehmend mit Strom aus EE. Vergleichbare Ansätze für die Nutzungsphase wurden nicht gefunden. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Tabelle 11 gegeben.

Innovative Zellchemien

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass sich der Großteil der Unternehmen mit der Entwicklung fortschrittlicher und ressourcenschonender Zellchemien befasst und dies auch öffentlich kommuniziert. Die verbleibenden Unternehmen besitzen entweder keine eigene Produktion von Batteriezellen oder es konnten unter den gesammelten Informationen keine diesem Ansatz zugeordnet werden.

Die Entwicklung fortschrittlicher Zellchemien trägt dabei auf zwei Arten zur Reduktion des Ressourceninputs bei. Einerseits wird versucht, kritische Materialien wie Kobalt bestmöglich durch weniger kritische Alternativen zu substituieren. Dies zeigt sich vor allem in der zunehmenden Verbreitung von LFP-Chemien bzw. NMC-Chemien mit hohem Nickelanteil in der Kathode, wie der derzeit gängigen NMC811-Zusammensetzung. Andererseits führt der technologische Fortschritt zu stetig

steigenden Energiedichten, wodurch leistungsstärkere Batterien mit geringerem Materialbedarf realisiert werden können. Mittelfristiges Ziel ist hierbei die Einführung massentauglicher Festkörper-Batteriezellen.

Batteriezellen auf Basis einer LFP-Chemie werden von acht der analysierten Unternehmen entwickelt oder bereits angeboten (BY, CA, FO, GM, GW, TE, TO, VW). Volkswagen und Toyota setzen diese Zelltechnologie aufgrund seiner geringeren Kosten im Vergleich zu NMC- oder NCA-Zellen in Einstiegsmodellen ein (Toyota, 2023c; Volkswagen, 2021b). Tesla und GM sehen LFP-Chemien nur für den chinesischen Markt vor (General Motors, 2022; Naor, 2022; Odejide, 2021). BYD verbaut in der Blade Batterie zukünftig nur noch Zellen auf LFP-Basis, auch für den europäischen Markt (APA-OTS, 2023; BYD, 2023). Darüber hinaus verfolgen vier Herstellende (GW, MB, ST, TE) die Entwicklung weiterer kobaltfreier Alternativen. Stellantis setzt hierbei auf eine Eisen-Mangan-Kathode (Stellantis, 2021a), Great Wall Motors auf die NMX-Zelle mit hohem Nickel- und Mangananteil (Battery News, 2023).

Hochleistungsbatterien werden hauptsächlich durch NMC-Chemien mit hohem Nickel- oder Mangananteilen realisiert (CA, GM, GW, MB, PA, ST, TE, TO, VW). Ergänzend dazu kommunizieren mehrere Herstellende (CA, GW, ST, TO, VW) die Entwicklung von Solid-State-Batteriezellen mit Festkörperelektrolyt. Diese Technologie wird jedoch frühestens ab dem Jahr 2026 für den Einsatz in Serienfahrzeugen zur Verfügung stehen (Stellantis, 2021a).

In Ergänzung zu den beschriebenen allgemeinen Entwicklungstendenzen verfolgen einzelne Herstellende die Umsetzung von Sonderformen bei den eingesetzten Traktionsbatterien. NIO verbaut seit 2021 in Fahrzeugen unter anderem eine 75 kWh Hybridbatterie, welche aus NMC und LFP Zellen besteht und somit die Vorteile der beiden Technologien kombiniert (NIO, 2021). Toyota verfolgt aufgrund des geringeren Bedarfs kritischer Rohstoffe für HEVs weiterhin den Einsatz von NiMH-Batterien und entwickelt diese stetig weiter (Toyota, 2023a).

C2P Integration

Die modulare Integration der Batteriezellen in Traktionsbatteriepacks findet zunehmend Einzug bei Serienfahrzeugen. Diese Technologie ermöglicht die Reduktion der Bauteilanzahl und erhöht dadurch Energiedichte und Nutzungseffizienz des verfügbaren Bauraumvolumens. Von den in die Studie einbezogenen Unternehmen geben sechs an, diesen Ansatz bereits zu verfolgen oder beabsichtigen diesen zu entwickeln (BA, BY, CA, LG, NI, VO).

Zwar verbaute BAIC bereits 2019 als erstes Unternehmen weltweit ein C2P-Batteriesystem in einem Serienfahrzeug (Henßler, 2019), jedoch ist das weitverbreitetste dieser Systeme die Blade Batterie von BYD. Dieses besteht aus eng angeordneten prismatischen Zellen, die sich über die gesamte Breite des

Batteriepacks erstrecken und so auch zur Erhöhung der Steifigkeit der Fahrzeugplattform beitragen (BYD, 2023). Ein ähnliches Konzept mit extralangen Batteriezellen verfolgt auch LG mit der Modul Pack Integrated Plattform, verbaut darin aber Pouch-Zellen (Schaal, 2020).

Reduktion des Ressourcenverbrauchs bei Fertigungsprozessen

Mehrere Hersteller kommunizieren Fertigungsstätten von Batteriezellen und Fahrzeugen zukünftig mit Strom aus EE betreiben zu wollen (CA, FO, TE, VW, GM, HY, GW). Diese Entwicklung korreliert stark mit den Bestrebungen zur Klimaneutralität der Unternehmen und ist ein wichtiger Teilbereich zur Erreichung dieser Ziele. Auch die Reduktion des Materialbedarfs bei der Herstellung, etwa durch die Vermeidung von Abfällen, spielt eine treibende Rolle bei der Erhöhung der Zirkularität von Traktionsbatterien. Keiner der untersuchten Konzerne veröffentlichte diesbezüglich spezifische Informationen zur Batteriefertigung. Lediglich die von BMW veröffentlichte Strategie umfasst den Ansatz zur Minimierung des Materialbedarfs für Traktionsbatterien und zur priorisierten Nutzung von Sekundärmaterialien im Allgemeinen (BMW, 2021).

Tabelle 11: Strategiematrix Reduce

Unternehmen	ID	Zellchemien				C2P	Quellen
		LFP	Co-frei	High-Ni High-Mn	Solid State		
BAIC	BA	-	-	-	-	x	(Henßler, 2019)
BMW	BM	-	-	-	-	-	
BYD	BY	x	-	-	-	x	(APA-OTS, 2023; BYD, 2023)
CATL	CA	x	-	x	x	x	(CATL, 2022a, 2022b; Yan et al., 2023)
Dongfeng	DO	-	-	-	-	-	
Ford	FO	x	-	-	-	-	(Ford, 2022, 2023b)
General Motors	GM	x*	-	x	-	-	(General Motors, 2022; Holger, 2022)
Great Wall Motor	GW	x	x	x	x	-	(Battery News, 2023; GWM-ORA, 2023)
Hyundai	HY	-	-	-	-	-	
LG Chem	LG	-	-	-	-	x	(Schaal, 2020)
Mercedes-Benz	MB	-	x	x	-	-	(Mercedes-Benz, 2022)
NIO	NI	-	-	-	-	x	(NIO, 2021)
Panasonic	PA	-	-	x	-	-	(Neef, 2023)
Renault	RE	-	-	-	-	-	
SAIC	SA	-	-	-	-	-	
Stellantis	ST	-	x	x	x	-	(Stellantis, 2021a)
Tesla	TE	x*	x	x	-	-	(Naor, 2022; Odejide, 2021)
Toyota	TO	x	-	x	x	-	(Toyota, 2023a, 2023c)
Volkswagen	VW	x	-	x	x	-	(Volkswagen, 2021b, 2022a)
Volvo Cars	VO	-	-	-	-	x	(Werwitzke, 2021b)

* nur außerhalb von Europa

- keine Informationen veröffentlicht / wird nicht verfolgt

5.4 Verlängerung der Lebensdauer

Die Ergebnisse der Fallstudien zeigen, dass der Großteil der betrachteten Unternehmen CE-Ansätze zur Verlängerung der Lebensdauer (R3 bis R7) von Traktionsbatterien verfolgt. Lediglich fünf Unternehmen (DO, GW, NI, PA, TE) verfolgen keine der untersuchten Strategien bzw. veröffentlichten keine Informationen dazu. Im Folgenden wird die Umsetzung der CE-Ansätze des Clusters vorgestellt.

5.4.1 Reuse (R3)

Unter der Reuse-Strategie wird im Allgemeinen verstanden, Produkte nach ihrem ersten Lebenszyklus für den ursprünglich vorgesehenen Einsatzzweck wiederzuverwenden (Potting et al., 2017). Bei Traktionsbatterien wird dieser Ansatz entweder bei Rückläufern mit völlig unbeschädigter Batterie angewendet oder die Batterien werden vor der erneuten Nutzung repariert.

Dabei sind Toyota und Renault die einzigen Herstellenden, die nachweislich komplette Antriebsbatterien von EVs auch in Europa für automotive Zwecke wiederverwenden. Toyota verfolgt dabei klar definierte Abläufe, wie mit den NiMH- und Lithium-Ionen-Traktionsbatterien umgegangen wird. Optisch und technisch unbeschädigte Rückläufer von Toyota-Vertragswerkstätten werden von den jeweiligen Annahmestellen an das Toyota Parts Center Europe in Belgien gesendet und dort als Ersatzteile eingelagert. Bei Bedarf können diese dann wieder entnommen und in einem vergleichbaren EV erneut eingesetzt werden. Für Rückläufer von freien Werkstätten bietet Toyota diesen Service nicht, sondern lediglich das Recycling der Traktionsbatterien (Toyota, 2021a).

Renault stellt die Reparatur und Wiederaufbereitung in den Mittelpunkt des EVB-Lebenszyklus und lässt diese Services vom Tochterunternehmen Gaia durchführen. Gaia betreibt seit 2011 das Expert Battery Repair Center in Flins, und besitzt somit den Hauptsitz am Standort der Re-Factory des Konzerns. Dabei werden fehlerhafte oder beschädigte Leasingbatterien repariert und anschließend eingelagert, um damit das Aftersales-Netzwerk zu versorgen. Eignen sich die Rückläufer nicht für eine Reparatur, werden sie für die Zweitnutzung vorbereitet (Hampel, 2022a; Renault, 2020a, 2022b).

In China kooperieren mehrere Herstellende (BA, CA, GM, LG, NI, SA) mit dem Unternehmen GEM. Dieses ist einer der größten Verwerter von ausgedienten Traktionsbatterien des Landes mit eigenem Forschungszentrum zur kaskadierenden Nutzung von EVBs. Dabei werden neben dem Recycling auch die Anwendung von Reuse, Remanufacturing und Repurposing Strategien erforscht. Details zu diesen Aktivitäten oder eine Ausweitung auf Europa sind nicht bekannt (GEM, 2022).

Die Zusammenfassung der Reuse-Ansätze der Unternehmen ist in der folgenden Tabelle angeführt.

Tabelle 12: Umsetzung der Reuse-Strategie

Unternehmen	ID	Umsetzung	Quellen
Renault	RE	Versorgung des Aftersales-Netzwerk mit Rückläufern des Batterieleasings; auch Reparatur dieser EVBs durch Gaia	(Hampel, 2022a; Renault, 2020a, 2022b)
Toyota	TO	Versorgung des Aftersales-Netzwerk mit Rückläufern von Vertragswerkstätten; nur unbeschädigte EVBs werden wiederverwendet	(Toyota, 2021a)

5.4.2 Repair und Refurbish (R4 und R5)

Repair und Refurbish beschreiben das Reparieren und Instandhalten von defekten bzw. das Aufarbeiten von alten Produkten, sodass sie für ihren ursprünglich vorgesehenen Zweck wiederverwendet werden können (Potting et al., 2017). Da sich diese beiden Strategien bei EVBs stark überschneiden, werden sie gemeinsam betrachtet. Die Bandbreite der durchgeführten Tätigkeiten der untersuchten Unternehmen reicht dabei vom Austausch einzelner elektrischer Kontakte und Sicherungen bis zum Austausch einzelner Module (Albertsen et al., 2021).

Mehrere Herstellende (CA, RE, ST, VW, VO) betreiben bereits oder planen spezielle Batteriezentren, in denen neben der Wiederaufbereitung vor allem die Reparatur und Aufarbeitung von Antriebsbatterien im Vordergrund steht.

Bei Volkswagen übernehmen die Vertragswerkstätten die Erstdiagnose der Traktionsbatterie, auch durch Auslesen des BMS und bestimmen über deren weiteren Pfad. Im Falle von Reparaturen leitet die Vertragswerkstatt das Fahrzeug an ein Support Center weiter, wo die Batterien bis auf Zellebene getestet werden. Anschließend erfolgt ein Austausch kompletter Batteriemodule und die EVB geht an ihren ursprünglichen Besitzer zurück (Albertsen et al., 2021; Volkswagen, 2021a).

Neben dem von Gaia betriebenen Batteriereparaturzentrum für Leasingrückläufer betreibt Renault europaweit 20 weitere Niederlassungen zur Batteriereparatur. Diese Fachwerkstätten führen Diagnosen auf Modullevel durch und tauschen bis zu drei defekte Module aus, wobei laut Renault 99 Prozent der EVBs repariert werden. Aufgrund des zusätzlichen Batterieleasingangebots des Konzerns gehen reparierte Traktionsbatterien nicht zwangsweise an den ursprünglichen Besitzer zurück (Albertsen et al., 2021; Hampel, 2022a; Renault, 2022a).

Volvo betreibt derzeit zwei Batteriezentren zur Reparatur und Aufbereitung von Traktionsbatterien bzw. zu deren Vorbereitung für nachfolgende Recyclingprozesse. Dabei werden in den beiden Zentren zurzeit etwa 40 Batteriepacks pro Woche verarbeitet. Volvo plant weiters ähnliche Zentren in China und Nordamerika zu errichten (Ecomento, 2021b).

Eine Zusammenfassung aller Aktivitäten zu den Strategien R4 und R5 ist in der folgenden Tabelle 13 ersichtlich.

Tabelle 13: Umsetzung der Repair- und Refurbish-Strategie

Unternehmen	ID	Umsetzung	Quellen
CATL	CA	Aftersales Service und Reparatur defekter Batterien; keine detaillierten Informationen veröffentlicht	(CATL, 2023)
Ford	FO	Reparaturservice für EVBs; keine detaillierten Informationen veröffentlicht; Aufbereitung durch Spiers New Technologies	(Albertsen et al., 2021; Ford, 2023a)
LG Chem	LG	Aufarbeitung von EVBs; keine detaillierten Informationen veröffentlicht	(LG Chem, 2022)
Mercedes-Benz	MB	Aufarbeitung von EVBs; keine detaillierten Informationen veröffentlicht	(Albertsen et al., 2021)
Renault	RE	Reparatur von EVBs in Batteriezentrum in Flins (FR), europaweit 20 weitere Standorte zur Batteriereparatur; Diagnose auf Modullevel, Austausch von bis zu drei Modulen	(Albertsen et al., 2021; Hampel, 2022a; Renault, 2022a)
Stellantis	ST	E-Repair Center bei Opel in Rüsselsheim (DE); Aufbau von 21 Reparaturzentren weltweit geplant	(Stellantis, 2021b, 2022)
Toyota	TO	Bereitstellung von Best-Practices für Werkstätten zur Reparatur von EVBs	(Toyota, 2021a)
Volkswagen	VW	Reparatur von EVBs in Service Zentren; Diagnose auf Zellebene, Austausch auf Modulebene	(Albertsen et al., 2021; Volkswagen, 2021a)
Volvo	VO	Zwei Batteriezentren in Göteborg (SE), Reparatur und Aufbereitung; weitere in China und Nordamerika geplant	(Ecomento, 2021b)

5.4.3 Remanufacture (R6)

Unter Remanufacturing wird allgemein das Wiederaufbereiten von Produkten durch die Verwendung von Bauteilen ausrangierter Produkte verstanden (Potting et al., 2017). Im Kontext der Traktionsbatterien bedeutet dies, Batteriepacks am Ende ihres ersten Lebenszyklus durch den Austausch und die Neugruppierung von Modulen und Zellen für den erneuten Einsatz in automotiven Anwendungen vorzusehen, wobei die Bauteile dafür ebenfalls aus ausgedienten Batteriepacks entnommen werden.

Zwar beschäftigen sich bereits einige Herstellende mit diesem Zirkularitätskonzept (FO, GM, HY, MB, ST, TO, VW), konkrete Umsetzungspläne befinden sich aber derzeit größtenteils noch in der Entwicklungsphase. Nichtsdestotrotz zeigt die Analyse der Unternehmen, dass zurzeit verstärkt an der Anwendung der Remanufacturing-Strategie gearbeitet wird. Eine Übersicht dazu ist in Tabelle 14 gegeben.

Lediglich Mercedes und Stellantis führen laut eigenen Angaben derzeit bereits solche Wiederaufbereitungstätigkeiten für EVBs durch. Mercedes bietet für alle EVs wiederaufbereitete Batteriepacks an und betreibt dazu ein eigenes Aufbereitungswerk in Mannheim. In diesem findet der Großteil der Remanufacturing-Aktivitäten bei Traktionsbatterien des Konzerns statt (Mercedes-Benz, 2022).

Das Remanufacturing von Bauteilen ist ein zentrales Element der Konzernstrategie von Stellantis und wird auch für Traktionsbatterien verfolgt. Derzeit bietet der Konzern

über 12.000 wiederaufbereitete Ersatzteile von 40 Produktlinien an. In diesem Portfolio befinden sich auch EVBs, welche im Battery Expertise Center in Rüsselsheim wiederaufbereitet werden. Zukünftig sollen auch weitere CE-Hubs, wie jenes in Mirafiori, Remanufacturing-Tätigkeiten von Traktionsbatterien durchführen (Rematec, 2023; Stellantis, 2021b, 2022).

Tabelle 14: Umsetzung der Remanufacture-Strategie

Unternehmen	ID	Umsetzung	Quellen
Ford	FO	Kollaboration und Forschung zum Remanufacturing von EVBs mit Redwood Materials in Nordamerika; keine detaillierten Informationen veröffentlicht	(Redwood Materials, 2021)
General Motors	GM	Remanufacturing von EVBs wird über das Customer Care & Aftersalesprogramm abgewickelt; keine detaillierten Informationen veröffentlicht	(General Motors, 2022)
Hyundai	HY	Remanufacturing von EVBs durch Wiederverwendung ausgedienter Batterien bester Qualität in älteren EVs oder für Aftersales Markt geplant; Aufbau von Remanufacturing Bases entlang der globalen Supplychain	(H.-K. Kim, 2022)
Mercedes-Benz	MB	Remanufacturing von EVBs in Mannheim (DE); Wiederaufbereitete EVBs werden für alle EVs angeboten	(Mercedes-Benz, 2022)
Stellantis	ST	Remanufacturing von EVBs in Rüsselsheim (DE), Ausweitung auf andere CE-Hubs geplant; Wiederaufbereitete EVBs bereits im Ersatzteil-Portfolio	(Rematec, 2023; Stellantis, 2021b, 2022)
Toyota	TO	Remanufacturing von EVBs derzeit in Entwicklung; keine detaillierten Informationen veröffentlicht	(Toyota, 2021b)
Volkswagen	VW	Remanufacturing von EVBs derzeit in Entwicklung; keine detaillierten Informationen veröffentlicht	(Volkswagen, 2021d)

5.4.4 Repurpose (R7)

Beim Repurposing werden im Allgemeinen Produkte oder deren Bauteile nach ihrem ersten Lebenszyklus in neuen Produkten anderer Anwendungsbereiche und Funktionen wiederverwendet (Potting et al., 2017). Bei Traktionsbatterien bedeutet dies im Konkreten, dass Batteriepacks, -module und -zellen nicht mehr für automotiv Anwendungen, sondern in anderweitigen Produkten eingesetzt werden. Die Analyse der Unternehmen zeigt mit Energiespeichersystemen (ESS) für industrielle, private sowie mobile Anwendungen und den Einsatz in Fahrzeugen mit geringeren Anforderungen an das Batteriesystem vier aktuelle Handlungsfelder, in denen der Repurpose-Ansatz bereits umgesetzt oder dies in naher Zukunft beabsichtigt wird.

