

Untersuchung: Kreislaufstrategien für Batteriesysteme in Baden-Württemberg

KSBS BW

ENDBERICHT

Bearbeitungszeitraum: 01.10.2019 – 31.05.2020

Untersuchung: Kreislaufstrategien für Batteriesysteme in Baden-Württemberg

KSBS BW

AUFTRAGGEBER:

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

BETREUT DURCH:

Projektträger Karlsruhe – Kompetenzfeld Umwelt & Energie (BWP)

AUTOR*INNEN:

Steffen Kiemel, Jan Koller, Dr. Duygu Kaus, Soumya Singh, Johannes Full, Max Weeber,
Dr. Robert Miehe

*Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA / Stuttgart,
Deutschland*

Simone Ehrenberger, Ines Österle, Murat Senzeybek, Sebastian Stickel
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR / Stuttgart, Deutschland

Stuttgart, 2020

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
1 Einleitung	10
2 Ziele der Untersuchung	12
3 Beschreibung der Bausteine alternativer Kreislaufstrategien	14
3.1 Kreislaufwirtschaft	14
3.2 Reuse/Repurpose	20
3.3 Remanufacturing	21
3.4 Recycling	22
4 Umfeldanalyse zu Kreislaufstrategien für Batterien im nationalen und internationalen Kontext	25
4.1 Deutschland.....	25
4.2 USA.....	28
4.3 China	31
4.4 Japan.....	38
5 Künftige Entwicklung der Li-Ionen Batterietechnologie	40
5.1 Vorgehen	41
5.2 Bewertungssystematik für die erwartete Entwicklung der Li-Ionen Batterietechnologie	42
5.3 Ergebnisse	49
6 Künftige Entwicklung des EoL-Sektors	54
6.1 Bewertungssystematik für alternative Kreislaufstrategien	55
6.2 Bewertung und Priorisierung alternativer Kreislaufstrategien.....	58
7 Erfassung des aktuellen und zukünftigen Marktumfelds der Elektromobilität in Baden-Württemberg	67
7.1 Übersicht des relevanten Fahrzeugmarkts	68
7.2 Pkw-Markt.....	70
7.3 Nutzfahrzeuge	81
7.4 Busse.....	86
7.5 Krafträder	88
7.6 Elektrofahrräder	90
7.7 Zusammenfassung der Ergebnisse	92

8	Vergleichende Ökobilanz zwischen zwei Herangehensweise zur Prozessierung von EoL-Li-Ionen Batteriesystemen.....	93
8.1	Festlegung des Untersuchungsrahmens	94
8.2	Sachbilanz	100
8.3	Wirkungsabschätzung.....	108
8.4	Auswertung.....	119
8.5	Kritische Diskussion.....	122
9	Handlungsempfehlungen	124
9.1	Design for Recycling.....	124
9.2	Standardisierung & Digitalisierung	125
9.3	Detaillierte SoH-Bewertung und strategische Weiternutzung	127
9.4	Definition von Reuse-/Remanufacturing-Anwendungsfällen.....	128
9.5	Höhere ökologische Gutschriften durch effizientere Recyclingprozesse.....	129
9.6	Steigerung der Rentabilität derzeitiger Recyclingprozesse	130
9.7	Steigerung der Recyclingkapazitäten.....	132
9.8	Schließen des Materialkreislaufs.....	133
9.9	Anreize für eine umfassende und effiziente Kreislaufführung	134
10	Literaturverzeichnis	135
11	Anhang	150
11.1	Befragte Expert*innen.....	150
11.2	Fragebogen – deutsche Ausführung	151
11.3	Anfallende und substituierte Materialien zur Gutschrift	156
11.4	Verwendete generische Prozesse	157

Abkürzungsverzeichnis

SME	Small and medium sized enterprises
ANL	Argonne National Laboratory
BAJ	Battery Association of Japan
BattG	Batteriegesezt
BEV	Battery Electric Vehicle
BMF	Bundesministerium der Finanzen
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CATARC	China Automotive Technology and Research Center Co. Ltd.
CED	Cumulative Energy Demand - Kumulierter Energieverbrauch
CNG	Compressed Natural Gas
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalente
D-HEV	Hybrid Electric Vehicle; Diesel
DoD	Depth of Discharge - Entladetiefe
DoE	US Department of Energy
EoL	End of Life
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FEP	Freshwater Eutrophication Potential - Frischwasser-Eutrophierungspotential
G-HEV	Hybrid Electric Vehicles; Benzin
GWP	Global Warming Potential - Treibhauspotential
HEV	Hybrid Electric Vehicle
ID	Identity Document
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JAMA	Japan Automobile Manufacturers Association
JARP	Japan Auto Recycling Partnership
JBRC	Japan Portable Rechargeable Battery Recycle Center
KBA	Kraftfahrtbundesamt
LCO	Kathodenchemie: Lithium-Kobaltoxid
LIB	Lithium-Ionen Batterie
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Liquified Natural Gas, Liquified Natural Gas
MED	Metal Depletion - Verbrauch metallischer Ressourcen
MEP	Marine Eutrophication Potential - Meerwasser-Eutrophierungspotential
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry (Japan)
MLE	Medium and large sized enterprises
NCA	Kathodenchemie: Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid
NEV	New Energy Vehicle
Nfz	Nutzfahrzeuge
NMC	Kathodenchemie: Nickel-Mangan-Kobalt
NPM	Nationale Plattform Zukunft der Mobilität
NREL	National Renewable Energy Laboratory

OEM Overall Equipment Manufacturer - Erstausrüster
PHEV Plug-in hybrid electric vehicle
Pkw Personenkraftwagen, Personenkraftwagen
POF Photochemical Oxidant Formation - Photochemisches Oxidantienpotential
REEV Range Extender Electric Vehicle
SoH State of Health
t Tonne
TEA Terrestrial Acidification - Versauerung (terrestrisch)
VDA Verband der Automobilindustrie Verband der Automobilindustrie
WEEE Waste Electrical and Electronic Equipment
ZIV Zweirad-Industrie-Verband

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kreislaufstrategien für Batteriesysteme, eigene Darstellung in Anlehnung an [8].....	11
Abbildung 2: Inhaltlicher Aufbau der Untersuchung.....	12
Abbildung 3: Abfallhierarchie nach § 6 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes.....	15
Abbildung 4: Recycling-Kaskade, eigene Darstellung nach [17].....	15
Abbildung 5: „Butterfly“ Diagramm [4].....	16
Abbildung 6: Kreislaufstrategien für Batteriesysteme, eigene Darstellung in Anlehnung an [19]....	17
Abbildung 7: Exemplarische Darstellung der Stammdaten eines Batteriesystems [28]	19
Abbildung 8: Darstellung der unterschiedlichen Alterung von Batteriesystemen (links) und neue Zusammenstellung vergleichbarer Zustände (rechts) [42].....	21
Abbildung 9: Grundoperationen und Prozesswege zum Recycling von Lithium-Ionen Batteriesystemen, eigene Darstellung in Anlehnung an [46]	23
Abbildung 10: Exemplarische Darstellung einer zukünftigen Wertschöpfungskette von Second-Life- Batterien. Eigene Darstellung nach [25].....	24
Abbildung 11: Batterielebensdauer im Jahr 2030 im progressiven Szenario.....	49
Abbildung 12: Prioritätenreihenfolge der Einflussfaktoren auf die Batterielebensdauer.....	50
Abbildung 13: Heutige und künftig erwartete (2030) Marktanteile der NMC-Zellchemien	51
Abbildung 14: Prioritätenreihenfolge der Einflussfaktoren auf die Batteriechemie	52
Abbildung 15: Zielkriterien für die Bewertung der Kreislaufstrategien nach VDI-Richtlinie 2243 [17].....	54
Abbildung 16: Schritte der Nutzwertanalyse, Eigene Darstellung nach [156]	56
Abbildung 17: Einschätzung der befragten Expert*innen zur Rücklaufquote Heute vs. 2030 [%]..	57
Abbildung 18: SoH-Grenzwert in % für die jeweiligen Kreislaufstrategien	62
Abbildung 19: Befragung - Verlängerte Lebensdauer durch Second Life	62
Abbildung 20: Präferenzordnung der Kreislaufstrategien.....	66
Abbildung 21: VECTOR21 (Pkw-Modell)	72
Abbildung 22: CO ₂ Emissionsziele in Europa	73
Abbildung 23: Annahmen zur Infrastrukturverfügbarkeit, moderates und progressives Szenario...	74
Abbildung 24: Annahme Batteriepreisentwicklung.....	75
Abbildung 25: Annahme Batteriekapazitäten.....	75
Abbildung 26: Markthochlauf elektrifizierter Pkw in Deutschland	77
Abbildung 27: Markthochlauf elektrifizierter Pkw (Kleinwagen) in Baden-Württemberg	77
Abbildung 28: Markthochlauf elektrifizierter Pkw (Mittelklasse) in Baden-Württemberg	78
Abbildung 29: Markthochlauf elektrifizierter Pkw (Oberklasse) in Baden-Württemberg	78
Abbildung 30: Überlebensfunktionen nach Fahrzeuggröße der Fahrzeuge in Deutschland.....	79
Abbildung 31: Anzahl der EVs im Fahrzeugbestand in Baden-Württemberg 2015 - 2050	80
Abbildung 32: Potenzielle Rücklaufmenge an Li-Ionen Batterien aus den Fahrzeugmarkt.....	81
Abbildung 33: Systemgrenze der Bilanzierung	95
Abbildung 34: Treibhausgaspotential nach IPCC 2013 – Route 1.....	109
Abbildung 35: Treibhausgaspotential nach IPCC 2013 – Route 2.....	109
Abbildung 36: Treibhausgaspotential nach IPCC 2013 - Demontage Input/Output.....	110
Abbildung 37: Treibhausgaspotential nach IPCC 2013 – Route 1 Input/Output	111
Abbildung 38: Treibhausgaspotential nach IPCC 2013 – Route 2 Input/Output	111
Abbildung 39: Kumulierter Energieverbrauch – Route 1	112
Abbildung 40: Kumulierter Energieverbrauch – Route 2	113
Abbildung 41: Frischwasser- & Meerwassereutrophierung nach ReCiPe 2008 V1.13 – Route 1...	114
Abbildung 42: Frischwasser- & Meerwassereutrophierung nach ReCiPe 2008 V1.13 – Route 2...	115
Abbildung 43: Ressourcenschwund Metall nach ReCiPe 2008 V1.13 – Route 1.....	116

Abbildung 44: Ressourcenschwund Metall nach ReCiPe 2008 V1.13 – Route 2.....	116
Abbildung 45: Photochemisches Oxidantienpotential nach ReCiPe 2008 V1.13 – Route 1	117
Abbildung 46: Photochemisches Oxidantienpotential nach ReCiPe 2008 V1.13 – Route 2.....	117
Abbildung 47: Versauerungspotential nach ReCiPe 2008 V1.13 – Route 1.....	118
Abbildung 48: Versauerungspotential nach ReCiPe 2008 V1.13 – Route 2.....	119
Abbildung 49: Auf die Auswirkungen der EU25+3 Staaten normierte Darstellung ausgewählter Wirkkategorien	121