In der untersuchten Stichprobe ist Tesla das einzige Unternehmen, das mit der Tesla Power Wall zwar ESS für Haushaltsinstallationen mit neu produzierten Batteriezellen anbietet, aber erklärt, dass die Wiederverwendung von Traktionsbatterien nicht Teil der Unternehmensstrategie ist. Vielmehr setzt Tesla auf eine Kombination aus Maximierung des ersten Lebenszyklus und Recycling von EVBs (Odejide, 2021). Ergänzend dazu verfolgt Great Wall Motor zwar eine Zweitnutzungsstrategie für Traktionsbatterien, veröffentlichte dazu aber bisher keine detaillierten Informationen (Great Wall Motor, 2023).

Die zusammenfassende Übersicht zu den Aktivitäten der untersuchten Unternehmen ist in Tabelle 15 ersichtlich. Im Folgenden werden die fünf genannten Handlungsfelder detailliert betrachtet.

Tabelle 15: Strategiematrix Repurpose

Unternehmen	ID	Industrielle ESS	Private ESS	Mobile ESS	Fahrzeuge	Quellen
BAIC	BA	x*	-	-	x*	(GEM, 2022; Mercedes-Benz, 2019)
BMW	BM	x	-	x	x*	(BMW, 2020, 2022, 2023; Rosenberg et al., 2022; VDE, 2023)
BYD	BY	x*	-	-	-	(Ando & Kawakami, 2020; Decken, 2022)
CATL	CA	x	-	-	x	(CATL, 2023)
Dongfeng	DO	-	-	-	-	
Ford	FO	-	-	-	-	
General Motors	GM	x*	-	-	-	(General Motors, 2020)
Great Wall Motor	GW	-	-	-	-	(Great Wall Motor, 2023)
Hyundai	HY	x	-	-	-	(Hyundai, 2021a; H.-B. Kim, 2022; H.-K. Kim, 2022; UL Solutions, 2021)
LG Chem	LG	x*	-	-	-	(LG Chem, 2022)
Mercedes-Benz	MB	x	-	-	-	(Andritz, 2020; Mercedes-Benz, 2022; Randall, 2022; Rosenberg et al., 2022; Schaal, 2022b; VDE, 2023)
NIO	NI	-	-	-	-	
Panasonic	PA	-	-	-	-	
Renault	RE	x	x	x	x	(Albertsen et al., 2021; Ecomento, 2021a; Renault, 2020a, 2020b, 2022a, 2022b; VDE, 2023)
SAIC	SA	x*	-	-	-	(General Motors, 2020; Hampel, 2023)
Stellantis	ST	x	-	-	-	(Stellantis, 2021b)
Tesla	TE	-	-	-	-	(Odejide, 2021)
Toyota	TO	x*	x*	-	-	(Toyota, 2021b, 2022, 2023b)
Volkswagen	VW	x	x	x	x	(Albertsen et al., 2021; Rosenberg et al., 2022; VDE, 2023; Volkswagen, 2021d)
Volvo Cars	VO	x	-	-	-	(Ecomento, 2021b; Randall, 2021)

* nur außerhalb von Europa

- keine Informationen veröffentlicht / wird nicht verfolgt

ESS für Industrie und Energieinfrastruktur

Diese Gruppe umfasst sämtliche ESS, welche zur Unterstützung des Elektrizitätsnetzes und zur Speicherung von Energie aus erneuerbaren Quellen in industrieller Größenordnung eingesetzt werden. Der Großteil der analysierten Unternehmen realisierte bereits Pilotprojekte zur Zweitanwendung von Traktionsbatterien in ESS, wobei diese entweder Fertigungsstätten der

Fahrzeugherstellenden (BM, HY, MB, RE, SA) oder das öffentliche Stromnetz im Allgemeinen bei der Energieversorgung unterstützen (BM, MB, RE, VW, VO).

Zur Forschung, Entwicklung und Umsetzung solcher ESS-Projekte kollaborieren die Automobilunternehmen in der Regel mit Unternehmen aus dem Energiesektor (BM, BY, HY, MB, ST, TO, VW, VO). Die Hauptanwendungen sind dabei die Stabilisierung von Frequenzschwankungen und die Verteilung von Lastspitzen bei Anlagen, welche elektrischen Strom aus EE generieren, wie Photovoltaik-, Wind- und Wasserkraftwerke (BM, HY, MB, TO, VW, VO). Darüber hinaus werden solche Anlagen häufig mit Schnellladestationen für EVs kombiniert, um zur Entlastung des Energienetzes beizutragen (MB, ST, VO).

BMW und Mercedes-Benz betreiben Versuchsanlagen zu lebenden Energiespeichern in jeweils einem ihrer Werke. Dabei werden neu produzierte oder gebrauchte Batteriepacks in speziellen Containern für eine spätere Verwendung eingelagert und unterstützen währenddessen die Energieinfrastruktur (Rosenberg et al., 2022).

In der Regel ist es bei ESS nur möglich EVBs und Komponenten verwandter Baureihen zu kombinieren. Toyota entwickelt derzeit jedoch in Japan den weltweit größten ESS, der zum Einsatz bei EE-Kraftwerken vorgesehen ist. Dieser ermöglicht eine Nutzung von Batterien unterschiedlicher Kapazitäten und eine direkte Abgabe von Wechselstrom zur Vermeidung von Transformationsverlusten (Toyota, 2023b).

Tabelle 16 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse zur Umsetzung von industriellen ESS aus wiederverwendeten Traktionsbatterien.

Tabelle 16: Umsetzung der Repurpose-Strategie durch ESS für Industrie und Energieinfrastruktur

Unternehmen	ID	Umsetzung	Quellen
BAIC	BA	Forschung zu Repurposing von EVBs durch Tochterunternehmen Beijing Artcore Battery; Kooperation mit Mercedes-Benz Energy für Pilotprojekte in CN	(Mercedes-Benz, 2019)
BMW	BM	- 2,8 MWh und 2MW ESS für EE mit Bosch und Vattenfall in DE seit 2013 - Lebender Speicher mit ESS aus 500 gebrauchten und neuen EVBs in BMW Werk Leipzig mit Energy2Market; Modular erweiterbar auf 700 EVBs	(BMW, 2023; Rosenberg et al., 2022; VDE, 2023)
BYD	BY	Kollaboration mit Itochu und Pandpower zur Wiederverwendung von EVBs für stationäre ESS in CN, Ausweitung des Verkaufs auch auf westliche Staaten geplant	(Ando & Kawakami, 2020)
CATL	CA	Wiederverwendung von Traktionsbatterien in ESS; keine detaillierten Informationen veröffentlicht	(CATL, 2023)

Hyundai	HY	<ul style="list-style-type: none"> - Sammlung von ausgedienten EVBs von Vertragshändlern und Schrottplätzen weltweit durch Hyundai Glovis; F&E zur Wiederverwendung ganzer Batteriepacks in ESS durch Hyundai Movis; Etablierung eines neuen Geschäftsfeldes zu ESS aus gebrauchten Batterien für Netzstabilisierung und EE geplant - Partnerschaft mit finnischem Energieunternehmen Wartsilä zur Entwicklung von ESS-Technologien - Kollaboration von Kia mit Encore zur Wiederverwendung von EVBs in ESS in Gebäuden der Deutsche Bahn in DE; 72 kWh Prototyp zur Speicherung von Photovoltaik Energie bereits realisiert 	(Hyundai, 2021a; H.-B. Kim, 2022; H.-K. Kim, 2022)
Mercedes-Benz	MB	<ul style="list-style-type: none"> ESS Projekte des Konzerns durch Mercedes-Benz Energy AG; in DE bereits 95 MWh für Speicherung von EE, Peak Shaving und Backup Power umgesetzt: - 1,4 MWh in MB Factory 56 in Sindelfingen (DE) - 13 MWh und 13 MW lebender Speicher zur Netzstabilisierung und Leistungsausgleich in MB-Werk in DE mit The Mobility House, Getec und Remondis - Entwicklung von 200 kWh bis 10 MWh ESS für Peak Shaving, Anlaufunterstützung und virtuelle Schwungmasse bei Wasserkraftwerken mit Andritz - Laufende Kooperation mit Battery Loop in SE zur Lieferung von 40 MWh ausrangierter Batteriezellen, zur Fertigung von 2,8 MW ESS - 13 MWh und 12 MW ESS mit Remondis und Getec in DE seit 2016 - 21 MWh und 20 MW mit Getec in DE seit 2018 	(Andritz, 2020; Mercedes-Benz, 2022; Randall, 2022; Rosenberg et al., 2022; VDE, 2023)
Renault	RE	<ul style="list-style-type: none"> - Advanced Battery Storage: 60 MWh ESS mit Mobilize, The Mobility House und LomboxNet; größter stationärer ESS in Europa; bisher zwei dieser Speicher in Renault Werken Douai in FR, einer in ehemaligem Kohlekraftwerk in DE - SmartHubs Projekt: Installation von 360 kWh Containern in Industrie- und Geschäftsgebieten in UK seit 2019; Gesamtkapazität 14,5 MWh; auch Kombination mit Photovoltaik und Schnellladestationen vorgesehen - 132 kWh ESS mit Empresa Electricidade de Madeira, The Mobility House und ABB in PT seit 2018 - Teil des European Local Storage Advanced System (ELSA), Test von Energiespeichern in mehreren europäischen Städten - Verkauf von ausrangierten Batteriepacks und -modulen an Drittanbieter, Zusammenarbeit mit Connected Energy große ESS 	(Albertsen et al., 2021; Renault, 2020c, 2022; VDE, 2023)
Stellantis	ST	<ul style="list-style-type: none"> Kollaborationen mit Free2Move und Engie für B2B und B2C ESS und Ladestationen; keine detaillierten Informationen veröffentlicht 	(Stellantis, 2021b)
Volkswagen	VW	<ul style="list-style-type: none"> Mehrere laufende Forschungsprojekte zu ESS; Bisherige ESS Projekte des Konzerns in DE von Audi verfolgt: - 1 MW ESS mit EnBW seit 2022 - 1,9 MWh und 1,35 MW ESS mit The Mobility House und EUREF Campus seit 2019 - 4,5 MWh ESS für Pumpspeicherkraftwerk mit RWE seit 2021 - 1,9 MWh für Netzstabilisierung und Peak Shaving mit Belectric - Planung einer Anlage zur Netzstabilisierung bei EE mit EnBW seit 2020 	(Rosenberg et al., 2022; VDE, 2023)
Volvo Cars	VO	<ul style="list-style-type: none"> - ESS Pilotprojekt in SE zum Ausgleich von Lastspitzen bei Wasserkraftwerk mit Comsys und Fortum - ESS Pilotprojekt für solare Energiespeicherung zum Betrieb von Schnellladestationen in SE mit BatteryLoop 	(Ecomento, 2021b; Randall, 2021)

ESS für private Haushalte

In Europa geben lediglich Renault und Volkswagen öffentlich bekannt, sich mit der Entwicklung und Herstellung von Kleinspeichern für Haushaltsanwendungen aus ausgedienten Traktionsbatterien zu befassen. In der Regel werden diese Speicher dazu verwendet, Energie aus Photovoltaikanlagen für den Eigengebrauch einzuspeichern. Spezifischere Informationen oder konkrete Projekte werden über öffentlich zugängliche Quellen aber nicht kommuniziert. Tabelle 17 bietet hierbei eine Übersicht der Umsetzung dieser CE-Strategie bei den untersuchten Unternehmen.

Tabelle 17: Umsetzung der Repurpose-Strategie durch ESS für private Haushalte

Unternehmen	ID	Umsetzung	Quellen
Renault	RE	Zusammenarbeit mit Connected Energy für kleine ESS für Haushalte in Verbindung mit Photovoltaik; keine detaillierten Informationen veröffentlicht	(Albertsen et al., 2021; Renault, 2020b)
Volkswagen	VW	Laufende Forschungsprojekte zur Wiederverwendung von Traktionsbatterien in ESS für Haushalte; keine detaillierten Informationen veröffentlicht	(Volkswagen, 2021d)

Mobile ESS

Von den analysierten Unternehmen befassen sich drei mit der Entwicklung und Herstellung von mobilen Speicherlösungen aus ausrangierten Traktionsbatterien. Dabei können mit mobilen Generatoren für Veranstaltungen, Baustellen etc. (BM, RE) und mobilen Schnellladestationen für EVs (VW) zwei aktuelle Anwendungsgebiete identifiziert werden. Eine Übersicht der Aktivitäten zur Umsetzung dieser Konzepte ist in Tabelle 18 gegeben.

Tabelle 18: Umsetzung der Repurpose-Strategie durch mobile ESS

Unternehmen	ID	Umsetzung	Quellen
BMW	BM	Entwicklung mobiler ESS für Veranstaltungen mit Off Grid Energy in UK; erster Prototyp mit 40 kWh und 7,2 kW, Ausweitung auf 180 kWh und 50 kW geplant	(BMW, 2020)
Renault	RE	betterGen: Verkauf modular aufgebauter Generatoren und Akkupacks aus ausgedienten EVBs mit Mobilize und Betteries	(Ecomento, 2021a; Renault, 2022b)
Volkswagen	VW	Mobile Schnellladestationen mit bis zu 360 kWh und 100 kW mit E.ON bei Volkswagen Group Components in DE seit 2020; Ladung von bis zu vier Fahrzeugen gleichzeitig	(Rosenberg et al., 2022; VDE, 2023; Volkswagen, 2021d)

Während sich die Lösungen von BMW und Volkswagen derzeit noch in der Erprobungsphase befinden, bietet das Unternehmen Betteries bereits mobile Generatoren und Akkupacks zum Verkauf an, die auf ausgedienten Traktionsbatterien von Renault und dem Tochterunternehmen für Mobilitätsdienstleistungen des Konzerns Mobilize basieren. Die Produkte zielen vor allem auf den Einsatz bei Baustellen ab, die Speicherkapazität der Generatoren ist durch den modularen Aufbau individuell konfigurierbar (Renault, 2022b).

Fahrzeuganwendungen

Die Weiterverwendung der Module und Zellen von EVBs nach ihrem ersten Lebenszyklus in Fahrzeugen mit geringeren Anforderungen wird zwar bereits von vier der untersuchten Unternehmen umgesetzt, die Fahrzeuge werden dabei aber größtenteils für eigene Zwecke verwendet und somit derzeit kaum kommerzialisiert. Die am weitesten verbreitete Anwendung dieser Form der Repurpose-Strategie ist dabei das Ausstatten von Gabelstaplern oder Logistikfahrzeugen in Fertigungsstätten (CA, VW). Tabelle 19 zeigt eine Zusammenfassung der Aktivitäten zu dieser Strategie.

Darüber hinaus kollaboriert Renault mit zwei Startups, welche auch Fahrzeuge abseits des Werksverkehrs an den Fertigungsstandorten mit Komponenten aus den Traktionsbatterien von EVs ausstatten. Carwatt nutzt beispielsweise ausgemusterte Batterien des Konzerns, um Gepäckförderfahrzeuge und andere Flughafenfahrzeuge mit ICE auf Elektroantriebe umzurüsten (Renault, 2020a). Das Renault Mobilitätsunternehmen Mobilize kooperiert mit dem Startup Green Vision. Dieses ist spezialisiert auf die Integration von EVB-Komponenten in Fahrzeuge, wie etwa Elektroroller sowie E-Bikes, und fertigte unter anderem einen vollelektrischen Foodtruck, bei dem auch die Küche vollständig batterieelektrisch betrieben wird (Ecomento, 2021a).

Tabelle 19: Umsetzung der Repurpose-Strategie durch Fahrzeuganwendungen

Unternehmen	ID	Umsetzung	Quellen
CATL	CA	Wiederverwendung von Traktionsbatterien in Logistikfahrzeuge; keine detaillierten Informationen veröffentlicht	(CATL, 2023)
Renault	RE	Kollaboration mit Carwatt zur Umwandlung von ICEVs in EVs; hauptsächlich Flughafenfahrzeuge Kollaboration mit Green Vision zur Integration von EVBs in E-Bikes und Elektroroller	(Ecomento, 2021a; Renault, 2020a)
Volkswagen	VW	Laufende Forschungsprojekte zur Wiederverwendung von Traktionsbatterien in fahrerlosen Transportsystemen und Gabelstaplern	(Volkswagen, 2021d)

5.5 Nutzung der Batteriematerialien

Das Recycling ausgedienter Traktionsbatterien stellt den am weitesten verbreiteten CE-Ansatz unter den analysierten Unternehmen dar. Dies liegt einerseits an den regulatorischen Bedingungen wie der verpflichtenden kostenlosen Rücknahme von Traktionsbatterien durch das in den Verkehr bringende Unternehmen und zunehmend strengeren Recyclingquoten. Andererseits veranlassen wirtschaftliche Potenziale wie Kosteneinsparungen oder die Verringerung der Abhängigkeit von rohstoffliefernden Unternehmen durch die Wiederverwendung von Batteriematerialien sowie die Reduktion von Produktionsabfällen die Unternehmen zunehmend dazu, sich mit der Thematik des EVB-Recyclings zu befassen.

Dabei wird grundsätzlich zwischen offenen (Open Loop) und geschlossenen (Closed Loop) Recyclingkreisläufen unterschieden. Obwohl nicht alle untersuchten Unternehmen Informationen dazu veröffentlichen, verfolgen theoretisch alle aufgrund der europäischen Rechtslage zumindest einen Open Loop Ansatz. Aufgrund der geringen Rentabilität wird dies meist nicht von den Unternehmen selbst, sondern über Partnerunternehmen realisiert. Mehrere OEMs geben derzeit das Recycling von EVBs vollständig an lokale Recyclingunternehmen in den einzelnen europäischen Märkten ab, bieten aber kaum konkrete Angaben dazu (FO, GW, NI, TE).

Die meisten großen europäischen OEMs forschen derzeit intensiv an Recyclingtechnologien für Traktionsbatterien und fokussieren sich dabei verstärkt auf das hydrometallurgische Closed Loop Recycling (BM, MB, RE, ST, VW, VO). Dabei werden Produktionsabfälle und ausgediente EVBs so verwertet, dass die darin enthaltenen Materialien wieder direkt in die Zellproduktion zurückfließen. In der Regel handelt es sich dabei um die Rohstoffe Nickel, Mangan und Kobalt, wobei eine Ausweitung auf Lithium und Graphit ebenfalls absehbar ist. Zur Entwicklung und Umsetzung der notwendigen Technologien kollaborieren OEMs mit Partnerunternehmen, welche auf das Recycling oder die Herstellung von Batteriematerialien spezialisiert sind. Mehrere OEMs betreiben bereits Pilotanlagen oder planen den Bau von Recyclingfabriken in unmittelbarer Nähe zu ihren Fertigungsstätten (BM, MB, ST, TE, VW).