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameter zur Bewertung der Stamm-, Transaktions- und Statusdaten [18, 25, 27]	18
Tabelle 2: Beispiele für visuelle Prüfungen von Batteriesystemen, [18].....	22
Tabelle 3: Übersicht zur Recycling Richtlinie „Comprehensive Utilization of New Energy Vehicle Waste Power Battery Industry“	34
Tabelle 4: Garantien für Batteriesysteme in Abhängigkeit des Alters, Laufleistung und Restkapazität ausgewählter OEM [121–128]	42
Tabelle 5: Zusammenhang zwischen der max. Zyklenzahl und dem genutzten SoC-Bereich [132].	43
Tabelle 6: Antwortmöglichkeiten für die Entwicklung der jeweiligen Einflussfaktoren.....	47
Tabelle 7: Invertierung der Einflussfaktoren der Batteriechemie	47
Tabelle 8: Entwicklungspotenzial der einzelnen Einflussfaktoren auf die Lebensdauer	50
Tabelle 9: Entwicklungspotential der einzelnen Einflussfaktoren auf die Batteriechemie.....	52
Tabelle 10: Marktanteile der NMC-Zellchemien in den definierten Szenarien [%]	53
Tabelle 11: Prognostizierter Ertrag, Aufwand und Gewinn der betrachteten Kreislaufstrategien pro Batteriesystem für das Jahr 2017 [49].....	60
Tabelle 12: Ergebnis Expert*innenbefragung	65
Tabelle 13: 2030 Ziele der Bundesregierung im Bereich Fahrzeugantriebe.....	69
Tabelle 14: Methode Schätzung Batterieaufkommen: Pkw	71
Tabelle 15: Energiepreise im Modell	76
Tabelle 16: Methode Schätzung Batterieaufkommen: Nfz	82
Tabelle 17: Durchschnittliche Batteriekapazität (kWh) von BEV und REEV (Nfz) [Quelle: VECTOR21]	84
Tabelle 18: Durchschnittliche Batteriekapazität (kWh) von Full und Plug-In Hybriden (Nfz) [Quelle: VECTOR21]	84
Tabelle 19: Durchschnittliche Batteriekapazität (kWh) konventioneller Fahrzeuge (Nfz).....	84
Tabelle 20: Batterieaufkommen für Recycling/Zweitverwendung in Baden-Württemberg (MWh): Nfz	85
Tabelle 21: Methode Prognose Batterieaufkommen: Busse.....	86
Tabelle 22: Batteriekapazität von Bussen [52]	87
Tabelle 23: Batterieaufkommen für Recycling/Zweitverwendung in Baden-Württemberg (MWh): Busse	87
Tabelle 24: Methode Schätzung Batterieaufkommen: Krafträder	88
Tabelle 25: batterieaufkommen für Recycling/Zweitverwendung in Baden-Württemberg (MWh): Krafträder	89
Tabelle 26: Methode Schätzung Batterieaufkommen: Elektrofahrräder	90
Tabelle 27: batterieaufkommen für Recycling/Zweitverwendung in Baden-Württemberg (MWh): Krafträder	91
Tabelle 28: batterieaufkommen für Recycling/Zweitverwendung in Baden-Württemberg (MWh) nach Fahrzeugkategorien.....	92
Tabelle 29: Berücksichtigte Wirkkategorien.....	96
Tabelle 30: Recyclingeffizienzen für rückgewonnene Materialien.....	102
Tabelle 31: Materialfluss Demontage.....	103
Tabelle 32: Materialfluss Pyrometallurgische Prozessroute	104
Tabelle 33: Materialfluss Hydrometallurgische Prozessroute.....	106
Tabelle 34: Zusammenfassung der Umweltwirkungen in den betrachteten Wirkkategorien	120

1 Einleitung

Welche Wertschöpfungspotenziale bietet die Elektromobilität im Land Baden-Württemberg? Mit einem Kostenanteil von 38 % ist die Batterie die teuerste Einzelkomponente in einem Elektroauto und bindet gleichzeitig eine Vielzahl strategisch wichtiger Rohstoffe. Batterien sind Verschleißkomponenten und Hersteller garantieren heute lediglich eine Batterielebensdauer von sechs bis acht Jahren und Laufleistungen zwischen 100.000 und 240.000 km in Mobilitätsanwendungen. Aufgrund des hohen Kostenanteils der Batteriesysteme und zur Sicherung strategisch wichtiger Rohstoffe sollten die Möglichkeiten einer Rückwärtsintegration (Demontage) der Batteriesysteme und –module sowie die Rückgewinnung der Rohstoffe in Recyclingprozessen auf dem Weg zur Elektromobilität in den Fokus der Betrachtung gerückt werden. Entsprechend ist es bereits heute erforderlich die strukturpolitischen Rahmenbedingungen zu schaffen und technische Lösungen zu erarbeiten, um das Produkt Batterie im Sinne einer Kreislaufwirtschaft nachhaltig zu nutzen.

Die Kreislaufwirtschaft beschreibt ein System, in welchem Ressourceneinsatz, Abfallproduktion, Emissionen und Energieverluste minimiert werden, indem Material- und Energieträgerkreisläufe reduziert, verlängert oder geschlossen werden [1]. Dies bedeutet insbesondere, dass Produktlebenszyklen verlängert und bereits verarbeitete Ressourcen erneut in der Herstellung eingesetzt werden. Ziel ist es, sowohl die Notwendigkeit der Ausschöpfung natürlicher Rohstoffe, als auch der Entsorgung von Abfallstoffen vollständig abzuschaffen [2]. Stattdessen sollen einmal genutzte Ressourcen so lange wie möglich im Kreislauf gehalten werden. Dies wird durch das Schließen von Kreisläufen und die branchenübergreifende Verkettung ermöglicht, bei der die in einem Prozess als Abfall anfallenden Ressourcen erneut als Input für andere Prozesse verwendet werden [3, 4]. Hierdurch können die unterschiedlichen Kreislaufstrategien in einem Kaskadensystem miteinander verbunden werden. Die Kreislaufwirtschaft stellt damit den Gegenentwurf zur derzeit vorherrschenden Linearwirtschaft dar. Zur Schließung der Ressourcenkreisläufe haben sich verschiedene Kreislaufstrategien etabliert, siehe beispielsweise Reike et al. für eine Übersicht [5]. Welche Kreislaufstrategie verfolgt wird ist von ökologischen, ökonomischen und technischen Kriterien abhängig und muss daher hinsichtlich des betrachteten Produkts individuell bewertet werden [6, 7]. Für Batteriesysteme haben sich die nach zunehmender Prozesstiefe geordneten Kreislaufstrategien Reuse, Repurpose, Reparatur, Remanufacturing und Recycling etabliert, siehe Abbildung 1.

Neben dem klassischen stofflichen Recycling eröffnen sich durch Reparatur/Austausch, Wiederverwendung und Aufarbeitung Möglichkeiten neue Wertschöpfungspfade zu erschließen, die nutzbare Lebensdauer und Leistungsfähigkeit von Batteriesystemen zu erhöhen und die Abhängigkeit von versorgungskritischen Rohstoffen im Land Baden-Württemberg zu begrenzen. Bei klassischen Komponenten der Automobilindustrie, wie z. B. Motoren, Kompressoren oder Anlassern können durch Kreislaufwirtschaftskonzepte bereits signifikante Einsparungen hinsichtlich der im Produktionsprozess entstehenden Emissionen sowie des Material- und Energiebedarfs im Vergleich zur Neuteilproduktion erzielt werden. Dieses Potential soll auf die Elektromobilität übertragen werden, um den derzeit in der Kritik stehenden ökologischen Fußabdruck der Technologie signifikant zu verkleinern und somit bei der Marktdurchdringung zu unterstützen. Die hierfür erforderliche Infrastruktur bestehend aus Werkstätten, (Reverse) Supply Chain, aufarbeitenden Unternehmen und Recyclern ist zwar potentiell verfügbar, jedoch sind die einzelnen Stakeholder für die Anforderung

des Produkts Batterie bisher nur unzureichend befähigt. Das wirtschaftliche Potential werterhaltender Wertschöpfungskreisläufe im Sinne nachhaltiger batteriebetriebener Mobilitätskonzepte bleibt daher bisher weitgehend ungenutzt.

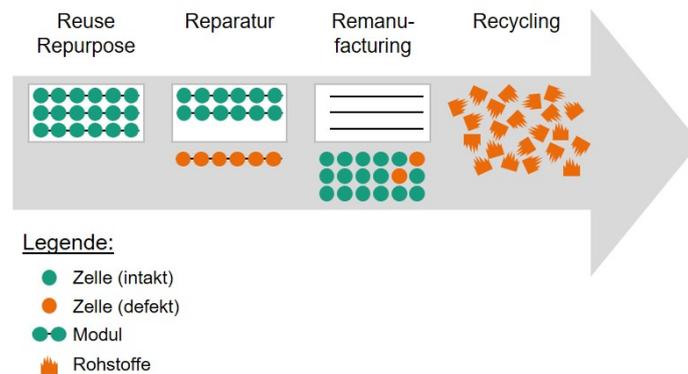


Abbildung 1: Kreislaufstrategien für Batteriesysteme, eigene Darstellung in Anlehnung an [8]

Vor dem Hintergrund neuer Mobilitätskonzepte und eines sich wandelnden Automobilmarkts (bspw. steigende Bedeutung von elektrischen Antrieben) ist für die Bewertung von Kreislaufstrategien und die Ableitung von entsprechenden Empfehlungen zur Umsetzung und Förderung eine Betrachtung des Marktumfelds unabdingbar. Die Wirtschaftlichkeit und der Nutzen von Wiederverwendungsstrategien für Batterien hängen unter anderem von den verfügbaren Batteriemengen ab. Ausgehend von unterschiedlichen Rahmenbedingungen kann die zukünftige Anzahl an Fahrzeugen mit Traktionsbatterien stark variieren. Anhand von Analysen zum Aufkommen künftiger End-of-Life Rückläufer (EoL) von Traktionsbatterien kann gezeigt werden, dass ein erhebliches Potenzial zur Verminderung des Primärmaterialbedarfs durch das Recycling von Batterien besteht [9]. Anhand von sozio-ökonomischen Faktoren und Nutzerpräferenzen lassen sich regionale Unterschiede in der Zusammensetzung des Straßenfahrzeugmarkts abbilden (Redelbach et al. [10] umgesetzt im DLR Modell VECTOR21). Die meisten verfügbaren Arbeiten mit diesbezüglichen Szenarien beziehen sich jedoch auf die Entwicklung der Pkw-Märkte mit geographischem Fokus auf Europa oder die USA [11].

Neben dem unklaren künftigen Aufkommen von EoL-Traktionsbatterien erhöhen weitere Unsicherheitsfaktoren die Schwierigkeit bei der Planung von nachhaltigen EoL-Strategien für Lithium-Ionen Batterien. So unterliegen einige Parameter der Batterietechnologie einem steten Wandel. Durch Weiterentwicklung kann bspw. mit einer Erhöhung der durchschnittlichen Lebensdauer der Systeme gerechnet werden. Weiterhin sind bereits heute und während der vergangenen Jahre signifikante Veränderungen der Materialzusammensetzung insbesondere der werthaltigen Kathoden zu beobachten [12]. Diese und weitere Faktoren zeichnen sich durch erhebliche Auswirkungen auf die ökonomische und ökologische Rentabilität der Kreislaufführung von Lithium-Ionen Batterien aus. Ebendiese ökologische Bilanz des Batterierecyclings wird zwar in einigen vorangegangenen Arbeiten detailliert beleuchtet, allerdings ist ein Vergleich verschiedener Herangehensweisen auf Grund unterschiedlicher Betrachtungsrahmen im Sinne einer Ökobilanz unter Beachtung relevanter Wirkkategorien nicht möglich [13, 14]. Um gezielte Maßnahmen in Richtung einer nachhaltigen Mobilität auf den Weg zu bringen, ist eine ganzheitliche Kenntnis von entsprechenden ökologischen Auswirkungen sowie potentiellen Stellhebeln zur Optimierung unabdingbar. Diese Untersuchung stellt diesbezüglich einen ersten und grundlegenden Baustein dar.

2 Ziele der Untersuchung

Zentrale Zielsetzung

Ziel der Untersuchung ist die Identifizierung von Handlungsfeldern und die Erarbeitung von Empfehlungen zur Sicherung lokaler Wertschöpfung sowie strategischer Rohstoffe über alternative Kreislaufstrategien für rückgeführte Batteriesysteme in Baden-Württemberg.

Die vorliegende Untersuchung dient als Sammlung von z. T. voneinander abhängiger aber auch eigenständiger Analysen zur Schaffung eines umfangreichen Überblicks bezüglich Kreislaufstrategien von Batteriesystemen sowie damit einhergehender potentieller Chancen und Problemstellungen im Allgemeinen und im Speziellen für das Bundesland Baden-Württemberg. Abbildung 2 stellt die inhaltlichen Aspekte der Untersuchung, die jeweiligen Betrachtungsebenen sowie die Interdependenzen zwischen den einzelnen Themenkomplexe dar.