Ein ähnlicher Ansatz kann auch bei den großen Batteriezellenherstellenden beobachtet werden, die ebenfalls verstärkt auf die Entwicklung von Closed Loop Ansätzen zur effizienten Nutzung von Rohstoffen setzen und zu diesem Zweck Partnerschaften mit Recyclingunternehmen eingehen (CA, GW, LG). LG Energy Solutions beispielsweise plant, bis 2025 in allen Batterieproduktionsstätten weltweit ein solches geschlossenes Kreislaufsystem inklusive der Sammlung von ausgedienten Traktionsbatterien zu etablieren und setzt dieses bereits seit 2022 im Nanjing Werk in China ein (LG Chem, 2022). In Europa arbeitet LG mit dem Recyclingunternehmen EcoPro zusammen, um Abfälle zu verwerten, die bei der Produktion im Batteriewerk in Polen anfallen (Lee, 2020). CATL ist Hauptanteilseigner des weltweit zweitgrößten Batterierecyclingunternehmens Brunp und errichtet gemeinsam mit diesem Unternehmen mehrere Anlagen in China, nennt jedoch keine Pläne dieses Geschäftsfeld auch auf Europa auszuweiten (CATL, 2022a; Henßler, 2023; Werwitzke, 2021a).

Auch bei Automobilherstellenden im Allgemeinen ist das Recycling trotz des Aufbaus eigener Kompetenzen derzeit noch weitgehend an spezialisierte Unternehmen ausgelagert. Dazu werden die Batteriepacks in den Batteriezentren der Herstellenden aus den Fahrzeugen entnommen und für das weitere Recycling vorbereitet, bevor sie an das jeweilige Partnerunternehmen gesendet werden (RE, VO). Eines der

relevantesten Unternehmen für die Entwicklung von Recyclingtechnologien in Europa ist der belgische Konzern Umicore. Dieser unterstützt mehrere große OEMs bei der Erlangung notwendiger Kompetenzen zu geschlossenen Materialkreisläufen durch die Entwicklung fortschrittlicher Kathoden- bzw. Anodenmaterialien und Verwertungsprozesse oder übernimmt das Recycling von EVBs (ST, TO, VW, VO). Eine vollständige Zusammenfassung der Ergebnisse der Analyse zeigt Tabelle 20.

Tabelle 20: Umsetzung der Recycling-Strategie

Unternehmen	ID	Umsetzung	Quellen
BMW	BM	Pilotanlage in München (DE); Partnerschaft mit Duesenfeld zum Recycling, weitere geplant; Recycling und Versorgung von Sekundärmaterialien derzeit durch Northvolt	(BMW, 2023; Hydrovolt, 2022)
CATL	CA	Strategische Kooperationen mit Unternehmen in Europa zu Kathodenaktivmaterialien und Batterierecycling geplant; keine detaillierten Informationen veröffentlicht	(CATL, 2023)
Ford	FO	Recycling mit Partnerunternehmen; keine detaillierten Informationen veröffentlicht	(Ford, 2023a)
Great Wall Motor	GW	Recycling in EU durch Kollaboration mit lokalen Unternehmen, in DE mit Priorec Batterieunternehmen SVOLT entwickelt derzeit Recyclingkonzept in Kooperation mit BASF in EU, auch hydrometallurgische Closed Loop Recycling geplant	(Battery News, 2023; Great Wall Motor, 2023; GWM-ORA, 2023; PRIOREC, 2023; Schaal, 2021)
Hyundai	HY	Recycling von Batteriepacks, wenn keine Wiederverwendung möglich ist; keine detaillierten Informationen veröffentlicht	(H.-K. Kim, 2022)
LG Chem	LG	Aufbau eines Closed Loop Systems für ausgediente EVBs und Produktionsabfälle bis 2025 geplant; Strategische Kooperationen mit Recyclingunternehmen Kollaboration mit EcoPro zum Recycling von Produktionsabfällen in Fertigungsstätte in PL	(Lee, 2020; LG Chem, 2022; LG Energy Solutions, 2023)
Mercedes-Benz	MB	Recyclingfabrik in Kuppenheim (DE) für hydrometallurgisches Recycling in Bau, Kollaboration mit Primobius zur Technologieentwicklung, Kapazität anfangs 2500 t pro Jahr, Closed Loop Ansatz	(Mercedes-Benz, 2022, 2023)
NIO	NI	Recycling in EU durch Kollaboration mit lokalen Unternehmen	(NIO, 2022)
Renault	RE	Entnahme der Batteriepacks durch Gaia in Flins (FR), Auslagerung des Recyclings an Solvay und Veolia, Kollaboration für Open Loop Recycling seit 2011, für hydrometallurgisches Closed Loop Recycling seit 2021	(Ellen MacArthur Foundation, 2021; Hampel, 2022a)
Stellantis	ST	Pilotanlage von ACC in Nersac (FR); Partnerschaft mit Umicore für Recycling und Technologieentwicklung Anfangs Kollaboration mit akkreditieren Recyclingunternehmen, anschließend Partnerschaften in EU und Nordamerika; Ziel sind 500.000 EVBs pro Jahr in 2035	(Stellantis, 2021b; Taylor, 2022)
Tesla	TE	Closed Loop Recyclinganlagen bei allen Gigafactories geplant, Recycling in EU durch Kollaboration mit lokalen Unternehmen	(Odejide, 2021; Tesla, 2021)
Toyota	TO	In EU nur Open Loop Recycling: NiMH-Batterien durch SNAM in FR, LIBs durch Umicore und Reneos	(Toyota, 2021a, 2022)
Volkswagen	VW	Pilotanlage in Salzgitter (DE) für hydrometallurgisches Recycling seit 2020; Partnerschaft mit Umicore für Recycling und Technologieentwicklung, derzeitige Kapazität 3600 EVBs pro Jahr, weiterer Ausbau geplant, Closed Loop Ansatz; Recycling derzeit durch Northvolt Forschung zu optimierter Entladung und automatisierter Demontage	(Albertsen et al., 2021; Hydrovolt, 2022; Volkswagen, 2021c, 2022a, 2022b)
Volvo Cars	VO	Partnerschaft mit Umicore für hydrometallurgisches Recycling; Closed Loop Ansatz; Recycling derzeit durch Northvolt	(Ecomento, 2021b; Hydrovolt, 2022; Randall, 2021)

Ein zweites wichtiges Unternehmen des derzeitigen EVB-Recyclings in Europa ist Northvolt in Schweden. Dieses beliefert nicht nur mehrere große Automobilherstellende mit Batteriezellen für ihre EVs, sondern betreibt unter anderem mit dem JV Hydrovolt in Norwegen Europas größte Anlage zum hydrometallurgischen Recycling von EVBs, mit einer Kapazität von 12.000 Tonnen jährlich. Ziel von Northvolt ist eine europaweite Ausweitung der Recyclingkapazitäten und ein Rezyklatanteil in den Batteriezellen von 50 Prozent bis zum Jahr 2030 (Hydrovolt, 2022). Ähnlich zu Umicore nehmen ebenfalls einige der größten OEMs die Recyclingdienstleistungen von Northvolt in Anspruch (BM, VW, VO).

6 Diskussion und Ausblick

Diese Diplomarbeit bietet eine Darstellung des derzeitigen Fortschritts bei der Umsetzung von Strategien und Ansätzen der CE in Bezug auf Traktionsbatterien im Automobilsektor. Ziel ist es, einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Korrelation zwischen den beiden vorherrschenden Trends der Elektromobilität und dem Wandel der Industrie zur CE beizutragen.

Durch eine Literaturrecherche wird dazu der aktuelle Stand der Forschung zu CE-Ansätzen bei der Entwicklung, Herstellung, Nutzung und Verwertung von EVBs abgebildet und zusätzlich die Hindernisse, die sich für die Umsetzung dieser Ansätze ergeben erläutert. Auf Basis dieser Erkenntnisse und einer umfangreichen Recherche grauer Literatur wird eine MCS von 20 der relevantesten Unternehmen des Sektors durchgeführt, um deren Aktivitäten hinsichtlich der CE bei Traktionsbatterien zu identifizieren und so allgemeine Trends der Branche und Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede zwischen den Handelnden festzustellen. Die Ergebnisse dieser Forschung sind Strategiematrizen zu den zirkulären Strategien innerhalb der Produktionskette.

6.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Um das Ziel dieser Diplomarbeit zu erreichen, werden mit Hilfe einer systematischen Literaturrecherche und einer qualitativen Inhaltsanalyse sowohl von wissenschaftlicher und als auch grauer Literatur in Kombination mit einer MCS folgende Teilforschungsfragen und die übergreifende Forschungsfrage beantwortet.

- *Welche Herausforderungen ergeben sich für den Sektor hinsichtlich des Übergangs zur CE bei Traktionsbatterien?*

Die aktuelle wissenschaftliche Literatur nennt eine Vielzahl von Herausforderungen, die sich bei der Transition zur CE bei Traktionsbatterien ergeben, wobei sich fünf übergreifende Gruppen identifizieren lassen. Die Erste behandelt Hürden bei der Schaffung zirkulärer Wertschöpfungsketten. Diese erfordern neben einer Erhöhung der Transparenz und des Datenaustauschs entlang des gesamten Flusses vor allem den Aufbau einer ausgereiften Rückwärtslogistik. Die zweite Gruppe umfasst Herausforderungen bei der Schaffung und Umsetzung von CBMs, wobei hier vor allem Faktoren wie mangelnde Wirtschaftlichkeit und fehlende Planungssicherheit besonders relevant sind. Die dritte Gruppe bilden technologische Hürden. Dazu gehören etwa die Entwicklung automatisierter Prüf- und Demontageprozesse und das Fehlen effizienter Basistechnologien für Wiederverwendung und -verwertung von EVBs. Die vierte Gruppe stellen Herausforderungen des Produktdesigns dar. Diese erfordern vor allem den Fokus auf die Förderung der Zirkularität durch Ermöglichung

einer einfachen Demontage und der Einführung von Standards. Die letzte Gruppe bilden politische Barrieren, welche die Notwendigkeit geeigneter Regulatorien und Anreize zur Förderung der CE umfassen.

- *Aus welchen Gründen entscheiden sich OEMs bei Traktionsbatterien für ausgewählte Strategiepfade und wie weit ist deren Umsetzung?*

Die Gründe für die Entscheidung zur Umsetzung von CE-Strategien sind vielfältig und für die einzelnen Strategien unterschiedlich, lassen sich aber generell auf die Stärkung der ökologischen und ökonomischen Säulen der Nachhaltigkeit zurückführen.

Die ökologischen Entscheidungsgründe sind stark von externen Faktoren in Form von politischen Maßnahmen und Regulatorien geprägt, die sich auf die Umsetzung von Strategiepfeilen auswirken. Jedoch lassen sich, beispielsweise mit einem zunehmenden Verantwortungsbewusstsein der Unternehmen gegenüber der Umwelt, auch intrinsische Faktoren identifizieren.

Die ökonomische Nachhaltigkeit ist sowohl durch interne als auch externe Faktoren gekennzeichnet, die unternehmensstrategische Entscheidungen beeinflussen. Erstere beziehen sich etwa auf die Möglichkeit zu Kosteneinsparungen bei der Produktion von EVBs, die Erschließung neuer Geschäftsfelder und die Ausweitung von Aktivitäten entlang der Wertschöpfungskette. Somit stehen diese Faktoren in direktem Zusammenhang mit den Marktbedingungen sowie Bedürfnissen der Kundschaft und umfassen demnach auch Entscheidungen, die sowohl zur Erhöhung der Resistenz als auch der Resilienz des Unternehmens gegenüber äußeren Einflüssen beitragen.

Dies zeigt sich auch bei der Umsetzung der CE-Strategien, indem derzeit verstärkt Forschungsressourcen in Strategien geringer Zirkularität fließen. Zwar befinden sich konkrete Lösungen derzeit noch in der Entwicklungsphase, es existieren aber bereits einige vielversprechende Pilotprojekte. Im Vordergrund stehen hier vor allem fortschrittliche Recyclingtechnologien, da sich mit diesen auch Produktionsabfälle in den Kreislauf zurückführen lassen, aber auch die Wiederverwendung von EVBs in stationären ESS wird zunehmend untersucht. Obwohl Herstellende vereinzelt auch höherwertigere Strategien zur Verlängerung der Nutzungsdauer von Traktionsbatterien verfolgen, ist deren Umsetzung aber aufgrund der geringen Anzahl an Rückläufern derzeit noch sehr begrenzt.

- *Welche Kooperationen gehen die betrachteten Unternehmen ein, um ihre CE-Strategien umzusetzen?*

Zur Umsetzung von CE-Strategien kooperieren OEMs vor allem mit Unternehmen aus den Bereichen der Materialtechnologie, Batterietechnologie und Energie, aber auch mit spezialisierten Recyclingunternehmen. Letztere gelten auch als wichtige Partner für Batterieherstellende.

Vor allem beim Recycling von Traktionsbatterien sind starke Partnerschaften notwendig. Einerseits um die Verwertung derzeitiger und mittelfristig anfallender Rückläufer zu bewältigen, andererseits um notwendiges Wissen für die Entwicklung eigener Anlagen zu erlangen. Da sich OEMs vorrangig mit Fertigungs- und Montageprozessen und weniger mit der Aufbereitung von Rohstoffen und der Herstellung von technologischen Materialien beschäftigen, sind zur Implementierung von CE-Strategien zuverlässige Kooperationen mit großen Recycling- und Materialtechnologie-Unternehmen notwendig. Letztere unterstützen, gemeinsam mit Batterieherstellenden, die Automobilkonzerne bei der Entwicklung fortschrittlicher Batteriechemien, der Bereitstellung von Batteriezellen und Zellkomponenten, aber auch bei der Integration von Traktionsbatterien in das Fahrzeug.

Ein ähnliches Bild zeigt sich beim Repurposing von EVBs und dem Auf- und Ausbau von Infrastrukturmaßnahmen. Hier arbeiten die Unternehmen der Branche eng mit PartnerInnen aus dem Energiesektor zusammen, um von deren Knowhow zu profitieren. Bei der Wiederverwendung von Traktionsbatterien lassen sich aber auch Kooperationen mit Startups und kleineren Unternehmen identifizieren, insbesondere bei Anwendungszwecken abseits großer ESS.

- *Welche CE-Strategien verfolgen die Hauptagierenden des Automobilssektors im Hinblick auf Traktionsbatterien in Europa?*

Derzeit liegt ein starker Fokus auf Strategien am oberen und unteren Ende der 9R- bzw. 10R-Skala und somit vorrangig auf CE-Ansätze in der Produktionsphase und der Wiederverwendung bzw. -verwertung von Traktionsbatterien.

Die Reduce-Strategie wird derzeit aufgrund des Entwicklungsschwerpunkts der Unternehmen auf fortschrittliche Batteriechemien sehr intensiv verfolgt. In diesem Zusammenhang konzentrieren sich die Agierenden bei Traktionsbatterien auf die Reduktion des Ressourceninputs, die Substitution kritischer Materialien, die Erhöhung der Batteriekapazitäten und die Senkung der Kosten. Damit einher geht auch die zunehmende Fokussierung auf die Recycling-Strategie, um Ausschüsse während der Produktion durch wirtschaftliche Technologien effizient wiederverwenden zu können. Darüber hinaus führt das derzeitige Überdenken von Mobilität im Allgemeinen auch zu einem Engagement hinsichtlich alternativer Nutzungskonzepte.

Ansätze zur Verlängerung der Lebensdauer von Traktionsbatterien konzentrieren sich vor allem auf das Repurposing. Im Vordergrund stehen dabei Konzepte zur Nutzung der vorhandenen Restkapazität ausgedienter EVBs in Energiespeicherlösungen zur Unterstützung von Energienetzdienstleistungen. Höherwertige Strategien dieses Clusters werden zwar erforscht oder am Beispiel der Reparatur von Traktionsbatterien auch umgesetzt, konkrete Details zu diesen werden jedoch nur selten bekannt gegeben.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

Die ganzheitliche Betrachtung des Sektors auf Basis der ausgewählten Unternehmen zeigt ein grundlegendes Interesse an Strategien der CE, welches eng mit dem Bestreben der Unternehmen verbunden ist, das Ziel der Klimaneutralität zu verfolgen. Dadurch scheinen Maßnahmen zur Senkung der THG-Emissionen, wie z.B. die Einsparung von Ressourcen während der Herstellung, auf den ersten Blick vorrangig politischer Natur zu sein. Auch die EU-Batterierichtlinie greift diese Themengebiete auf, unter anderem mit der verpflichtenden Kennzeichnung des CO₂-Fußabdrucks, vorgegebenen Recyclingquoten und Rezyklatanteilen bestimmter Materialien sowie der verpflichtenden kostenlosen Rücknahme von EVBs.

Eine weitreichende Transformation zur CE birgt jedoch auch umfangreiche wirtschaftliche Vorteile für OEMs. So bieten sich durch die Umsetzung von CBMs Möglichkeiten zur Generierung zusätzlicher Anteile in der vor- und nachgelagerten Wertschöpfungskette, die den Verlust der Kernkompetenz ICE aufgrund des Wandels zur Elektromobilität kompensieren können. Im vorgelagerten Bereich umfassen diese die Wiederverwendung von Materialien, Komponenten und Batteriesystemen, durch die Kosten für wertvolle Rohstoffe eingespart werden können. Zusätzlich tragen diese Strategien dazu bei, die Abhängigkeit der Unternehmen von Zulieferbetrieben, vor allem aus der rohstoffverarbeitenden Industrie, zu verringern. Im nachgelagerten Bereich bieten die Schaffung eines Ersatzteilmarktes für Traktionsbatterien und das Angebot neuer Eigentumsmodelle wie Batterieleasing oder -miete zusätzliche Chancen zur Erweiterung des Geschäftsfeldes. Darüber hinaus können durch CBMs neue Märkte wie der Energiesektor erschlossen werden.

Vor allem europäische Unternehmen nutzen CE-Strategien auch für einen Imagewandel, der mit der allgemeinen Betrachtung von EVs als grüne Alternative zu ICEVs einhergeht und das Ziel verfolgt als nachhaltiges Unternehmen wahrgenommen zu werden. Dabei spielen vor allem CE-Ansätze, die über das Recycling hinausgehen, eine wichtige Rolle.

Hierbei sticht in erster Linie die Gruppe der traditionellen automotive OEMs hervor, da diese die weitreichendsten Aktivitäten zur Implementierung von CE-Strategien in ihre Geschäftstätigkeiten verfolgen. Dies gilt erneut insbesondere für europäische Herstellende, wobei Renault und Stellantis besonders hervorzuheben sind. Ersterer hat mit dem Bestreben, das führende Unternehmen in Bezug auf CE bei Fahrzeugen zu werden, diese bereits umfassend in die Unternehmensstrategie verankert. Zweiterer verfolgt vergleichbare Ansätze zwar erst seit kürzerer Zeit, betrachtet die CE aber ebenfalls als essentiellen Teil seiner Unternehmensstrategie. Diese Beispiele zeigen, dass der Wandel zur CE verstärkt von den Volumenherstellenden ausgeht, jedoch sind inzwischen auch deutsche Premiumherstellende in dieser Hinsicht sehr aktiv.