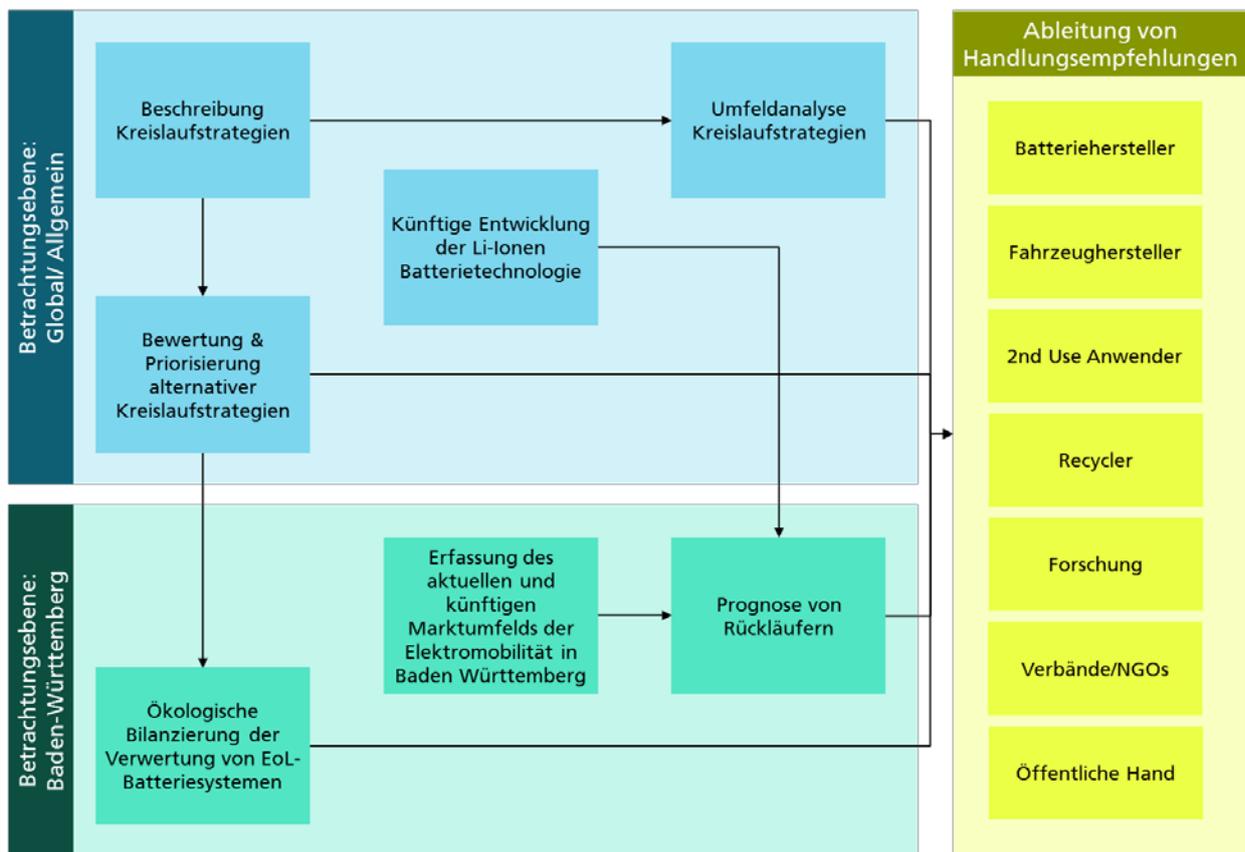


Abbildung 2: Inhaltlicher Aufbau der Untersuchung

Im ersten Teil der Untersuchung werden allgemeine Überlegungen hinsichtlich der Wieder-/Weiterverwertung/-verwendung von Lithium-Ionen Batteriesystemen angestellt und analysiert. Im Sinne eines Top-Down-Denkansatzes soll somit eine detaillierte Grundlage für weiterführende Untersuchungen mit spezifischem Untersuchungsrahmen erarbeitet werden. Hierfür werden zunächst die Bausteine alternativer Wertschöpfungsketten zur Behandlung von EoL-Lithium-Ionen Traktionsbatterien aufgezeigt. Dabei werden sämtliche möglichen Verwertungspfade als Alternativen

beschrieben. Diese Definition und Abgrenzung soll einen detaillierten Überblick über potentielle Kreislaufstrategien im Kontext von EoL-Batteriesystemen liefern und dient, wie in Abbildung 2 dargestellt, den weiteren Themenkomplexen als Ausgangspunkt. Insbesondere der dabei abgebildete Stand der Technik derzeitiger Vorgehensweisen zur Prozessierung von EoL-Batterien wird in nachfolgenden Analysen aufgegriffen. Unterstützt wird diese Arbeit durch eine Umfeldanalyse hinsichtlich derzeit geplanter und etablierter Kreislaufstrategien im nationalen und internationalen Umfeld. Die Darstellung von Best Practices im Rahmen innovativer und proaktiver Gesetzgebung bzw. wirtschaftlicher und funktionierender Konzepte soll Entscheidungsträgern hierzulande als Überblick, Benchmark und Inspiration dienen.

Um eine qualitative und quantitative Basis zur Prognose von künftigen Rücklaufmengen und entsprechenden zu extrahierenden Rohstoffmengen zu schaffen, wird anschließend der State-of-the-Art sowie die erwartete Entwicklung der Lithium-Ionen Batterietechnologie bewertet. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Lebensdauer und die Materialzusammensetzung von Batteriesystemen gelegt. Auf Grund des großen Einflusses der enthaltenen Materialien auf die ökonomische und ökologische Rentabilität von Recyclingprozessen wird dabei auf die Kathodenzusammensetzung fokussiert. Ebenfalls werden die identifizierten Kreislaufstrategien anhand qualitativer Zielkriterien priorisiert. Die Zielkriterien werden mit Hilfe einer Expert*innenbefragung hinsichtlich ihrer Entwicklung bis zum Jahr 2030 bewertet. Durch die implizite Verbindung von Kriterienausprägungen und den Kreislaufstrategien, die diese jeweiligen Entwicklungen bestmöglich abzubilden vermögen, wird eine Auswahl der unter den getroffenen Annahmen sinnvollsten Kreislaufstrategie für das Handling von EoL-Batteriesystemen getroffen.

Der zweite Teil der Untersuchung fokussiert auf den Betrachtungsrahmen Baden-Württemberg und verbindet die allgemeinen Überlegungen des ersten Teils mit standortspezifischen Analysen. So wird eine vergleichende Ökobilanz zwischen dem derzeitigen Ist-Zustand des Batterierecyclings und einer in der vorangegangenen Analyse als sinnvoll bewerteter Kreislaufstrategie durchgeführt. Die hierfür genutzten Daten und Rahmenbedingungen haben nach Möglichkeit den räumlichen Bezug zu Deutschland und respektive Baden-Württemberg. Diese Bilanzierung soll das ökologische Potential der Verwertung von EoL-Batteriesystemen in Baden-Württemberg mittels zweier unterschiedlicher Herangehensweisen aufzeigen. Der ökologische Nutzen der bilanzierten Kreislaufstrategien in den analysierten Wirkkategorien kann unter Berücksichtigung der ambitionierten Klimaziele der Landes- und Bundesregierung als Diskussionsgrundlage hinsichtlich einer Unterstützung bei der Etablierung von regionalen Recyclingnetzwerken genutzt werden. Bekräftigt wird die dahingehende Argumentation durch die Erfassung des aktuellen und künftigen Marktumfelds der Elektromobilität in Baden-Württemberg. Durch die Nutzung eines Szenarien- und Simulationsmodells wird die Nachfrage nach Elektromobilen in Baden-Württemberg für die kommenden Jahre prognostiziert. Durch die Verbindung mit der im ersten Teil abgeleiteten erwarteten Entwicklung der Batterielebensdauer kann die Menge an künftigen EoL-Batterierückläufern zeitlich aufgelöst dargestellt werden. Diese Analyse soll die Planbarkeit von regionalen Rückführungs-/ Aufbereitungs- und Recyclingnetzwerken erleichtern und die Dringlichkeit einer Umsetzung darstellen.

Schließlich münden sämtliche Arbeitsinhalte der Untersuchung in eine Sammlung von Handlungsempfehlungen, die an ausgewählte Stakeholdergruppen gerichtet werden. Die Empfehlungen zielen dabei auf die Etablierung von ökologisch und ökonomisch sinnvollen Kreislaufwirtschaftskonzepten im Kontext von Lithium-Ionen Batterien in Baden-Württemberg

3 Beschreibung der Bausteine alternativer Kreislaufstrategien

Als Grundlage der vorliegenden Untersuchung wird in diesem Kapitel zunächst der Begriff Kreislaufwirtschaft definiert und die entsprechenden Kreislaufstrategien für Batteriesysteme voneinander abgegrenzt.

3.1 Kreislaufwirtschaft

In der Literatur existieren verschiedene Definitionen des Begriffs Kreislaufwirtschaft. Einen Überblick geben unter anderem Kirchherr et al. sowie Geissdoerfer et al. [1, 15]. Im Rahmen einer Literaturrecherche haben Geissdoerfer et al. die unterschiedlichen Definitionen verglichen und folgende zusammenfassende Definition für den Begriff Kreislaufwirtschaft vorgeschlagen: "*A regenerative system in which resource input and waste, emission, and energy leakage are mini-mised by slowing, closing, and narrowing material and energy loops. This can be achieved through long-lasting design, maintenance, repair, reuse, remanufacturing, refurbishing, and recycling*" [1].

Ziel ist es, sowohl die Erschöpfung natürlicher Rohstoffe, als auch die endgültige Entsorgung von Abfall- und Wertstoffen durch bspw. Deponierung vollständig abzuschaffen [2]. Stattdessen sollen einmal genutzte Ressourcen so lange wie möglich im Kreislauf gehalten werden. Dies wird durch das Schließen von Stoffkreisläufen und die branchenübergreifende Verkettung ermöglicht, bei der als Abfall anfallende Ressourcen erneut als Input für weitere Prozesse verwendet werden (nach Möglichkeit ohne Verringerung der Produkt- bzw. Materialqualität [3, 4]. Dieser zentrale Aspekt der Kreislaufwirtschaft kann unter dem Begriff Kaskadennutzung zusammengefasst werden.

Die Kaskadennutzung ist eine Form der Nutzung von Rohstoffen oder daraus hergestellten Produkten, in der eine stoffliche Nutzung so lange und so häufig wie möglich durchgeführt wird und erst nach Ausschöpfung aller technologisch, ökonomisch und ökologisch sinnvollen Möglichkeiten eine energetische Verwendung stattfindet. Dabei werden sogenannte Nutzungskaskaden durchlaufen, die von höheren Wertschöpfungsniveaus in tiefere Niveaus fließen. Hierdurch wird die Rohstoffproduktivität gesteigert [16].

In Deutschland ist die Kaskadennutzung durch die Abfallhierarchie in § 6 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) gesetzlich verankert. Demnach sollen Abfälle in erster Regel vermieden werden, falls dies nicht möglich ist, wird eine Vorbereitung zur Wiederverwendung angestrebt und falls dies ebenfalls nicht möglich ist ein Recycling durchgeführt. Erst dann soll Abfall für eine energetische Verwertung und zur Verfüllung genutzt werden, bzw. beseitigt werden, siehe Abbildung 3.



Abbildung 3: Abfallhierarchie nach § 6 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes

Im Rahmen der Untersuchung „Kreislaufstrategien für Batteriesysteme in Baden-Württemberg“ wird insbesondere auf die Maßnahmen „Vermeidung“, „Vorbereitung zur Wiederverwendung“ und „Recycling“ des Kreislaufwirtschaftsgesetzes eingegangen.

Die VDI-Richtlinie 2243 legt ebenfalls eine hierarchische Beziehung zwischen den Maßnahmen fest, allerdings umfasst der Recyclingbegriff hier sowohl eine erneute Verwendung als auch die Verwertung des Produktes am Ende der Nutzungs- bzw. Gebrauchsdauer, siehe Abbildung 4. Darüber hinaus wird eine Unterscheidung zwischen der Wiederverwendung, also der erneuten Nutzung für denselben Verwendungszweck, und der Weiterverwertung, also der Nutzung für einen anderen als den ursprünglichen Verwendungszweck vorgenommen [17]. Ebenfalls kann zwischen der Wiederverwertung, also der Auflösung der Produktgestalt und Rückführung der Materialien und Rohstoffe zur Herstellung des ursprünglichen Produktes, und der Weiterverwertung, bei der die Materialien und Werkstoffe für die Herstellung anderer Produkte verwendet werden, unterschieden werden [18].

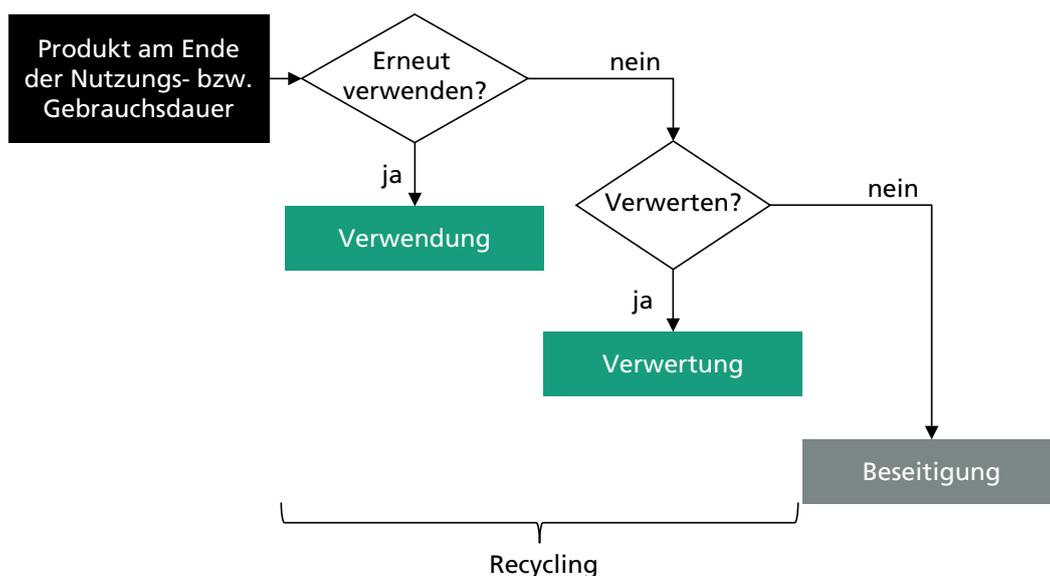


Abbildung 4: Recycling-Kaskade, eigene Darstellung nach [17]

Die Kaskadennutzung und die damit verbundenen Kreislaufstrategien lassen sich mit dem Butterfly Diagramm der Ellen MacArthur Foundation veranschaulichen, siehe Abbildung 5 [4]. Dabei wird zwischen biologischen Kreisläufen (links) und technischen Kreisläufen (rechts) unterschieden. Aufgrund der Analyse von Kreislaufstrategien für Batteriesysteme werden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ausschließlich die technischen Kreisläufe betrachtet.