Die Gruppe der innovativen EV-Herstellenden zeigt sich lediglich hinsichtlich Technologien innovativ, die sich auf die Herstellungs- und Nutzungsphase von Traktionsbatterien beziehen. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf neuen Batterietechnologien und deren Integration in Fahrzeuge einschließlich Systemen zum Batteriewechsel. Strategien zur Verlängerung der Lebensdauer finden in diesem Cluster kaum Beachtung.

Ähnliches gilt für die chinesischen Herstellenden, die abgesehen vom Recycling praktisch keine CE-Strategien in Europa umsetzen. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass diese größtenteils erst seit Kurzem auf dem europäischen Markt vertreten sind und sich demzufolge vor allem auf dessen erfolgreiche Erschließung konzentrieren.

Auch die Gruppe der Batterieherstellenden fokussiert sich stark auf die Entwicklung fortschrittlicher Zellchemien und Recyclingtechnologien, vorrangig jedoch außerhalb von Europa.

Informationen zu den CE-Ansätzen einzelner Herstellende sind zwar im Allgemeinen verfügbar, jedoch ist deren Beschreibung häufig sehr oberflächlich. Vielfach kommunizieren Unternehmen zwar, die Einführung bestimmter Strategien zu beabsichtigen, Details zu diesen Plänen werden aber häufig nicht veröffentlicht. Grundsätzlich bieten hierbei vor allem europäische Unternehmen umfangreiche allgemeine Informationen zur Umsetzung von CE-Strategien, chinesische Herstellende sind hierbei um einiges zurückhaltender. Dies erschwert den einheitlichen Vergleich der Unternehmen im Rahmen der MCS.

Auffällig ist auch das Fehlen einer einheitlichen Definition und der inflationäre Gebrauch des Begriffes Reuse zur Beschreibung von Wiederverwendungsstrategien. Dabei wird häufig das Repurposing ebenfalls als Reuse bezeichnet, wodurch der Vergleich der CE-Strategien zusätzlich erschwert wird. Dieser Sachverhalt kann auch in der wissenschaftlichen Literatur beobachtet werden.

Grundsätzlich konzentrieren sich Unternehmen im Bereich der Traktionsbatterien vorrangig auf CE-Strategien geringer Zirkularität. Dabei steht derzeit vor allem das Recycling im Fokus der Herstellenden, da es die Rückführung der Ressourcen in den Materialkreislauf sowie deren erneute Verwendung in der Produktionsphase ermöglicht und diese nicht wie die höherwertigen Strategien zur Verlängerung der Lebensdauer zeitlich verschiebt. Aufgrund der europäischen Gesetzeslage verfolgen theoretisch alle untersuchten Unternehmen zumindest einen Open-Loop-Ansatz für das Recycling von EVBs. Dabei werden größtenteils pyrometallurgische Recyclingtechnologien eingesetzt, die bereits in großem Maßstab anwendbar sind. Diese Aktivitäten werden gewöhnlicherweise an Drittunternehmen ausgelagert. Hohe Reinheitsanforderungen an Batteriematerialien und teure Purifizierungsprozesse führen jedoch auch häufig zu einem Downcycling der Materialien.

Eine gegenteilige Entwicklung lässt sich beim Closed-Loop-Recycling beobachten. Dieses ist ein wichtiges Element der Unternehmen, um ihre Abhängigkeit von Rohstofflieferanten zu verringern. Deshalb konzentrieren sich Herstellende, die selbst Zellen produzieren oder dies zukünftig beabsichtigen, auf das Erlangen von Knowhow zu dieser Technologie. Aufgrund des geringeren Energieverbrauchs und geringerer Umweltbelastungen liegt der Schwerpunkt im Allgemeinen auf hydrometallurgischen Verfahren, wobei einige Herstellende bereits Pilotanlagen betreiben und beabsichtigen, diese in den nächsten Jahren auszubauen.

Die Umsetzung der Repurpose-Strategie wird derzeit hauptsächlich durch die Wiederverwendung ausgedienter Traktionsbatterien in industriellen ESS bestimmt. Diese tragen dabei entweder zum Lastspitzenausgleich und zur Frequenzregulierung des elektrischen Energienetzes oder zum Ausbau der Ladeinfrastruktur für EVs bei. Europäische Herstellende sind hierbei besonders aktiv in der Forschung und Entwicklung von Technologien in diesem Bereich beteiligt und verfolgen bereits zahlreiche Pilotprojekte in der EU. Alternative Anwendungen, wie die Wiederverwendung in kleineren ESS für Privathaushalte oder in Fahrzeugen mit geringeren Leistungsanforderungen, werden zwar zukünftig beabsichtigt, bilden derzeit aber noch die Ausnahme. Außereuropäische Herstellende sind bezüglich dieser Anwendungen zwar nicht weniger ambitioniert, verfolgen aber vergleichbare Projekte vorrangig in ihren Heimatmärkten.

Auch in der wissenschaftlichen Literatur werden Strategien zum Recycling- und Repurposing am häufigsten behandelt. Allerdings stehen derzeit noch nicht genügend Traktionsbatterien zur Verfügung, die ihren EoL erreicht haben, um diese Strategien großflächig umzusetzen. Da ein verstärkter Anstieg an Rückläufern erst um das Jahr 2030 erwartet wird, beschränken sich Unternehmen derzeit noch auf Pilotprojekte und befassen sich noch nicht intensiv mit der Wiederverwendung von EVBs.

Anders verhält es sich bei Strategien zur Produktion und Nutzung von Traktionsbatterien. Diese Themengebiete sind derzeit hochaktuell und werden mit umfangreichen Investitionen gefördert. Die Berücksichtigung der Handhabung am Ende des ersten Lebenszyklus ist jedoch bereits in den frühen Produktphasen notwendig. Standards und Designkriterien zur Förderung der Demontierbarkeit und Recyclingfähigkeit sind hierbei besonders relevant, jedoch beschäftigen sich nur wenige Herstellende mit diesen Ansätzen. Die Aktivitäten konzentrieren sich derzeit vor allem auf die Entwicklung neuer Batteriechemien und Integrationskonzepte. Dabei senkt beispielsweise der zunehmende Verzicht auf Kobalt in der Kathode zwar die Kosten für Traktionsbatterien, verringert jedoch auch die Rentabilität der Zweitnutzung und des Recyclings. Bei den Batteriekapazitäten ist ein kontraproduktiver Trend im Sinne der Nachhaltigkeit zu erkennen, da Herstellende zur Maximierung der Reichweite von EVs zu immer leistungsfähigeren und somit auch größeren

Batteriepacks tendieren. Dem können alternative Nutzungs- und Integrationskonzepte, wie z.B. Batteriewechselsysteme oder modulare Batteriepacks entgegenwirken. Im Vergleich zur Entwicklung fortschrittlicher Batteriechemien sind diese bis auf wenige Ausnahmen für die Unternehmen aber zweitrangig.

Die zirkulären Strategien Refuse (R0) und Recover (R9) nach Potting et. al (2017) sind für Traktionsbatterien sowohl in der Literatur als auch bei den Unternehmen de facto nicht existent. Für erstere liegt die Begründung darin, dass diese Strategie auf die Vermeidung des Produktes abzielt, dies aber mit den wirtschaftlichem Interesse der Unternehmen konkurriert, Produkte zu verkaufen. Darüber hinaus stellen BEVs per se eine radikale Innovation gegenüber ICEVs dar. Die thermische Verwertung ist aus wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Gründen nicht relevant.

6.3 Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen den aktuellen Stand der Umsetzung von CE-Strategien für Traktionsbatterien im Automobilsektor. Um diesen zu erlangen hat sich die MCS als probates Mittel erwiesen, da diese umfassende Einblicke in die jeweiligen Unternehmen ermöglicht, aus denen durch eine vergleichende Betrachtung wertvolle Schlussfolgerungen gezogen werden können. Es zeigt sich jedoch auch eine starke Abhängigkeit von der Quantität und Qualität der verfügbaren Informationen. Für die meisten untersuchten Unternehmen bietet die graue Literatur ausreichend Informationen für die Durchführung der MCS, jedoch liefert diese häufig wenig Aufschluss über detaillierte Aktivitäten. Darüber hinaus steht die Literaturrecherche über Suchmaschinen der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse entgegen, da Resultate vom geographischen Standort des Forschenden abhängen. Um diesen Effekt bestmöglich zu kompensieren, wurden vorrangig Publikationen berücksichtigt, die direkt von den Unternehmen selbst stammen.

Trotz Einbeziehung internationaler Unternehmen in die Stichprobe begrenzen sich die Ergebnisse der MCS räumlich vor allem auf die Umsetzung von CE-Strategien im europäischen Wirtschaftsraum. Zwar wurden im Zuge der Forschung auch Informationen zu Projekten und Aktivitäten außerhalb dieser Beschränkung einbezogen, jedoch werden in den Ergebnissen lediglich besonders innovative Ausnahmefälle mit potenziellem Einfluss auf die Entwicklung der CE in Europa detailliert analysiert. Zusätzlich konzentrieren sich die Ergebnisse der MCS primär auf Strategien zur Lebenszyklusverlängerung von EVBs, jene der Produktions- sowie Nutzungsphase sowie der stofflichen Verwertung wurden nur einbezogen, wenn sie die lebenszyklusverlängernden Strategien beeinflussen. Dabei wurden nicht einzelne Marken, sondern die übergreifenden Konzerne betrachtet. Der Fokus liegt hierbei auf Traktionsbatterien von PKW, jene anderer Fahrzeuge sind nicht Teil dieser Arbeit.

6.4 Nächste mögliche Schritte zur Weiterentwicklung

Die Umsetzung von CE-Strategien bei Traktionsbatterien wird zwar in der wissenschaftlichen Literatur bereits ausführlich behandelt, die führenden Beteiligten des EV-Automobilsektors stehen jedoch erst am Beginn diese umfassend zu verfolgen. Der Erfolg von Strategien zur Verlängerung der Lebensdauer ist dabei stark von vorausschauenden Designkriterien, ausgereiften Demontageprozessen und umsetzbaren CBMs abhängig. Eine detailliertere Untersuchung der Fortschritte bei der Berücksichtigung dieser Faktoren in führenden Unternehmen der Branche wäre ein möglicher Ansatz zur Vertiefung der Forschung dieser Arbeit. Da entsprechende Informationen kaum öffentlich kommuniziert werden, sollte dies in erster Linie auf der Grundlage von Interviews mit Branchenvertretenden erfolgen.

Im Zuge der Literaturrecherche konnten auch weitere verwandte Branchen und Wirtschaftsräume identifiziert werden, die sich ebenfalls zunehmend mit der CE bei Traktionsbatterien beschäftigen. Dazu gehören zum einen der Baumaschinensektor und in weiterer Folge der Sektor der schweren Nutzfahrzeuge, bei denen derzeit vor allem höherwertige Strategien zur Wiederverwendung und Instandhaltung von Traktionsbatterien entwickelt werden. Außerdem ergibt sich für den chinesischen PKW-Markt aufgrund des im Vergleich zu Europa früheren Wandels zur Elektromobilität und der zunehmend strengeren Umweltgesetzgebung eine vielversprechende Möglichkeit, eine Vorreiterrolle hinsichtlich der CE bei Traktionsbatterien einzunehmen. Eine eingehende Untersuchung wäre insbesondere auch dahingehend interessant, da Fortschritte in diesen Bereichen auch die Entwicklungen im europäischen EV-Sektor beeinflussen.

Zusammenfassend lässt sich zwar ein zunehmendes Engagement für CE-Strategien feststellen. Um das volle Potenzial dieser zu nutzen, ist aber aufgrund der Wechselwirkungen eine Kombination möglichst vieler Strategien unbedingt erforderlich. Die Handlungsempfehlung für Unternehmen, die sich mit Traktionsbatterien im Automobilsektor befassen, geht somit eindeutig in Richtung einer möglichst großflächigen Umsetzung von CE-Ansätzen. Da derzeit große Mengen an Ressourcen in die Entwicklung von Traktionsbatterien fließen, sollte die Berücksichtigung einer möglichst einfachen Reparatur und Demontage der EVBs in der Designphase höchste Priorität besitzen. Nur so können weitere und längere Kreisläufe wirtschaftlich realisiert werden. Dabei sollten die EVBs durch Reparatur, Refurbishing und Remanufacturing möglichst lange ihren vorgesehenen Anwendungszweck erfüllen, ehe sie für andere Zwecke wie Energiespeicher wiederverwendet werden. Das Recycling sollte erst nach mindestens einem zweiten Lebenszyklus, oder zur Wiederverwertung von Produktionsabfällen erfolgen und somit lediglich den Materialkreislauf schließen, wenn das Produkt keinen Nutzen mehr generiert.

7 Anhang

7.1 Herausforderungen für den Automobilsektor

Herausforderung	Herausforderungen aus der Literatur	Quelle
Berücksichtigung des Designs zur einfachen Demontage	Berücksichtigung des Design für Recycling	(Rajaeifar et al., 2022)
	Design für Wiederverwendung und Recycling	(Hua et al., 2020)
	Batterien werden nicht für Recycling hergestellt	(Rajaeifar et al., 2022)
	Berücksichtigung der einfachen Demontage von Packs und Modulen	(Albertsen et al., 2021)
	Mangelnde Berücksichtigung des Erstnutzungsendes beim Batteriedesign	(Sopha et al., 2022)
	Mangelnde Berücksichtigung des EoL beim Batteriedesign	(Sopha et al., 2022)
	Erschwerte Demontage durch geklebte oder verschweißte Verbindungen	(Gloeser-Chahoud et al., 2021a)
	EoL Behandlung in Batteriedesign wenig berücksichtigt	(Gloeser-Chahoud et al., 2021a)
	Erschwerte Demontage durch geklebte oder verschweißte Baugruppen	(Quijano-Ortiz & Seepersad, 2022)
	Erschwerte Demontage durch geklebte Verbindungen und nicht-modulare Komponenten	(Mossali et al., 2020) et al., 2020)
	Design von Batterien für eine einfache Demontage	(Alamerew & Brissaud, 2020)
	Förderung des Designs zur Demontage	(Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
	Neue EVB-Designs mit Blick auf Wiederverwendung/Recycling	(Malinauskaite et al., 2021)
	Fehlende Anreize der Herstellende für demontagegerechtes Design	(Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
Einfluss der Batteriekapazität auf Nachhaltigkeitsaspekte	Batterien niedriger Kapazität erreichen EoL mit hohem Alterungslevel	(Etxandi-Santolaya et al., 2023)
	Laufende Erhöhung der Batteriekapazität	(Etxandi-Santolaya et al., 2023)
	Trend zu größeren Batteriekapazitäten	(Gloeser-Chahoud et al., 2021a)
Fehlende Designstandards	fehlende Standards für Batterien	(Li et al., 2020)
	Fehlende Standardisierung von Batterien und Komponenten in der gesamten Lieferkette	(Gebhardt et al., 2022)
	Fehlende technische Standards, hinsichtlich Zellchemien und Geometrie	(Nurdiawati & Agrawal, 2022)
	Keine allgemeinen Standards für die Konstruktion von Batteriepacks, Modulen oder Zellen	(Rajaeifar et al., 2022)
	Fehlende Standards hinsichtlich Chemien und Geometrien für EV-Batterien	(Li et al., 2020)
	Fehlende einheitliche Designstandards	(Olsson et al., 2018)
	Fehlen von Standards auf Zell-, Modul- und Packebene	(Olsson et al., 2018)
	Fehlende Designstandards	(Sopha et al., 2022)
	Fehlende technische Standards	(Wrålsen et al., 2021)
	Erschwerte Demontage durch fehlende Batteriestandards	(Gloeser-Chahoud et al., 2021a)
	Fehlende Standardisierung großes Hindernis für automatisierte Demontage	(Quijano-Ortiz & Seepersad, 2022)
	Fehlen von Normen auf EU-Ebene	(Hill et al., 2019)
	Fehlende Batteriestandards erschweren Recycling	(Ahuja et al., 2020)
	Fehlende allgemeine Standards Konstruktion von Batteriepacks, Modulen oder Zellen	(Rajaeifar et al., 2022)
	Einführung von Standards und Designkriterien	(Albertsen et al., 2021)
	Entwicklung von Designstandards	(Sopha et al., 2022)
	Standardisierung des Batteriedesigns	(Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
	Standardisierung von Batteriekomponenten, Modulen und Zellen	(Alamerew & Brissaud, 2020)

	Unsicherheiten bezüglich zukünftiger Batteriechemien und Batteriedesigns	(Li et al., 2020)
	Design für Langlebigkeit, Reparatur, Wiederverwendung und Recycling	(Gebhardt et al., 2022)
Vielfalt und schnelle Weiterentwicklung von Zellchemien und Geometrien	Vielzahl an Zellchemien und Geometrien erschweren Remanufacturing im großen Stil	(Hua et al., 2020)
	Variabilität und die sich ständig weiterentwickelnden Batteriedesigns und -chemien	(Rajaeifar et al., 2022)
	Schnelle Entwicklung der Zellchemien	(Albertsen et al., 2021)
	Komplexe Zusammensetzung mit gefährlichen Materialien von Traktionsbatterien	(Gloeser-Chahoud et al., 2021a)
	Vielfalt an Batterietypen und Chemien	(Haram et al., 2021)
	Einfachere Geometrien und Rezepturen erforderlich	(Malinauskaite et al., 2021)
	Integration von Daten zur Optimierung des Batteriedesigns	(Schulz et al., 2021)
Verfügbarkeit von Daten zu Batteriehistorie und Batteriestatus	Fehlen ausreichender Leistungsdaten von ausgedienter Batterien	(Alamerew & Brissaud, 2020)
	Zugriff auf die Nutzungshistorie von Batterien erforderlich	(Alamerew & Brissaud, 2020)
	Mangel an Wissen über verbleibende Kapazität nach erstem Leben	(Olsson et al., 2018)
	Unzugängliche oder nicht standardisierte Informationen über die Nutzungshistorie und Batteriestatus	(Hill et al., 2019)
	Nichtverfügbarkeit von Daten über die erste Lebensdauer	(Haram et al., 2021)
	Vollständigkeit historischer Batteriedaten	(Hua et al., 2021)
	Zweitnutzung erfordert Information über Batteriehistorie	(Ahuja et al., 2020)
	Fehlende Datenverfügbarkeit und -zuverlässigkeit	(Gebhardt et al., 2022)
Transparenz und Rückverfolgbarkeit entlang der Wertschöpfungskette	Fehlende Transparenz und Rückverfolgbarkeit entlang der Wertschöpfungskette	(Gebhardt et al., 2022)
	Rückverfolgbarkeit von Informationen und der Datensicherheit während der gesamten Lebensdauer	(Hua et al., 2020)
	Rückverfolgung durch Datensammlung erforderlich	(Nurdiawati & Agrawal, 2022)
	Mangelndes Vertrauen in Drittparteien	(Gebhardt et al., 2022)
	Mangel an Rückverfolgbarkeit	(Hill et al., 2019)
	Verfügbarkeit und Bereitstellung geeigneter Informationen entlang der Lieferkette	(Agrawal et al., 2021)
	Rückverfolgbarkeit von Produkten, Materialien und Dienstleistungen	(Agrawal et al., 2021)
	Verpflichtende Weitergabe von Informationen erforderlich	(Ali et al., 2021)
Sammlung, Verwaltung und Austausch der anfallenden Datenmengen	Komplexe Verwaltung des Datenaustauschs	(Gebhardt et al., 2022)
	Menge an zu Verarbeitenden Daten entlang der Supplychain; Datensammlung und -verteilung	(Nurdiawati & Agrawal, 2022)
	Informationsaustausch und Standards für Informationsschnittstellen erforderlich	(Sopha et al., 2022)
	Fehlende Anreize für die Datensammlung	(Gebhardt et al., 2022)
	Digitaler Batteriepass fördert Zirkularität von Wertschöpfungsketten	(Berger et al., 2022)
	Einheitlichen Schnittstellen für Datensammlung und Datenaustausch zwischen Stakeholdern	(Gebhardt et al., 2022)
Datenschutz	Datenschutz bei Datensammlung	(Hua et al., 2020)
	Schutz intellektuellen Eigentums bei Standardisierung	(Nurdiawati & Agrawal, 2022)
	Gesetzliche Rahmenbedingungen zum Informationsaustausch notwendig	(Sopha et al., 2022)
Nutzung fortschrittlicher IT-Technologien	Nutzung digitaler Technologieinnovationen (Big Data, Blockchain, AI, IoT, Cloud Computing)	(Toorajipour et al., 2021)
	Nutzung fortschrittlicher Technologien wie Big Data, Blockchain und Cloud Computing	(Hua et al., 2020)
	Digitalisierung von Informationen	(Sopha et al., 2022)