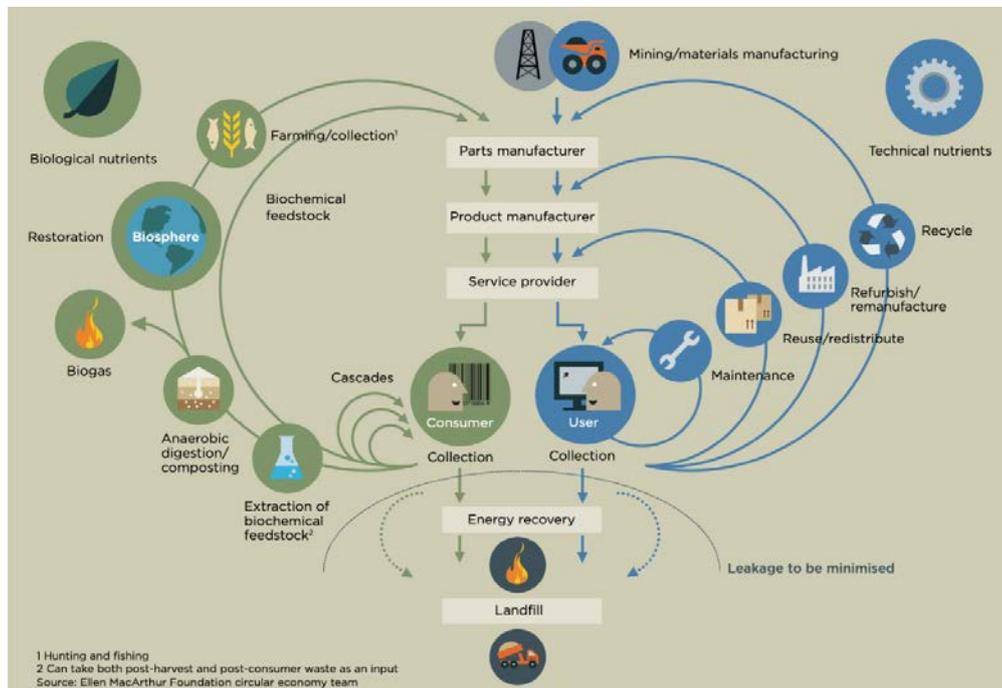


Abbildung 5: „Butterfly“ Diagramm [4]

Für die Kreislaufführung existiert eine Vielzahl an Kreislaufstrategien, die sich nach verschiedenen Kriterien klassifizieren und strukturieren lassen, beispielsweise hinsichtlich des Grads der Demontage oder nach dem Ergebnis in Form des Produkt- bzw. Materialrecyclings [19]. Die Anzahl der Kreislaufstrategien, die für ein Produkt genutzt werden können ist nicht einheitlich definiert und unterscheidet sich je nach Untersuchung stark [5]. So können beispielsweise basierend auf der Arbeit von Potting et al. insgesamt neun verschiedene Kreislaufstrategien („9R-Framework“) definiert werden [20]. Diese gliedern sich in die drei Kategorien „smarter product use and manufacture“ (intelligenterer Produktnutzung und -herstellung), „extend lifespan of products and its parts“ (Lebensdauer von Produkten und deren Teile verlängern) sowie „useful application of materials“ (sinnvolle Verwendung von Materialien) [20]. Die Arbeit von Parker et al. umfasst dagegen insgesamt 15 Kreislaufstrategien, während andere Autoren deutlich nur einzelne, bzw. zwei bis drei der Kreislaufstrategien betrachten [21, 22]. Für eine Übersicht der Anzahl verwendeter Kreislaufstrategien in insgesamt fast 70 Veröffentlichungen, siehe Reike et al. [5]. Die Ursachen für die unterschiedliche Anzahl berücksichtigter Kreislaufstrategien sind vielfältig und umfassen zum einen die teils nicht einheitliche Definition der Begriffe zur Beschreibung der Kreislaufstrategien sowie Synonymen und die zum Teil darauf basierende unterschiedliche Interpretation sowie den zugrunde gelegten Abstraktionsgrad der Analyse.

Für die vorliegende Untersuchung werden die im British Standard 8887-2:2009 auf Basis eines generischen Produktlebenszyklus festgelegten Kreislaufstrategien als Ausgangsbasis verwendet [23].

Diese decken sich in weiten Teilen mit dem 9R-Framework von Potting et al. [20] und umfassen die Kreislaufstrategien Reuse, Repurpose, Remanufacture, Recondition, Recycle und Dispose. Weil die Anwendbarkeit der genannten Kreislaufstrategien sehr stark vom betrachteten Produkt abhängig ist, werden diese in einem nächsten Schritt weiter eingeschränkt [18].

Als Systemgrenze für die Beschreibung der Bausteine der alternativen Wertschöpfungspfade bzw. Kreislaufstrategien werden die bereits produzierten und in einem Elektrofahrzeug verbauten Batteriesysteme gewählt, das heißt, der Herstellungsprozess des Batteriesystems und dessen Einbau in ein Fahrzeug ist nicht Teil der Betrachtung in dieser Untersuchung, auch wenn hier ebenfalls Potenziale zur Steigerung der Ressourceneffizienz bestehen. Daher werden die Kreislaufstrategien der Kategorie „smarter product use and manufacture“ im Folgenden nicht näher analysiert. Auch die Kreislaufstrategie „Dispose“ wird nicht betrachtet, denn diese entspricht weitestgehend einer Beseitigung der anfallenden Abfälle, wodurch nur indirekt ein Input für Folgeprozesse generiert werden kann. Reconditioning wird in dieser Untersuchung der Kreislaufstrategien für Batteriesysteme ebenfalls nicht gesondert betrachtet, sondern fällt im Folgenden unter die Kreislaufstrategie Remanufacturing, denn die beiden Kreislaufstrategien unterscheiden sich unter Berücksichtigung des British Standards 8887-2:2009 nur in wenigen und teils schwierig voneinander abgrenzbaren Details, wie dem geringeren Aufwand bei Reconditioning im Vergleich zu Remanufacturing [23].