	Cloud Computing und Internet of Things fördern automatisierte Demontage	(Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
	Sammlung von Batterieinformationen durch Cloud Computing zur Erhöhung des Automatisierungsgrades	(Hua et al., 2020)
	Fehlende Technologien für Datensammlung und Datenaustausch zwischen Stakeholdern	(Gebhardt et al., 2022)
Effiziente, akkurate und zerstörungsfreie Diagnose auf Pack-, Modul- und Zellebene	Zerstörungsfreie Zelltests für Remanufacturing und Repurposing erforderlich	(Hua et al., 2020)
	Effiziente Diagnose auf Zellebene	(Albertsen et al., 2021)
	Mangel an effizienter Diagnose auf Zellebene	(Reinhardt et al., 2019)
	Fehlende individuelle Beurteilung der Batteriealterung	(Etxandi-Santolaya et al., 2023)
	Schwierige Bestimmung des SOH und RUL	(Haram et al., 2021)
	Akkurate Bewertung des SOH und RUL notwendig	(Hua et al., 2020)
	Akkurate und effiziente Messung des SOH und RUL von Batterien	(Rajaeifar et al., 2022)
	Entwicklung von effizienten Diagnosemethoden	(Sopha et al., 2022)
Fehlende Teststandards	Fehlende standardisierte Testmethoden	(Albertsen et al., 2021)
	Fehlende standardisierte Test- und Diagnosemethoden	(Reinhardt et al., 2019)
Screening und Regruppierung	Schnelles automatisiertes Screening und Wiederausammenbau erforderlich	(Hu et al., 2022)
	Geeignete Screening- und Regruppierungstechnologie erforderlich	(Hua et al., 2020)
Bestimmung der Zweitnutzungsanwendung	Akkurate Identifikation der Zweitnutzungsanwendung	(Hua et al., 2020)
	Zweitnutzung erfordert angemessene Bewertung des Gesundheitszustands	(Ahuja et al., 2020)
	Unsicherheit bezüglich der Leistung von 2nd-Life Batterien und Zuweisung zu den Verwendungsoptionen	(Li et al., 2020)
Modellierung der Batterieeigenschaften	Akkurate Modellierung der Batteriealterung	(Hu et al., 2022)
	Gleichgewicht zwischen Genauigkeit und Berechnungsaufwand der Modellierung	(Hua et al., 2020)
	genauere Prognosemodelle erforderlich	(Martinez-Laserna et al., 2018)
Bedarf an Forschung und Entwicklung hinsichtlich Wiederverwendung und Verwertung	Wenige experimentelle Studien zu Reuse	(Ferrara et al., 2021)
	Weitere Erforschung der Langzeitperformance von 2nd Life Batterien erforderlich	(Martinez-Laserna et al., 2018)
	R&D Kollaborationen und Entwicklung multidisziplinärer Technologien	(Li et al., 2020)
	Wachsende Zahl an F&E und Pilotprojekten zu 2nd Life Applikationen	(Nurdiawati & Agrawal, 2022)
	Förderung von Investitionen und Innovationen durch neue Regulatorien	(Nurdiawati & Agrawal, 2022)
	Unterstützung von R&D Tätigkeiten für fortschrittliche Technologien erforderlich	(Ali et al., 2021)
Mangel an wirtschaftlichen und techno-ökonomisch machbaren CBMs	Fehlen techno-ökonomisch machbarer BMs	(Rajaeifar et al., 2022)
	Verfügbarkeit technoökonomischer BMs	(Hu et al., 2022)
	Wirtschaftliche Realisierbarkeit von Zweitnutzungsanwendungen	(Hua et al., 2020)
	Innovative BMs für Reuse, Remanufacturing und Repurpose erforderlich	(Alamerew & Brissaud, 2020)
	Entwicklung innovativer BMs	(Sopha et al., 2022)
	Entwicklung lebensbasierter BMs	(Toorajipour et al., 2021)
	Weitere Adaptierung von Sharing-BMs und Ausbau des öffentlichen Transports	(Nurdiawati & Agrawal, 2022)
	Entwicklung neuer Geschäftslösungen	(Olsson et al., 2018)
Mangelndes Interesse an der Umsetzung von CBMs seitens der Unternehmen	Fehlendes Interesse von Unternehmen an Zweitnutzungsmöglichkeiten	(Olsson et al., 2018)
	Mangelndes Engagement seitens OEMs	(Sopha et al., 2022)
	Förderung des Interesses von Stakeholdern an der Entwicklung von Wertschöpfungsketten	(Li et al., 2020)

Nicht erkennen des Wertschöpfungspotenzials der Beteiligten	Nicht erkennen des Potenzials von Zweitnutzungsmöglichkeiten	(Olsson et al., 2018)
	Bewusstseinsbildung der Beteiligten hinsichtlich Wertschöpfungspotenzial	(Toorajipour et al., 2021)
Kooperation der Beteiligten entlang der Wertschöpfungskette	Mangelnde Kooperation von Beteiligten entlang der Wertschöpfungskette	(Olsson et al., 2018)
	Mangelnde Kommunikation und Koordination	(Sopha et al., 2022)
	Schaffung von profitablen Lieferketten für alle Beteiligten	(Hua et al., 2020)
	Mangelnde Weitergabe von Informationen zu Verwertungsprozessen	(Sopha et al., 2022)
	Mehr Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Produzierenden, OEMs und Recyclingindustrie erforderlich	(Rajaeifar et al., 2022)
	Kooperationen von Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette	(Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
	Wissenstransfer und Wissensmanagement	(Albertsen et al., 2021)
	Umfassende Kooperation der Beteiligten in der Lieferkette	(Sopha et al., 2022)
	Entwicklung von starken Netzwerkbeziehungen zwischen den Beteiligten	(Reinhardt et al., 2019)
	Zusammenarbeit zwischen den Stakeholdern entlang der Wertschöpfungskette	(Li et al., 2020)
	Stärkere Integration der Automobilwirtschaft in Nachgelagerte Bereiche	(Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
	Wertschöpfungsnetzwerk: Vertikale Integration vs. Outsourcing	(Albertsen et al., 2021)
	Integration der OEMs entlang der zirkulären Wertschöpfungskette	(Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
	Geringes Vertrauen und Qualitätsbedenken bei Zweitnutzung	Geringes Vertrauen der Kundschaft bei wiederverwendeten Batterien
Qualitätsbedenken der Kundschaft		(Sopha et al., 2022)
Qualitätsbedenken der Nutzenden bei wiederaufbereiteten Batterien		(Huster et al., 2022)
Unsicherheiten bezüglich der Wettbewerbsfähigkeit von aufbereiteten Batterien	Unsicherheit bezüglich Wettbewerbsfähigkeit gegenüber neuen LIBs	(Sopha et al., 2022)
	Mögliche fehlende Wettbewerbsfähigkeit und Unsicherheit bezüglich Preisen von ausgedienten Batterien	(Hill et al., 2019)
	Starke Unsicherheiten bezüglich Profitabilität und Marktpotenzial	(Martinez-Laserna et al., 2018)
	Sinkende Preise für wiederverwendete und wiederaufbereitete Batterien	(Hua et al., 2020)
	Konkurrenzfähigkeit alter Batterien aufgrund fallender Preise und Arbeitskosten	(Rajaeifar et al., 2022)
	Konkurrenzfähigkeit von 2nd Use LIBs	(Wrålsen et al., 2021)
	Umweltvorteile stark abhängig von Lebensdauer und Alterung	(Martinez-Laserna et al., 2018)
	Preis für 2nd Life Batterien stark vom Restlebensdauer abhängig	(Martinez-Laserna et al., 2018)
Unsicherheiten bezüglich der Wertentwicklung von Batterien	Sinkende Preise von neuen LIBs	(Reinhardt et al., 2019)
	Unsicherheiten bezüglich Preis, Kosten und Wert von LIBs	(Albertsen et al., 2021)
	Geringer wirtschaftlicher Wert von ausgedienten Batterien	(Sopha et al., 2022)
	Preis und Verfügbarkeit für Rohmaterialien	(Albertsen et al., 2021)
	Senkung der Produktionskosten und Produktionszeit neuer Batterien	(Rajaeifar et al., 2022)
	Versorgungsrisiken, Verknappung und Preisvolatilität bei kritischen Materialien	(Rajaeifar et al., 2022)
	Fehlende Planungssicherheit der Rücklaufmengen	Geringe Rücklaufmengen von ausgedienten Batterien
Unsicherheit bezüglich Rücklaufmengen und Qualität		(Sopha et al., 2022)
Verfügbarkeit von ausgedienten Batterien		(Haram et al., 2021)

	Unsicherheiten bei den prognostizierten Anzahl an EV-Batterien im Umlauf	(Ahuja et al., 2020)
	Unsicherheiten bezüglich Mengen und Wirtschaftlichkeit des EoL EV-Managements	(Li et al., 2020)
Umweltauswirkungen und Energieverbrauch derzeitiger Recyclingtechnologien	Reduktion der Umweltauswirkungen und des Energieverbrauchs beim Recycling erforderlich	(Hua et al., 2020)
	Geringe ökologische Nachhaltigkeit derzeitiger Recyclingtechnologien	(Ferrara et al., 2021)
	Möglichkeit ökologischer Vorteile durch Recycling	(Hua et al., 2020)
Definition und Regulation von Zweitnutzungsoptionen	Fehlende Regulierung von Zweitnutzungsoptionen	(Alamerew & Brissaud, 2020)
	Mangel an wirksamen Maßnahmen und Unsicherheiten bezüglich des EoL EV-Batterie-Managements	(Li et al., 2020)
	Verantwortung und rechtliche Bedenken bei Remanufacturing	(Hua et al., 2020)
	Unsicherheiten wegen fehlende Definitionen und Standards für Reuse und Repurposing in Batterierichtlinie	(Nurdiawati & Agrawal, 2022)
	Haftungsfragen bei Fehlfunktionen in Zweitnutzungsanwendungen	(Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
	Zuweisung der Verantwortlichkeiten für das EoL EV-Batterie-Management unter den Beteiligten	(Li et al., 2020)
	Regulatorische Unsicherheiten bezüglich EPR und Produktdefinition bei Zweitnutzung	(Olsson et al., 2018)
	Rentabilität von Zweitnutzungsoptionen stark abhängig von lokalen Regulatorien	(Ferrara et al., 2021)
	Unklare Regulatorien zur Zweitnutzung	(Ahuja et al., 2020)
	Fehlende Definitionen für aufstrebende Märkte in Bezug auf Reuse und Repurpose	(Hill et al., 2019)
	Mangel an geeigneten Regulatorien allgemein	Fehlender umfassender regulatorischer Rahmen
Ineffiziente und unzureichende staatliche Maßnahmen		(Sopha et al., 2022)
Unklare Regulatorien		(Wrålsen et al., 2021)
Unklare Regulatorienlandschaft		(Reinhardt et al., 2019)
Rechtliche und regulatorische Unklarheiten		(Hill et al., 2019)
Fehlen von Normen und Richtlinien		(Haram et al., 2021)
Fehlende Regulation und Zertifizierung		(Hua et al., 2020)
Derzeitiger Rechtsrahmen ungeeignet für erwarteten Anstieg der EVBs		(Malinauskaite et al., 2021)
Zeitnahe politische Maßnahmen nach dem technologischen Fortschritt der Batterieverbrennung erforderlich		(Alamerew & Brissaud, 2020)
Entwicklung von geeigneten regulatorischen Maßnahmen und Richtlinien		(Nurdiawati & Agrawal, 2022)
Entwicklung geeigneter regulatorischer Maßnahmen und Richtlinien		(Albertsen et al., 2021)
Schaffung geeigneter Regulatorien und Fördermaßnahmen		(Hu et al., 2022)
Einheitliche globale Vorschriften		(Sopha et al., 2022)
Fehlende politische Anreize	(Sopha et al., 2022)	
Regulatorien zur Erhöhung der Transparenz	Erhöhung der Transparenz der Lieferkette durch neue Regulatorien	(Nurdiawati & Agrawal, 2022)
	Transparenz der Wechselwirkungen von CBM und Produkt	(Schulz et al., 2021)
Kosten und Regulatorien der Rückwärtslogistik (Transport, Lagerung, etc.)	Transportkosten und einheitliche Vorschriften	(Rajaeifar et al., 2022)
	Transport teuer und sehr reguliert	(Olsson et al., 2018)
	Transport und Logistik von EV-Batterien	(Nurdiawati & Agrawal, 2022)
	Hoher Anteil des Transports an den Verwertungskosten	(Slattery et al., 2021)
	Lagerung und Transport mit hohen Kosten verbunden	(Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
	Hohe Transportkosten	(Sopha et al., 2022)

	Fehlende Regulatorien und politische Maßnahmen bezüglich Sammlung und Transport	(Slattery et al., 2021)
Aufbau von geeigneten Rücknahme- und Sammelsystemen	Fehlendes an Rücknahme- und Sammelsystem	(Nurdiawati & Agrawal, 2022)
	Fehlen ausgereifte Rücknahmesysteme und Sammelnetzwerke	(Albertsen et al., 2021)
	Fehlende Investments in die Sammlungsinfrastruktur aufgrund geringer Mengen	(Olsson et al., 2018)
	Langsame Entwicklung der Infrastruktur für Rückwärtslogistik	(Sopha et al., 2022)
	Standortwahl für Sammlung, Aufbereitung und Verwertung zur Optimierung der Materialflüsse	(Rajaeifar et al., 2022)
	Mangel an kosteneffizienten Basistechnologien für Rückwärtslogistik (Transport, Sortierung und Testung)	(Li et al., 2020)
	Reverse-Supply-Chain-Systeme für die Rückgewinnung von EoL-Produkten	(Alamerew & Brissaud, 2020)
Sicherheitsaspekte bei Transport, Verwertung und Wiederverwendung von ausgedienten Batterien	Sicherheitsbedenken bei Transport und Verwertung ausgedienten Batterien	(Alamerew & Brissaud, 2020)
	Sicherheitsbedenken bei Lagerung, Transport und Nutzung	(Sopha et al., 2022)
	Sicherheitsbedenken bei der Handhabung mit ausgedienten Batterien	(Reinhardt et al., 2019)
	Gewährleistung der Sicherheit bei der Zweitnutzung	(Hua et al., 2020)
	Fehlende Sicherheitsstandards	(Sopha et al., 2022)
Hoher Anteil manueller Tätigkeiten bei Demontage und daraus folgende Notwendigkeit zur Automatisierung	Notwendigkeit an Automatisierung und fortschrittlichen Technologien für Demontage und Vorbehandlung	(Hua et al., 2020)
	Hoher Anteil an manuellen Tätigkeiten bei Demontage	(Hua et al., 2020)
	Notwendigkeit an Automatisierung und fortschrittlichen Technologien für Demontage und Vorbehandlung	(Hua et al., 2020)
	Kosten, Sicherheit und Zeit von Demontageprozessen	(Rajaeifar et al., 2022)
	Hoher Zeit und Kostenaufwand durch manuelle Demontage	(Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
	Sicherheitsrisiken durch manuelle Demontage	(Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
	Fehlende automatisierte Demontageprozesse	(Hill et al., 2019)
	Fehlende Automatisierung bei der Demontage	(Haram et al., 2021)
	Gesundheitsrisiko für Demontagepersonal	(Hua et al., 2020)
	Virtuelle Simulation der Demontage kann Automatisierungsgrad erhöhen	(Hua et al., 2020)
Unsicherheit bezüglich der Entwicklung von Wiederverwendungs- und Verwertungstechnologien	Unsicherheiten bezüglich zukünftiger Verwertungstechnologien	(Li et al., 2020)
	Unsicherheiten bezüglich der Verwertungstechnologien	(Albertsen et al., 2021)
	Entwicklung zukünftiger Recyclingtechnologien	(Wrålsen et al., 2021)
Wirtschaftlichkeit von Zweitnutzungsoptionen	Ungewisse Wirtschaftlichkeit von Zweitnutzungsoptionen	(Haram et al., 2021)
	Rentabilität von Zweitnutzungsoptionen stark abhängig von lokalen Stromkosten und Energiequellen	(Ferrara et al., 2021)
	Wirtschaftliche Tragfähigkeit und Marktpotenzial der 2nd-Life-Anwendung	(Rajaeifar et al., 2022)
	Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von Zweitnutzung durch automatisierte Demontage	(Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
Wirtschaftlichkeit des Recyclings	Verbesserung des Recyclingwirkungsgrades durch Standardisierung	(Rajaeifar et al., 2022)
	Möglichkeit wirtschaftlicher Vorteile durch Recycling	(Hua et al., 2020)
	Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von Recycling durch automatisierte Demontage	(Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
	Wirtschaftliche Anreize für Recycler	(Sopha et al., 2022)
	Reinheitsgrad der wiedergewonnenen Materialien	(Agrawal et al., 2021)

	Reduktion der Recyclingkosten durch Automatisierung	(Hill et al., 2019)
	Derzeit nur Recycling von Co und Ni wirtschaftlich effizient, Vernachlässigung von Li und Graphit	(Nurdiawati & Agrawal, 2022)
	Derzeit hauptsächlich Rückgewinnung von Co und Ni	(Gloeser-Chahoud et al., 2021a)
Fehlende effiziente und wirtschaftliche Basistechnologien für Wiederverwendung und Verwertung	Mangel an kosteneffizienten Basistechnologien für Materialrückgewinnung	(Li et al., 2020)
	Fehlende Technologie	(Wrålsen et al., 2021)
	Zu wenig Forschung hinsichtlich fortschrittlicher Recyclingmethoden	(Ferrara et al., 2021)
	Fehlen günstiger und effizienter Recyclingprozesse	(Rajaeifar et al., 2022)
	Kosteneffiziente Recyclingkonzepte	(Hua et al., 2020)
	Umweltfreundliche Recyclingkonzepte	(Hua et al., 2020)
	Fehlende flexible Recyclingprozesse um alte, aktuelle und zukünftige Zellchemien zu verarbeiten	(Rajaeifar et al., 2022)
	Recyclingtechnologien noch in Experimentierphase	(Ahuja et al., 2020)
	Hohe Wiederaufbereitungskosten und Verwertungskosten	(Sopha et al., 2022)
	Geringe Recyclingeffizienz	(Sopha et al., 2022)
	Hohe Wiederaufbereitungskosten	(Reinhardt et al., 2019)
	Geringe Wirtschaftlichkeit des derzeitigen Recyclings	(Ferrara et al., 2021)
	Wirtschaftliche Durchführbarkeit der Verwertungsmethoden	(Alamerew & Brissaud, 2020)
	Entwicklung fortschrittlicher Technologien für Recycling und Wiederaufbereitung	(Alamerew & Brissaud, 2020)
	Zellchemiespezifische Recyclingprozesse	(Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
Vollständige Nutzung von Altprodukten und dadurch Wandlung von Abfällen in Vermögenswerte	(Li et al., 2020)	
Geringe Anteile an Rezyklaten in den Batterien	Geringer Anteil an Recycelten Materialien	(Gebhardt et al., 2022)
	Mindestgehalt an recycelten Materialien	(Malinauskaite et al., 2021)
Niedrige Sammelraten	Geringe Sammelrate	(Ferrara et al., 2021)
	Niedrige Sammel- und Recyclingraten (50-60%)	(Hill et al., 2019)
Sinkende Recyclingprofitabilität aufgrund der Reduktion des Kobaltanteils	Zunehmender Verzicht auf Kobalt in der Zellchemie	(Rajaeifar et al., 2022)
	Sinkende Rentabilität des Recyclings durch Verminderung des Kobaltanteils	(Gloeser-Chahoud et al., 2021b)
	Vermeidung von Kobalt reduziert Wirtschaftlichkeit des Recyclings	(Hill et al., 2019)
Fehlende Prozessstandards	Planbarkeit und Standardisierung von Prozessen	(Schulz et al., 2021)
	Entwicklung von Prozessstandards	(Sopha et al., 2022)
Regulatorien und Anreize zur Entwicklung und Förderung von CBMs	Regulatorien zur Förderung von CBMs und Eigenengagement für das EoL Management	(Li et al., 2020)
	Gesetzliche Umweltverantwortung	(Sopha et al., 2022)
	Umweltgesetze und Standards	(Ali et al., 2021)
	Fehlende Anreizsysteme zur Entwicklung innovativer CBMs	(Nurdiawati & Agrawal, 2022)
	Finanzielle Anreize für Wiederverwendung und Recycling	(Ali et al., 2021)
Ökologisches Bewusstsein und Verhalten der Beteiligten	Ökologisches Bewusstsein und Verhalten der End-user	(Albertsen et al., 2021)
	Unternehmensstrategie und Unternehmenskultur: Nachhaltigkeitsambitionen, Geschäftsstrategie	(Albertsen et al., 2021)
	Nachhaltigkeitsambitionen von Unternehmen	(Schulz et al., 2021)
	Bewusstseinsbildung bezüglich Nachhaltigkeit bei Kundschaft und Unternehmen	(Sopha et al., 2022)
	Förderung des ökologischen Bewusstseins bei Endnutzenden	(Wrålsen et al., 2021)
	Geringes Nachhaltigkeitsbewusstsein der Kundschaft	(Sopha et al., 2022)

Verfügbarkeit und ökologische Faktoren der Ressourcen zur Batterieherstellung	Abhängigkeit von nicht-EU-Ländern bei der Herstellung von Zellen und Komponenten	(Hill et al., 2019)
	Ressourcenintensive Prozesse bei der Herstellung von Zellen	(Hill et al., 2019)
	Nutzung von Materialien aus verantwortungsvollen Quellen, Erklärung zum CO ₂ -Fußabdruck, und Batteriepass erforderlich	(Malinauskaite et al., 2021)
	Reduktion der THG-Emissionen und des Energieverbrauchs bei der Produktion	(Rajaeifar et al., 2022)
Markt für Gebrauchtbatterien erst in Entwicklung	Aktuell noch kein Markt für gebrauchte Batterien vorhanden	(Olsson et al., 2018)
	Markt für die Wiederverwendung der Energiespeicherkapazität	(Hill et al., 2019)
	Recyclingmarkt zur Gewinnung von Rohstoffen aus Batterieabfällen	(Hill et al., 2019)
	Neue Marktchancen für Zweitnutzungsoptionen hindern Rückgewinnung	(Alamerew & Brissaud, 2020)
	Markt für Wiederaufbereitung zu wenig entwickelt	(Sopha et al., 2022)
Hohe Kosten und Unsicherheiten bei Technologieinvestments	Geringe Investments in fortschrittliche Technologien aufgrund Unsicherheiten bei der Batterietechnologieentwicklung	(Olsson et al., 2018)
	Zögerliche Investments in groß angelegte automatisierte Prozesse aufgrund ungewisser technologischer Fortschritte	(Olsson et al., 2018)
	Risiko bei Investitionen aufgrund von Unsicherheiten	(Sopha et al., 2022)
	Hohe Investitionen erforderlich	(Wrålsen et al., 2021)

7.2 Konzeptmatrix

Quelle	Nutzung/Herstellung			Verlängerung des Lebenszyklus					Materialien	
	R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
	Refuse	Rethink	Reduce	Reuse	Repair	Refurb	Reman	Repurp	Recycle	Recover
(Ahuja et al., 2020)	-	x	-	x	-	-	x	x	x	-
(Alamerew & Brissaud, 2020)	-	-	-	x	-	-	x	-	x	-
(Albertsen et al., 2021)	-	x	-	-	x	x	x	x	x	-
(Ali et al., 2021)	-	-	x	x	-	-	-	-	x	-
(Baars et al., 2021)	-	-	x	x	-	-	-	-	x	-
(Berger et al., 2022)	-	-	x	-	-	-	-	-	x	-
(Bobba et al., 2018)	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-
(Cong et al., 2021)	-	-	-	-	-	x	-	-	x	-
(Ferrara et al., 2021)	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-
(Gebhardt et al., 2022)	-	-	-	x	-	-	-	-	x	-
(Gloeser-Chahoud et al., 2021a)	-	-	-	-	-	x	x	x	x	-
(Hua et al., 2020)	-	x	x	-	-	-	x	x	x	-

(Malinauskaite et al., 2021)	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-
(Moore et al., 2020)	-	-	-	-	-	X	-	X	X	-
(Nurdiawati & Agrawal, 2022)	-	-	X	X	-	-	-	X	X	-
(Obrecht et al., 2021)	-	-	-	X	-	-	X	-	-	-
(Olsson et al., 2018)	-	-	-	X	-	X	-	X	X	-
(Rajaeifar et al., 2022)	-	-	-	-	-	-	X	X	X	-
(Schulz et al., 2021)	-	-	X	X	-	-	X	-	X	-
(Slattery et al., 2021)	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-
(Sopha et al., 2022)	-	X	-	X	-	X	X	X	X	-
(Tao et al., 2021)	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-
(Wrålsen et al., 2021)	-	X	-	-	-	-	X	X	X	-
(Hill et al., 2019)	-	-	X	-	-	-	X	X	X	-
(Schulz-Mönninghoff et al., 2023)	-	-	X	X	-	-	-	X	X	-
(Agrawal et al., 2021)	-	-	X	X	-	-	X	-	X	-
(Vu et al., 2020)	-	-	-	X	-	-	X	X	-	-
(McCrossan & Shankaravelu, 2021)	-	-	-	X	-	X	-	-	X	-
(Toorajipour et al., 2022)	-	X	-	X	-	-	X	-	X	-
(Mossali et al., 2020)	-	-	-	X	-	-	X	-	X	-
(Kur dve et al., 2019)	-	-	-	X	X	-	X	-	X	-
(Gloeser-Chahoud et al., 2021b)	-	-	-	-	-	X	X	X	X	-
(Picatoste et al., 2022)	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
(Kastanaki & Giannis, 2023)	-	-	-	X	-	-	X	-	X	-
(Li et al., 2020)	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-
(Abdelbaky et al., 2021)	-	-	-	X	X	X	X	-	X	-
(Gu et al., 2018)	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-
(Hu et al., 2022)	-	-	-	X	-	-	-	X	X	-

(Martinez-Laserna et al., 2018)	-	-	-	X	-	X	-	X	-	-
(Schulz-Mönninghoff & Evans, 2023)	-	-	-	X	-	-	-	X	X	-
(Huster et al., 2022)	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-
(Geng et al., 2022)	-	-	-	X	-	-	-	X	-	-
(Philippot et al., 2022)	-	-	-	X	-	-	-	X	-	-
(Haram et al., 2021)	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-
(Reinhardt et al., 2019)	-	X	-	-	-	-	-	X	-	-
(Hua et al., 2021)	-	-	-	-	-	-	X	X	X	X
(Etxandi-Santolaya et al., 2023)	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-
(Quijano-Ortiz & Seepersad, 2022)	-	-	-	X	X	-	X	X	X	-
(Wang et al., 2020)	-	-	-	-	-	-	X	-	X	-
(Lin et al., 2023)	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
(Rosenberg et al., 2023)	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
(Leon & Miller, 2020)	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
(Blömeke et al., 2022)	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
(Kallitsis et al., 2022)	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
(Cusenza et al., 2019)	-	-	-	X	-	-	-	X	-	-

8 Literaturverzeichnis

- Abdelbaky, M., Peeters, J. R., & Dewulf, W. (2021). On the influence of second use, future battery technologies, and battery lifetime on the maximum recycled content of future electric vehicle batteries in Europe. *Waste Management*, *125*, 1-9.
- Agrawal, T. K., Angelis, J., Thakur, J. R., Wiktorsson, M., & Kalaiarasan, R. (2021). *Enabling circularity of electric vehicle batteries-the need for appropriate traceability*. Paper presented at the 2021 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD).
- Aguilar Esteva, L. C., Kasliwal, A., Kinzler, M. S., Kim, H. C., & Keoleian, G. A. (2021). Circular economy framework for automobiles: Closing energy and material loops. *Journal of Industrial Ecology*, *25*(4), 877-889.
- Ahuja, J., Dawson, L., & Lee, R. (2020). A circular economy for electric vehicle batteries: driving the change. *Journal of Property, Planning and Environmental Law*.
- Alamerew, Y. A., & Brissaud, D. (2020). Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy: A case study on electric vehicle batteries. *Journal of Cleaner Production*, *254*, 120025.
- Albertsen, L., Luth Richter, J., Peck, P., Dalhammar, C., & Plepys, A. (2021). Circular business models for electric vehicle lithium-ion batteries: An analysis of current practices of vehicle manufacturers and policies in the EU. *Resources, Conservation and Recycling*, *172*, 105658. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105658>
- Ali, H., Khan, H. A., & Pecht, M. G. (2021). Circular economy of Li Batteries: Technologies and trends. *Journal of Energy Storage*, *40*, 102690.
- Ando, K., & Kawakami, T. (2020). BYD's EV battery recycling goes global with Itochu. Abgerufen von <https://asia.nikkei.com/Business/Technology/BYD-s-EV-battery-recycling-goes-global-with-Itochu>, am 19.06.2023
- Andritz. (2020). ANDRITZ und Mercedes-Benz Energy unterzeichnen Kooperationsvereinbarung zum Einsatz großer Batterie-Energiespeichersysteme für Wasserkraftwerke. Abgerufen von <https://www.andritz.com/newsroom-de/hydro/2020-12-10-andritz-mbe-cooperation-group>, am 07.06.2023
- Andwari, A. M., Pesiridis, A., Rajoo, S., Martinez-Botas, R., & Esfahanian, V. (2017). A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *78*, 414-430.
- APA-OTS. (2023). BYD präsentiert DOLPHIN und SEAL. Abgerufen von https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20230412_OTSO086/byd-praesentiert-dolphin-und-seal-bild, am 19.06.2023
- Ayres, R. U. (1989). Industrial metabolism. *Technology and environment*, *1989*, 23-49.
- Baars, J., Domenech, T., Bleischwitz, R., Melin, H. E., & Heidrich, O. (2021). Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials. *Nature sustainability*, *4*(1), 71-79.
- Battery News. (2023). SVOLT-Fabriken werden zu den innovativsten in Europa gehören. Abgerufen von <https://battery-news.de/index.php/2023/01/06/interview-lemcke-svolt/>, am 21.06.2023
- Baxter, P., & Jack, S. (2008). Qualitative case study methodology: Study design and implementation for novice researchers. *The qualitative report*, *13*(4), 544-559.

- Bell, E., & Bryman, A. (2011). *Business research methods* (Third edition ed.): Oxford university press.
- Benyus, J. M. (1997). Biomimicry: Innovation inspired by nature. In: Morrow New York.
- Berger, K., Schöggel, J.-P., & Baumgartner, R. J. (2022). Digital battery passports to enable circular and sustainable value chains: Conceptualization and use cases. *Journal of Cleaner Production*, 353, 131492.
- Bertram, M., & Bongard, S. (2014). *Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr* (Vol. 1): Springer Vieweg Wiesbaden.
- Bibra, E. M., Connelly, E., Gorner, M., Lowans, C., Paoli, L., Tattini, J., & Teter, J. (2021). Global EV Outlook 2021: Accelerating Ambitions Despite the Pandemic.
- Blömeke, S., Scheller, C., Cerdas, F., Thies, C., Hachenberger, R., Gonter, M., . . . Spengler, T. S. (2022). Material and energy flow analysis for environmental and economic impact assessment of industrial recycling routes for lithium-ion traction batteries. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134344.
- BMW. (2020). BMW Group UK second-life battery solution in partnership with Off Grid Energy. Abgerufen von https://www.press.bmwgroup.com/united-kingdom/article/detail/T0318650EN_GB/bmw-group-uk-second-life-battery-solution-in-partnership-with-off-grid-energy?language=en_GB, am 07.06.2023
- BMW. (2021). Focus on circular economy: sustainable into 2040. Abgerufen von <https://www.bmw.com/en/magazine/sustainability/circularity-at-bmw.html>, am 05.06.2023
- BMW. (2022). BMW Group creates closed recycling loop for high-voltage batteries in China. Abgerufen von <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0393733EN/bmw-group-creates-closed-recycling-loop-for-high-voltage-batteries-in-china?language=en>, am 05.06.2023
- BMW (2023). *BMW Sustainability Report 2022*. Abgerufen von <https://www.bmwgroup.com/en/report/2022/index.html>
- Bobba, S., Podias, A., Di Persio, F., Messagie, M., Tecchio, P., Cusenza, M. A., . . . Pfrang, A. (2018). Sustainability assessment of second life application of automotive batteries (saslab). *JRC Exploratory Research (2016-2017), Final report*.
- Boulding, K. E. (1966). The economics of the coming spaceship earth. In *Environmental quality in a growing economy* (pp. 3-14): RFF Press.
- Bourguignon, D. (2018). Circular economy package: Four legislative proposals on waste.
- Braungart, M., McDonough, W., & Bollinger, A. (2007). Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions—a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production*, 15(13-14), 1337-1348.
- Brundtland, G. H. (1987). Our common future—Call for action. *Environmental Conservation*, 14(4), 291-294.
- BYD. (2023). Über BYD. Abgerufen von <https://www.bydauto.at/uber-byd/>, am 19.06.2023
- Cano, Z. P., Banham, D., Ye, S., Hintennach, A., Lu, J., Fowler, M., & Chen, Z. (2018). Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets. *Nature Energy*, 3(4), 279-289.
- Carlier, M. (2022). Global automotive manufacturing industry revenue between 2019 and 2022. Abgerufen von <https://www.statista.com/statistics/574151/global-automotive-industry-revenue/>, am 22.01.2023
- CATL (2022a). *2022 Environmental, Social and Governance (ESG) Report*.

- Abgerufen von https://www.catl.com/en/uploads/1/file/public/202304/20230412124641_cxg8mo2in8.pdf
- CATL. (2022b). CATL Launches Battery Swap Solution EVOGO Featuring Modular Battery Swapping. Abgerufen von <https://www.catl.com/en/news/856.html>, am 26.06.2023
- CATL. (2023). Battery Recycling. Abgerufen von <https://www.catl.com/en/solution/recycling/>, am 24.06.2023
- Cong, L., Liu, W., Kong, S., Li, H., Deng, Y., & Ma, H. (2021). End-of-Use Management of Spent Lithium-Ion Batteries From Sustainability Perspective: A Review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 143(10).
- Cusenza, M. A., Guarino, F., Longo, S., Ferraro, M., & Cellura, M. (2019). Energy and environmental benefits of circular economy strategies: The case study of reusing used batteries from electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 25, 100845.
- Decken, K. (2022). BYD und FAW gründen Batterie-Joint-Venture. Abgerufen von <https://energyload.eu/elektromobilitaet/elektroauto/byd-faw/>, am 19.06.2023
- Desa, U. (2016). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development.
- Doll, S. (2022). NIO is testing swap stations that reduce peak demand by sending energy back to the grid. Abgerufen von <https://electrek.co/2022/08/22/nio-swap-stations-energy-back-to-the-grid/>, am 21.06.2023
- Dunn, J., Slattery, M., Kendall, A., Ambrose, H., & Shen, S. (2021). Circularity of lithium-ion battery materials in electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, 55(8), 5189-5198.
- Earth Overshoot Day. (2022). How many Earths? How many countries. *Earth Overshoot Day*. Retrieved from <https://www.overshootday.org/newsroom/past-earth-overshoot-days/>
- Ecomento. (2021a). Renault und Green-Vision verschaffen Elektroauto-Akkus zweites Leben. Abgerufen von <https://ecomento.de/2021/05/24/renault-und-green-vision-verschaffen-elektroauto-akkus-zweites-leben/>, am 16.05.2023
- Ecomento. (2021b). Volvo treibt zweites Leben und Recycling von E-Auto-Akkus voran. Abgerufen von <https://ecomento.de/2021/09/30/volvo-treibt-zweites-leben-und-recycling-von-e-auto-akkus-voran/>, am 11.06.2023
- Ekins, P., Domenech Aparisi, T., Drummond, P., Bleischwitz, R., Hughes, N., & Lotti, L. (2020). The circular economy: What, why, how and where.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013a). Towards the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 2(1), 23-44.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013b). Towards the circular economy: Opportunities for the consumer goods sector. *Ellen MacArthur Foundation*, 1-112.
- Ellen MacArthur Foundation. (2020). The EU's Circular Economy Action Plan. Abgerufen von <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/the-eus-circular-economy-action-plan>, am 16.01.2023
- Ellen MacArthur Foundation. (2021). Groupe Renault and Solvay collaborate to create a circular economy for EV batteries. Abgerufen von <https://ellenmacarthurfoundation.org/news/groupe-renault-and-solvay-collaborate-to-create-a-circular-economy-for-ev>, am 16.05.2023
- Etxandi-Santolaya, M., Canals Casals, L., Amante García, B., & Corchero, C. (2023). Circular Economy-Based Alternatives beyond Second-Life Applications: Maximizing the Electric Vehicle Battery First Life. *World Electric Vehicle Journal*, 14(3), 66.

- Europäisches Parlament. (2022a, 14.06.2022). CO₂-Emissionen von Pkw: Zahlen und Fakten (Infografik). Abgerufen von <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissionen-von-pkw-zahlen-und-fakten-infografik>, am 07.09.2022
- Europäisches Parlament. (2022b). EU-Verkaufsverbot für neue Benzin- und Dieselfahrzeuge ab 2035 – Was bedeutet das? Abgerufen von <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20221019STO44572/verkaufsverbot-fur-neue-benzin-und-dieselfahrzeuge-ab-2035-was-bedeutet-das>, am 08.02.2023
- European Commission. (2008). Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. *Official Journal of the European Union L*, 312(3), 22.
- European Commission. (2015). Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. *European Commission: Brussels, Belgium*.
- European Commission. (2019). The European Green Deal, Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee of the Regions (COM (2019) 640 final). *European Commission. Brussels, 11*, 2019.
- European Commission. (2020a). Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards Greater Security and Sustainability. In: European Commission Brussels, Belgium.
- European Commission. (2020b). A new circular economy action plan for a cleaner and more competitive Europe. *European Commission: Brussels, Belgium*, 1-20.
- Ferrara, C., Ruffo, R., Quartarone, E., & Mustarelli, P. (2021). Circular economy and the fate of lithium batteries: Second life and recycling. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2(10), 2100047.
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., . . . Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *Journal of environmental management*, 91(1), 1-21.
- Ford. (2022). Ford Veröffentlicht Plan zur Sicherung von Batterie-Kapazitäten für Globale Volumen-Produktion von Elektrofahrzeugen. Abgerufen von <https://media.ford.com/content/fordmedia/feu/ch/de/news/2022/07/22/ford-veroeffentlicht-plan-zur-sicherung-von-batterie-kapazitaete.html>, am 14.06.2023
- Ford. (2023a). Batterien von Elektrofahrzeugen. Abgerufen von <https://www.ford.at/hybrid-elektrisch/laden/batterie>, am 14.06.2023
- Ford. (2023b). Integrated Sustainability and Financial Report 2022. Abgerufen von <https://corporate.ford.com/content/dam/corporate/us/en-us/documents/reports/integrated-sustainability-and-financial-report-2022.pdf>, am 12.06.2023
- Frosch, R. A., & Gallopoulos, N. E. (1989). Strategies for manufacturing. *Scientific American*, 261(3), 144-153.
- Gebhardt, M., Beck, J., Kopyto, M., & Spieske, A. (2022). Determining requirements and challenges for a sustainable and circular electric vehicle battery supply chain: A mixed-methods approach. *Sustainable Production and Consumption*, 33, 203-217.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768.

- GEM. (2022). Industry Chain of Waste Battery Recycling and Power Battery Material Manufacturing. Abgerufen von <https://www.gem.com.cn/en/UsedBatteryRecycling/index.html>, am 24.06.2023
- General Motors. (2020). SAIC-GM-Wuling Builds Energy Storage Power Station from Retired Electric Vehicle Batteries. Abgerufen von <https://batteryindustry.tech/saic-gm-wuling-builds-energy-storage-power-station-from-retired-electric-vehicle-batteries/>, am 21.06.2023
- General Motors. (2022). 2022 Sustainability Report. Abgerufen von https://www.gmsustainability.com/_pdf/resources-and-downloads/GM_2022_SR.pdf, am 12.06.2023
- Geng, J., Gao, S., Sun, X., Liu, Z., Zhao, F., & Hao, H. (2022). Potential of electric vehicle batteries second use in energy storage systems: The case of China. *Energy*, 253, 124159.
- Gloeser-Chahoud, S., Huster, S., Rosenberg, S., & Schultmann, F. (2021a). Industrial disassembling as a key enabler of circular economy solutions for obsolete electric vehicle battery systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105735.
- Gloeser-Chahoud, S., Huster, S., Rosenberg, S., & Schultmann, F. (2021b). Return rates and recovery options of used electric vehicle traction batteries in Germany. *Chemie Ingenieur Technik*, 93(11), 1805-1819.
- Great Wall Motor. (2023). Taking back vehicles and battery recycling in Germany. Abgerufen von https://gwm-ora.eu/assets/End-of-Life%20Vehicle%20Information_Homepage%20GWM_EN.pdf, am 21.06.2023
- Gu, X., Ieromonachou, P., Zhou, L., & Tseng, M.-L. (2018). Optimising quantity of manufacturing and remanufacturing in an electric vehicle battery closed-loop supply chain. *Industrial Management & Data Systems*.
- GWM-ORA. (2023). GWM-ORA Sustainability. Abgerufen von <https://ora.se/uploads/gwm-ora-sustainability.pdf>, am 21.06.2023
- Hampel, C. (2022a). Renault creates The Future is Neutral for circular economy. Abgerufen von <https://www.electrive.com/2022/10/14/renault-creates-the-future-is-neutral-for-circular-economy/>, am 16.06.2023
- Hampel, C. (2022b). SAIC, CATL, Sinopec & CNPC to swap batteries in China. Abgerufen von <https://www.electrive.com/2022/10/10/saic-catl-sinopec-cnpc-join-forces-on-battery-swapping/>, am 21.06.2023
- Hampel, C. (2023). MG Motor India & Lohum form battery material supply loop. Abgerufen von <https://www.electrive.com/2023/06/06/mg-motor-india-lohum-form-battery-material-supply-loop/>, am 21.06.2023
- Haram, M. H. S. M., Lee, J. W., Ramasamy, G., Ngu, E. E., Thiagarajah, S. P., & Lee, Y. H. (2021). Feasibility of utilising second life EV batteries: Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges. *Alexandria Engineering Journal*, 60(5), 4517-4536.
- Henßler, S. (2019). CATLs Cell-to-Pack-Batterie ist effizienter, spart Platz und benötigt weniger Teile. Abgerufen von <https://www.elektroauto-news.net/news/catl-baic-bjev-cell-to-pack-batterie-akku-fortschritt>, am 24.06.2023
- Henßler, S. (2023). CATL investiert Milliarden in Akku-Recycling und Materialaufbereitung. Abgerufen von <https://www.elektroauto-news.net/news/catl-milliarden-invest-akku-recycling-aufbereitung>, am 26.06.2023
- Hill, N., Clarke, D., Blair, L., & Menadue, H. (2019). Circular economy perspectives for the management of batteries used in electric vehicles. *Final Project Report by*

- Ricardo Energy & Environment for the JRC, Publications Office of the European Union, Luxembourg. doi, 10, 537140.*
- Holger, D. (2022). GM Sustainability Chief Discusses Auto Maker's Push to an All-Electric Lineup. Abgerufen von <https://www.wsj.com/articles/gm-sustainability-chief-discusses-auto-makers-push-to-an-all-electric-lineup-11664371831>, am 12.06.2023
- Hu, X., Deng, X., Wang, F., Deng, Z., Lin, X., Teodorescu, R., & Pecht, M. G. (2022). A review of second-life lithium-ion batteries for stationary energy storage applications. *Proceedings of the IEEE*, 110(6), 735-753.
- Hua, Y., Liu, X., Zhou, S., Huang, Y., Ling, H., & Yang, S. (2021). Toward sustainable reuse of retired lithium-ion batteries from electric vehicles. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105249.
- Hua, Y., Zhou, S., Huang, Y., Liu, X., Ling, H., Zhou, X., . . . Yang, S. (2020). Sustainable value chain of retired lithium-ion batteries for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 478, 228753.
- Huster, S., Glöser-Chahoud, S., Rosenberg, S., & Schultmann, F. (2022). A simulation model for assessing the potential of remanufacturing electric vehicle batteries as spare parts. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132225.
- Hydrovolt. (2022). Europe's largest electric vehicle battery recycling plant begins operations. Abgerufen von <https://hydrovolt.com/europes-largest-electric-vehicle-battery-recycling-plant-begins-operations/>, am 12.06.2023
- Hyundai. (2020). Hyundai Motor Group und SK Innovation bauen Batterie-Ökosystem auf. Abgerufen von <https://www.hyundai.news/de/articles/press-releases/hyundai-motor-group-und-sk-innovation-bauen-batterie-oekosystem-auf.html>, am 14.06.2023
- Hyundai. (2021a). Can Used Batteries From Electric Vehicles Be Recycled? All You Need to Know About the UBESS and ESS. Abgerufen von <https://www.hyundaimotorgroup.com/tv/CONT00000000000003158>, am 14.06.2023
- Hyundai. (2021b). Sustainability. Abgerufen von <https://www.hyundai.com/eu/electrification/owning-an-electric-vehicle/reasons-why/sustainability.html>, am 14.06.2023
- Ibold, S., & Yun, X. (2022). *Overview on Battery Swapping and Battery-as-a-Service (BaaS) in China*. Abgerufen von https://transition-china.org/wp-content/uploads/2022/08/Battery_Swapping_20220809.pdf
- International Energy Agency. (2022). IEA 2022 Global EV Outlook 2022. Abgerufen von <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022/executive-summary>, am 07.09.2022
- International Energy Agency. (2023). Global EV Outlook 2023. Abgerufen von <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, am 17.05.2023
- Kallitsis, E., Korre, A., & Kelsall, G. H. (2022). Life cycle assessment of recycling options for automotive Li-ion battery packs. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133636.
- Kampker, A., Heimes, H., Lienemann, C., Sarovic, N., & Ganser, J.-P. (2018a). Flexible product architecture and production process of lithium-ion battery modules. *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 1-6.
- Kampker, A., Vallée, D., & Schnettler, A. (2018b). Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie. 1.

- Kastanaki, E., & Giannis, A. (2023). Dynamic estimation of end-of-life electric vehicle batteries in the EU-27 considering reuse, remanufacturing and recycling options. *Journal of Cleaner Production*, 136349.
- Kim, H.-B. (2022). Hyundai Motor bets on battery recycling business. Abgerufen von https://www.koreatimes.co.kr/www/tech/2023/06/129_336115.html, am 14.06.2023
- Kim, H.-K. (2022). Hyundai Mobis plans battery remanufacturing business. Abgerufen von <https://www.kedglobal.com/batteries/newsView/ked202207080008>, am 14.06.2023
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232.
- Kirchherr, J., Yang, N.-H. N., Schulze-Spüntrup, F., Heerink, M. J., & Hartley, K. (2023). Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 194, 107001.
- Kords, M. (2022). Anzahl produzierter Personenkraftwagen weltweit von 2000 bis 2021. Abgerufen von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/159780/umfrage/weltweit-jaehrlich-hergestellte-pkw/>, am 22.01.2023
- Kurdve, M., Zackrisson, M., Johansson, M. I., Ebin, B., & Harlin, U. (2019). Considerations when modelling EV battery circularity systems. *Batteries*, 5(2), 40.
- Lacy, P., Long, J., & Spindler, W. (2020). *The circular economy handbook* (Vol. 259): Springer.
- Lee, S. (2020). EcoPro resumes deal with LG after 8 years Abgerufen von <https://www.thelec.net/news/articleView.html?idxno=2060>, am 26.06.2023
- Leon, E. M., & Miller, S. A. (2020). An applied analysis of the recyclability of electric vehicle battery packs. *Resources, Conservation and Recycling*, 157, 104593.
- LG Chem. (2022). Circular Economy. Abgerufen von <https://www.lgensol.com/en/perfect-closed-loop>, am 26.06.2023
- LG Energy Solutions. (2023). Kreislaufwirtschaft von Batterien - LG Energy Solution ist Vorreiter. Abgerufen von <https://lghomebatteryblog.eu/kreislaufwirtschaft-von-batterien/>, am 26.06.2023
- Li, J., Qiao, Z., Simeone, A., Bao, J., & Zhang, Y. (2020). An activity theory-based analysis approach for end-of-life management of electric vehicle batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 162, 105040.
- Lin, Y., Yu, Z., Wang, Y., & Goh, M. (2023). Performance evaluation of regulatory schemes for retired electric vehicle battery recycling within dual-recycle channels. *Journal of environmental management*, 332, 117354.
- Mahood, Q., Van Eerd, D., & Irvin, E. (2014). Searching for grey literature for systematic reviews: challenges and benefits. *Research synthesis methods*, 5(3), 221-234.
- Malinauskaite, J., Anguilano, L., & Rivera, X. S. (2021). Circular waste management of electric vehicle batteries: Legal and technical perspectives from the EU and the UK post Brexit. *International Journal of Thermofluids*, 10, 100078.
- Manthey, N. (2023). Nio to install 1,000 battery-swap stations in China this year. Abgerufen von <https://www.electrive.com/2023/02/21/nio-to-install-1000-battery-swap-stations-in-china-this-year/>, am 19.06.2023
- Martinez-Laserna, E., Gandiaga, I., Sarasketa-Zabala, E., Badeda, J., Stroe, D.-I., Swierczynski, M., & Goikoetxea, A. (2018). Battery second life: Hype, hope or

- reality? A critical review of the state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 701-718.
- Mathivathanan, D., Kannan, D., & Haq, A. N. (2018). Sustainable supply chain management practices in Indian automotive industry: A multi-stakeholder view. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 284-305.
- McCrossan, C., & Shankaravelu, K. (2021). *A Review of the Second Life Electric Vehicle Battery Landscape from a Business and Technology Perspective*. Paper presented at the 2021 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech).
- Mercedes-Benz. (2019). Mercedes-Benz Energy und Beijing Electric Vehicle starten Entwicklungspartnerschaft zu 2nd-Life-Batteriespeichern. Abgerufen von <https://media.mercedes-benz.com/article/84a97ff2-5b40-42e3-9222-ab8c2bcc01f6>, am 23.06.2023
- Mercedes-Benz. (2022). Die Batterie im Fokus der Kreislaufwirtschaft. Abgerufen von <https://group.mercedes-benz.com/nachhaltigkeit/ressourcen/batterie.html>, am 07.06.2023
- Mercedes-Benz. (2023). Grundstein für nachhaltige Batterie-Recyclingfabrik gelegt. Abgerufen von <https://group.mercedes-benz.com/unternehmen/news/recyclingfabrik-kuppenheim.html>, am 07.06.2023
- Mobilize. (2022). Electric vehicle battery life cycle. Abgerufen von <https://www.mobilize.com/en/battery-life-cycle/>, am 16.06.2023
- Moore, E. A., Russell, J. D., Babbitt, C. W., Tomaszewski, B., & Clark, S. S. (2020). Spatial modeling of a second-use strategy for electric vehicle batteries to improve disaster resilience and circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 160, 104889.
- Mossali, E., Gentilini, L., Merati, G., & Colledani, M. (2020). Methodology and application of electric vehicles battery packs redesign for circular economy. *Procedia CIRP*, 91, 747-751.
- Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of business ethics*, 140(3), 369-380.
- Naor, M. (2022). Tesla's Circular Economy Strategy to Recycle, Reduce, Reuse, Repurpose and Recover Batteries. In M. S. Hosam & I. H. Amal (Eds.), *Recycling Strategy and Challenges Associated with Waste Management Towards Sustaining the World*. Rijeka: IntechOpen.
- Neef, C. (2023). Potenziale von 46-mm-Rundzellen – Auf dem Weg zum neuen Standardformat. Abgerufen von <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/46-mm-rundzellen-potenziale-standardformat-batteriezellen.html>, am 27.06.2023
- Neißendorfer, M. (2022). MG4 Electric startet auf neuer Elektro-Plattform von SAIC. Abgerufen von <https://www.elektroauto-news.net/news/mg4-electric-neue-elektro-plattform-von-saic>, am 21.06.2023
- NIO. (2021). NIO Launches the Standard-Range Hybrid-Cell Battery. Abgerufen von <https://www.nio.com/news/nio-launches-standard-range-hybrid-cell-battery>, am 21.06.2023
- NIO. (2022). Recycling. Abgerufen von https://www.nio.com/de_DE/news/202210060005, am 21.06.2023
- NIO. (2023a). NIO Power. Abgerufen von https://www.nio.com/de_DE/nio-power, am 19.06.2023

- NIO. (2023b). NIO Subscription - Mobilität neu gedacht. Abgerufen von https://www.nio.com/de_DE/subscription, am 19.06.2023
- Nurdiawati, A., & Agrawal, T. K. (2022). Creating a circular EV battery value chain: End-of-life strategies and future perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 185, 106484. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106484>
- Nurdiawati, A., & Kumar, T. (2022). Creating a circular EV battery value chain: End-of-life strategies and future perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 185, 106484. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106484>
- Obrecht, M., Singh, R., & Zorman, T. (2021). Conceptualizing a new circular economy feature—storing renewable electricity in batteries beyond EV end-of-life: the case of Slovenia. *International Journal of Productivity and Performance Management*.
- Odejide, D. (2021). What Tesla does when its batteries reach their end of life. Abgerufen von <https://www.batterycycle.io/what-tesla-does-when-its-batteries-reach-their-end-of-life/>, am 17.06.2023
- OECD. (2011). Resource Productivity in the G8 and the OECD—A Report in the Framework of the Kobe 3R Action Plan. In: Organisation for Economic Co-operation and Development Paris.
- Olsson, L., Fallahi, S., Schnurr, M., Diener, D., & Van Loon, P. (2018). Circular business models for extended EV battery life. *Batteries*, 4(4), 57.
- Paez, A. (2017). Gray literature: An important resource in systematic reviews. *Journal of Evidence-Based Medicine*, 10(3), 233-240.
- Patel, A., & Singh, S. (2022). Implementing circular economy strategies in the automobile industry—a step toward creating sustainable automobiles. *Benchmarking: An International Journal*.
- Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1989). *Economics of natural resources and the environment*: Johns Hopkins University Press.
- Phaal, R., Farrukh, C. J., & Probert, D. R. (2004). Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution. *Technological forecasting and social change*, 71(1-2), 5-26.
- Philippot, M., Costa, D., Hosen, M. S., Senécat, A., Brouwers, E., Nanini-Maury, E., Messagie, M. (2022). Environmental impact of the second life of an automotive battery: Reuse and repurpose based on ageing tests. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132872.
- Picatoste, A., Justel, D., & Mendoza, J. M. F. (2022). Exploring the applicability of circular design criteria for electric vehicle batteries. *Procedia CIRP*, 109, 107-112.
- Pigosso, D. C., Rozenfeld, H., & McAlloone, T. C. (2013). Ecodesign maturity model: a management framework to support ecodesign implementation into manufacturing companies. *Journal of Cleaner Production*, 59, 160-173.
- Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). Circular economy: measuring innovation in the product chain. *Planbureau voor de Leefomgeving*(2544).
- Poullikkas, A. (2015). Sustainable options for electric vehicle technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1277-1287.
- Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2018). Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 179, 605-615.
- PRIOREC. (2023). Hochvolt-Systeme. Abgerufen von <https://priorec.de/leistungen/#hochvolt-systeme>, am 21.06.2023
- Quijano-Ortiz, F., & Seepersad, C. (2022). *Design Recommendations for Reducing the Environmental Impact of Battery Packs*. Paper presented at the International

- Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference.
- Rajaeifar, M. A., Ghadimi, P., Raugei, M., Wu, Y., & Heidrich, O. (2022). Challenges and recent developments in supply and value chains of electric vehicle batteries: A sustainability perspective. In (Vol. 180, pp. 106144): Elsevier.
- Randall, C. (2021). Volvo to leverage recycling to cut costs. Abgerufen von <https://www.electrive.com/2021/04/21/volvo-to-leverage-recycling-to-cut-costs/>, am 11.06.2023
- Randall, C. (2022). Batteryloop to give Mercedes batteries a second life. Abgerufen von <https://www.electrive.com/2022/09/15/batteryloop-to-build-three-stationary-batteries-from-old-mercedes-batteries/>, am 09.06.2023
- Redwood Materials. (2021). Redwood Materials and Ford Motor Company announce strategic relationship. Abgerufen von <https://www.redwoodmaterials.com/news/redwood-materials-and-ford-motor-company-announce-strategic-relationship/>, am 14.06.2023
- Reike, D., Vermeulen, W. J., & Witjes, S. (2018). The circular economy: new or refurbished as CE 3.0?—exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 246-264.
- Reinhardt, R., Christodoulou, I., Gassó-Domingo, S., & García, B. A. (2019). Towards sustainable business models for electric vehicle battery second use: A critical review. *Journal of environmental management*, 245, 432-446.
- Rematec. (2023). Stellantis to showcase sustainable 4R strategy and remanufacturing innovations at REMATEC Amsterdam. Abgerufen von <https://www.rematec.com/news/industry-players-and-markets/stellantis-to-showcase-sustainable-4r-strategy-and-remanufacturing-innovations-at-rematec-amsterdam>, am 05.06.2023
- Renault. (2020a). The circular economy applied to electric vehicles. Abgerufen von <https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/the-circular-economy-applied-to-electric-vehicles/>, am 14.06.2023
- Renault. (2020b). The circular economy of the electric vehicle battery. Abgerufen von <https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/the-circular-economy-of-the-electric-vehicle-battery/>, am 14.06.2023
- Renault. (2022a). Kreislaufwirtschaft. Abgerufen von <https://www.renault.at/elektromobilitaet/recycling.html>, am 14.06.2023
- Renault. (2022b). Refactory in Flins. Abgerufen von https://www.renaultgroup.com/wp-content/uploads/2022/05/202203_rg_plaquette_refactory_12_en.pdf, am 16.05.2023
- Rogers, Jalal, & Boyd. (2012). *An Introduction to Sustainable Development*: Earthscan.
- Rosenberg, S., Glöser-Chahoud, S., Huster, S., & Schultmann, F. (2023). A dynamic network design model with capacity expansions for EoL traction battery recycling—A case study of an OEM in Germany. *Waste Management*, 160, 12-22.
- Rosenberg, S., Huster, S., Glöser-Chahoud, S., & Schultmann, F. (2022). Business Models for Second-Life Battery Applications. In *HANDBOOK ON SMART BATTERY CELL MANUFACTURING: The Power of Digitalization* (pp. 391-408): World Scientific.
- Sandberg, B. (2017). *Wissenschaftliches Arbeiten von Abbildung bis Zitat*: De Gruyter Oldenbourg.

- Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A review on electric vehicles: Technologies and challenges. *Smart Cities*, 4(1), 372-404.
- Schaal, S. (2020). LG Chem vor Premiere von Modul-loser Batterie. Abgerufen von <https://www.electrive.net/2020/11/30/lg-chem-vor-premiere-von-modul-loser-batterie/>, am 26.06.2023
- Schaal, S. (2021). BASF und SVOLT schließen Batterie-Kooperation. Abgerufen von <https://www.electrive.net/2021/10/25/basf-und-svolt-schliessen-batterie-kooperation/>, am 21.06.2023
- Schaal, S. (2022a). China: Dongfeng Peugeot Citroën nutzt Batterietausch-System von CATL. Abgerufen von <https://www.electrive.net/2022/10/27/china-dongfeng-peugeot-citroen-nutzt-batterietausch-system-von-catl/>, am 21.06.2023
- Schaal, S. (2022b). Mercedes-Benz Energy plant 2nd-Life-Projekt in Kanada. Abgerufen von <https://www.electrive.net/2022/07/07/mercedes-benz-energy-plant-2nd-life-projekt-in-kanada/>, am 07.06.2023
- Schulz-Mönninghoff, M., & Evans, S. (2023). Key tasks for ensuring economic viability of circular projects: Learnings from a real-world project on repurposing electric vehicle batteries. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 559-575.
- Schulz-Mönninghoff, M., Neidhardt, M., & Niero, M. (2023). What is the contribution of different business processes to material circularity at company-level? A case study for electric vehicle batteries. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135232.
- Schulz, M., Niero, M., Rehmann, L.-M., & Georg, S. (2021). Exploration of decision-contexts for circular economy in automotive industry. *Procedia CIRP*, 98, 19-24.
- Slattery, M., Dunn, J., & Kendall, A. (2021). Transportation of electric vehicle lithium-ion batteries at end-of-life: A literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105755.
- Sopha, B. M., Purnamasari, D. M., & Ma'mun, S. (2022). Barriers and Enablers of Circular Economy Implementation for Electric-Vehicle Batteries: From Systematic Literature Review to Conceptual Framework. *Sustainability*, 14(10), 6359.
- Statista. (2023a). Anzahl verkaufter Elektroautos weltweit nach Marken in den Jahren 2020 und 2021. Abgerufen von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/561568/umfrage/die-groessten-hersteller-von-elektroautos-nach-absatz/>, am 26.05.2023
- Statista. (2023b). Größte Hersteller von Batterien für Elektroautos weltweit nach Absatz in den Jahren 2019 und 2020 und Prognose für 2021. Abgerufen von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/490657/umfrage/ranking-zu-den-groessten-herstellern-von-batterien-fuer-e-autos-nach-absatz/>, am 26.05.2023
- Stellantis. (2021a). Carbon Net Zero Strategy. Abgerufen von <https://www.stellantis.com/en/responsibility/carbon-net-zero-strategy/vehicles>, am 02.06.2023
- Stellantis. (2021b). Stellantis EV Day 2021. Abgerufen von <https://www.stellantis.com/en/investors/events/ev-day-2021>, am 05.06.2023
- Stellantis. (2022). Stellantis Fosters Circular Economy Ambitions with Dedicated Business Unit to Power New Era of Sustainable Manufacturing and Consumption. Abgerufen von <https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/2022/october/stellantis-fosters-circular-economy-ambitions-with-dedicated-business-unit-to-power-new-era-of-sustainable-manufacturing-and-consumption>, am 02.06.2023

- Tao, Y., Rahn, C. D., Archer, L. A., & You, F. (2021). Second life and recycling: Energy and environmental sustainability perspectives for high-performance lithium-ion batteries. *Science advances*, 7(45), eabi7633.
- Taylor, B. (2022). Umicore boosts battery recycling tech. Abgerufen von <https://recyclingtoday.com/news/umicore-stellantis-ev-battery-recycling-europe-lithium/>, am 05.06.2023
- Tesla. (2021). Batterie-Recycling. Abgerufen von https://www.tesla.com/de_at/support/sustainability-recycling, am 17.06.2023
- Toorajipour, R., Chirumalla, K., Parida, V., Johansson, G., Dahlquist, E., & Wallin, F. (2022). Preconditions of Circular Business Model Innovation for the Electric Vehicle Battery Second Life: An Ecosystem Perspective. In *SPS2022* (pp. 279-291): IOS Press.
- Toyota. (2021a). NiMH and Li ion Hybrid batteries recovery procedures and documents. Abgerufen von <https://www.toyota-tech.eu/hvb/data/HVB%20recycling%20-%20matrix%20for%20TechDoc%20V13%2029092016.htm>, am 16.06.2023
- Toyota. (2021b). Toyota Environmental - Reusing items and resources. Abgerufen von <https://www.toyota.ie/discover-toyota/environment/better-earth/reuse>, am 16.05.2023
- Toyota. (2022). Circularity at Toyota. Abgerufen von <https://www.toyota-europe.com/sustainability/circularity>, am 16.06.2023
- Toyota. (2023a). Batteries. Abgerufen von <https://www.toyota-europe.com/electrification/batteries>, am 16.06.2023
- Toyota. (2023b). Toyota entwickelt mit Partnern großvolumigen Energiespeicher. Abgerufen von <https://www.toyota-media.de/blog/unternehmen/artikel/toyota-entwickelt-mit-partnern-grossvolumigen-energiespeicher/text>, am 16.06.2023
- Toyota. (2023c). Toyota Unveils New Technology That Will Change the Future of Cars. Abgerufen von <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/39288520.html>, am 16.06.2023
- UFCCC, U. N. f. c. o. c. c. (2015). *Paris agreement*. Paper presented at the Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (21st Session, 2015: Paris). Retrived December.
- UL Solutions. (2021). UL and Hyundai Join Forces to Advance Second Life Battery Energy Storage System Safety and Performance. Abgerufen von <https://www.ul.com/news/ul-and-hyundai-join-forces-advance-second-life-battery-energy-storage-system-safety-and-0>, am 14.06.2023
- Van Buren, N., Demmers, M., Van der Heijden, R., & Witlox, F. (2016). Towards a circular economy: The role of Dutch logistics industries and governments. *Sustainability*, 8(7), 647.
- Van den Brink, S., Kleijn, R., Sprecher, B., & Tukker, A. (2020). Identifying supply risks by mapping the cobalt supply chain. *Resources, Conservation and Recycling*, 156, 104743.
- VDE. (2023). 2nd life battery storage projects in Europe. Abgerufen von <https://www.vde.com/resource/blob/2212746/23eabc6fc64bb8bae16a13e6c19e847f/emilas-2nd-life-projekt-data.pdf>, am 09.06.2023
- Volkswagen. (2021a). E-mobility: is it possible to repair the batteries in an electric car? Abgerufen von <https://modo.volkswagengroup.it/en/robotics/e-mobility-is-it-possible-to-repair-the-batteries-in-an-electric-car>, am 02.06.2023
- Volkswagen. (2021b). Power Day: Volkswagen präsentiert Technology-Roadmap für Batterie und Laden bis 2030. Abgerufen von

- <https://www.volkswagenag.com/de/news/2021/03/power-day--volkswagen-presents-technology-roadmap-for-batteries-.html>, am 02.06.2023
- Volkswagen. (2021c). Recycling: Rohstoffe zurückgewinnen. Abgerufen von <https://www.volkswagen.at/elektroauto/nachhaltigkeit/batterie-recycling>, am 31.05.2023
- Volkswagen. (2021d). Second life or recycling? BattMan rescues batteries from a needlessly short lifespan! Abgerufen von <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/second-life-or-recycling-battman-rescues-batteries-from-a-needlessly-short-lifespan-7532>, am 02.06.2023
- Volkswagen. (2022a). Lieferkette: Emissionen reduzieren, Standards kontrollieren. Abgerufen von <https://www.volkswagen.at/elektroauto/nachhaltigkeit/lieferkette-emissionen-reduzieren>, am 31.05.2023
- Volkswagen (2022b). *Nachhaltigkeitsbericht 2022: Kreislaufwirtschaft*. Abgerufen von <https://www.volkswagenag.com/de/sustainability/circular-economy.html>
- Von Hauff, M. (2014). *Nachhaltige Entwicklung - Grundlagen und Umsetzung*: De Gruyter.
- Vu, F., Rahic, M., & Chirumalla, K. (2020). Exploring second life applications for electric vehicle batteries. In *SPS2020* (pp. 273-284): IOS Press.
- Wang, L., Wang, X., & Yang, W. (2020). Optimal design of electric vehicle battery recycling network—From the perspective of electric vehicle manufacturers. *Applied Energy*, 275, 115328.
- Webster, J., & Watson, R. T. (2002). Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review. *MIS quarterly*, xiii-xxiii.
- Werwitzke, C. (2020). Renault: Keine Batteriemiete mehr bei Zoe und Kangoo Z.E. Abgerufen von <https://www.electrive.net/2020/11/13/renault-keine-batteriemiete-mehr-bei-zoe-und-kangoo-z-e/>, am 16.06.2023
- Werwitzke, C. (2021a). China: CATL baut Werk für Kathodenmaterialien in Yichang. Abgerufen von <https://www.electrive.net/2021/12/06/china-catl-baut-werk-fuer-kathodenmaterialien-in-yichang/>, am 26.06.2023
- Werwitzke, C. (2021b). Volvo skizziert Batterie- und Tech-Strategie bis 2030. Abgerufen von <https://www.electrive.net/2021/06/30/volvo-skizziert-batterie-und-tech-strategie-bis-2030/>, am 12.06.2023
- Winans, K., Kendall, A., & Deng, H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 825-833.
- World Economic Forum. (2020). Raising Ambitions: A New Roadmap for the Automotive Circular Economy.
- Wrålsen, B., Prieto-Sandoval, V., Mejia-Villa, A., O'Born, R., Hellström, M., & Faessler, B. (2021). Circular business models for lithium-ion batteries-Stakeholders, barriers, and drivers. *Journal of Cleaner Production*, 317, 128393.
- Xiao, Y., & Watson, M. (2019). Guidance on conducting a systematic literature review. *Journal of planning education and research*, 39(1), 93-112.
- Yan, Z., Zhang, A., & Goh, B. (2023). China's CATL unveils condensed matter battery to power civil aircraft. Abgerufen von <https://www.reuters.com/technology/chinas-catl-unveils-condensed-matter-battery-power-civil-aircraft-2023-04-19/>, am 26.06.2023
- Yin, R. K. (2009). *Case study research: Design and methods* (Vol. 5): sage.

- Yin, R. K. (2018). Case study research and applications : design and methods. *Case study research and a*(ISBN 9781506336169), xxx, 319 Seiten, Illustrationen, 324 cm. Retrieved from <https://permalink.catalogplus.tuwien.at/AC14516944>
- Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgehensweise zur Ergebnisfindung	5
Abbildung 2: Vergleich der Ressourcenströme ausgewählter Wirtschaftsformen (eigene Darstellung nach Van Buren et al. (2016, S. 4))	9
Abbildung 3: Zirkulären Strategien innerhalb der Produktionskette (eigene Darstellung nach Potting et al. (2017, S. 5)).....	11
Abbildung 4: Abfallhierarchie in der CE (eigene Darstellung nach Lacy et al. (2020, S. 29))	16
Abbildung 5: Der europäische grüne Deal (eigene Darstellung nach European Commission (2019a))	20
Abbildung 6: Zulieferpyramide für Traktionsbatterien in der Automobilindustrie (eigene Darstellung nach Kampker et al. (2018b, S. 51)).....	28
Abbildung 7: Bauformen von Batteriezellen (Eigene Darstellung nach Kampker et al. (2018b, S. 349)).....	33
Abbildung 8: Batteriematerialpreise von 2015 bis 2022 (eigene Darstellung nach International Energy Agency (2022, S. 141)).....	36
Abbildung 9: Prozess der systematischen Literaturanalyse (eigene Darstellung nach Xiao & Watson (2019, S. 11)).....	40
Abbildung 10: Zusammenstellung der Suchstrings für die systematische Literaturrecherche zum aktuellen Forschungsstand	42
Abbildung 11: Publikationen zum Begriff „Circular Economy“ auf Scopus.....	42
Abbildung 12: Zusammenstellung der Suchstrings für die systematische Literaturrecherche der MCS	65

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien der Literatursuche	43
Tabelle 2: Suchbegriffe und Ergebnisse der Literatursuche	44
Tabelle 3: Herausforderungen für den Automobilsektor	58
Tabelle 4: Stichprobe der MCS.....	63
Tabelle 5: Ein- und Ausschlusskriterien für die Literatursuche	64
Tabelle 6: Suchphrasen der Literatursuche	65
Tabelle 7: Protokoll der Literatursuche	66
Tabelle 8: Allgemeine Umsetzung von CE-Ansätzen in den Konzernstrategien.....	70
Tabelle 9: Strategiematrix zu CE-Aktivitäten bei Traktionsbatterien	71
Tabelle 10: Strategiematrix Rethink.....	72
Tabelle 11: Strategiematrix Reduce	77
Tabelle 12: Umsetzung der Reuse-Strategie.....	79
Tabelle 13: Umsetzung der Repair- und Refurbish-Strategie	80
Tabelle 14: Umsetzung der Remanufacture-Strategie.....	81
Tabelle 15: Strategiematrix Repurpose	82
Tabelle 16: Umsetzung der Repurpose-Strategie durch ESS für Industrie und Energieinfrastruktur	83
Tabelle 17: Umsetzung der Repurpose-Strategie durch ESS für private Haushalte..	85
Tabelle 18: Umsetzung der Repurpose-Strategie durch mobile ESS	85
Tabelle 19: Umsetzung der Repurpose-Strategie durch Fahrzeuganwendungen	86
Tabelle 20: Umsetzung der Recycling-Strategie.....	88

11 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Begriff
Ah	Amperestunden
BaaS	Batterie-als-Service („Battery-as-a-Service“)
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug („Battery Electric Vehicle“)
BM	Geschäftsmodell („Business Model“)
BMS	Batterie Management System
bzw.	beziehungsweise
C2C	von-Wiege-zu-Wiege („Cradle-to-Cradle“)
C2P	Zelle-zu-Pack („Cell-to-Pack“)
CBM	Zirkuläres Geschäftsmodell („Circular Business Model“)
CE	Kreislaufwirtschaft („Circular Economy“)
CEAP	Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft („Circular Economy Action Plan“)
d.h.	das heißt
EE	Erneuerbare Energien
EoFL	Ende des ersten Lebenszyklus („End of first Life“)
EoL	Lebensende („End of Life“)
EPR	erweiterte Herstellendenverantwortung („Extended Producer Responsibility“)
ESS	Energiespeichersystem
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
EV	Elektrofahrzeug („Electric Vehicle“)
EVb	Elektrofahrzeugbatterie („Electric Vehicle Battery“)
FCEV	Brennstoffzellen Elektrofahrzeug („Fuel Cell Electric Vehicle“)
FEV	Vollelektrisches Fahrzeug („Fully Electric Vehicle“)
GS	Google Scholar
GWh	Gigawattstunden
HEV	Hybrid-Elektrofahrzeug („Hybrid Electric Vehicle“)
HV	Hybridfahrzeug („Hybrid Vehicle“)
ICE	Verbrennungsmotor („Internal Combustion Engine“)
ICEV	Fahrzeug mit Verbrennungsmotor („Internal Combustion Engine Vehicles“)
JV	Gemeinschaftsunternehmen („Joint Venture“)
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
LFP	Lithium-Eisenphosphat
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
MCS	Multiple Fallstudie („Multiple Case Study“)
Mio.	Million
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
Ni-Cd	Nickel-Cadmium
Ni-MH	Nickel-Metallhydrid
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid
OEM	Erstausrüstende („Original Equipment Manufacturer“)
PaaS	Produkt-als-Service („Product-as-a-Service“)
PHEV	Plug-in Hybrid-Elektrofahrzeug („Plug-in Hybrid Electric Vehicle“)

PKW	Personenkraftwagen
SC	Scopus
SD	Science Direct
SDGs	Nachhaltige Entwicklungsziele („Sustainable Development Goals“)
THG	Treibhausgas
UN	Vereinte Nationen („United Nations“)
V2G	vom Fahrzeug zum Netz („Vehicle to Grid“)
Wh	Wattstunden
z.B.	zum Beispiel