Ebenfalls werden in dieser Untersuchung die Möglichkeiten zur erneuten Verwendung, also der Wiederverwendung (engl. Reuse) und der Weiterverwendung (Repurpose) als eine gemeinsame Kreislaufstrategie betrachtet, wobei der Fokus hier auf der Weiterverwendung (Repurpose) liegt, denn in der Regel sind die Batteriesysteme aus Elektrofahrzeugen für eine Wiederverwendung nicht geeignet, wobei diese Kreislaufstrategie nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann. Mit dem Begriff Recycling wird ebenfalls sowohl die Wieder- als auch die Weiterverwertung berücksichtigt.

Die Systemgrenze der nachfolgenden Betrachtung beinhaltet den Ausbau des Batteriesystems aus dem Elektrofahrzeug sowie den erneuten Einsatz in einem Elektrofahrzeug, einer Second-Life-Anwendung oder alternativ das stoffliche Recycling der Rohmaterialien. Die Prozessketten von Reuse, Repurpose, Remanufacturing und Recycling von Lithium-Ionen Batteriesystemen sind in Abbildung 6 dargestellt.

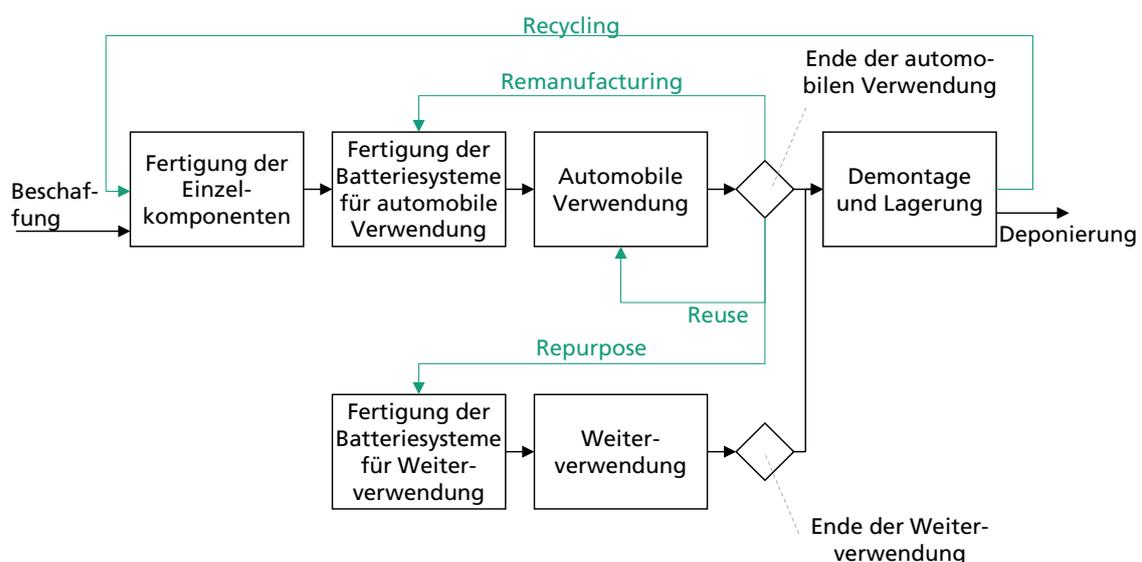


Abbildung 6: Kreislaufstrategien für Batteriesysteme, eigene Darstellung in Anlehnung an [19]

Zu Beginn der gesamten Prozesskette erfolgt der Ausbau aus dem Fahrzeug. Das Batteriesystem ist zumeist am Fahrzeugboden angebracht und kann mit Hilfe von Spezialwerkzeug ausgebaut werden [24].

Anschließend werden zur Informationsgewinnung sämtliche verfügbaren Daten des Lithium-Ionen Batteriesystems erhoben. Zur problemlosen Informationsgewinnung ist eine Datenstruktur hilfreich, welche Stamm-, Transaktions- sowie Statusdaten erfasst. Stammdaten beinhalten allgemeine Informationen über den Aufbau des Batteriesystems. Statusdaten zeichnen entlang des gesamten Lebenszyklus den aktuellen Gesundheitszustand des Batteriesystems auf, während Transaktionsdaten Auskunft über die Nutzungshistorie des Batteriesystems geben [18, 25].

Ein entsprechendes System zur Erfassung solcher Daten kommt bereits für alle seit 2018 produzierten Batteriesysteme in China zum Einsatz. Dort wird jedes Batteriesystem mit einer eindeutigen ID codiert. Die Codierung wird anschließend von allen Beteiligten entlang der Wertschöpfungskette genutzt, um bei Weiterverarbeitung/Veränderung die Daten zu aktualisieren und auf die Rückverfolgungsmanagement-Plattform hochzuladen, siehe hierzu auch Abschnitt 4.3 der Untersuchung [26]. Durch diese eindeutige Codierung der Batteriesysteme können darüber hinaus noch weitere Potenziale bei der Kreislaufführung von Batteriesystemen erschlossen werden, beispielsweise hinsichtlich einer zielgerichteten und automatisierten Demontage. Auf die Rückverfolgbarkeit (Traceability) von Batteriesystemen wird auch in Abschnitt 9 (Handlungsempfehlungen) eingegangen.

Die ermittelten Stamm-, Transaktions- sowie Statusdaten werden von verschiedenen Parametern beeinflusst (siehe Tabelle 1) und dienen somit als Entscheidungshilfe zur Wahl einer geeigneten Kreislaufstrategie für das Lithium-Ionen Batteriesystem.

Tabelle 1: Parameter zur Bewertung der Stamm-, Transaktions- und Statusdaten [18, 25, 27]

Kategorie	Parameter
Stammdaten	<ul style="list-style-type: none"> - Zellchemie - Bauform der Zellen - Anzahl der Zellen je Modul - Anzahl der Module - Informationen zum BMS - Informationen zum Thermomanagement
Transaktionsdaten	<ul style="list-style-type: none"> - Bisherige Zyklenzahl - Kalendarische Nutzungsdauer - Bekannte Probleme - Halter der erweiterten Herstellerverantwortung - Bereits vorgenommene Kreislaufstrategien
Statusdaten	<ul style="list-style-type: none"> - Restkapazität (SoH) - Innenwiderstand - Ladezustand (SoC) - Entladetiefe (DoD) - Betriebstemperatur

Die Stamm-, Transaktions- und Statusdaten sowie deren Parameter können mit Hilfe von Informationssystemen in Kombination mit der Datenstruktur ausgelesen und dargestellt werden [18]. Eine exemplarische Darstellung der Stammdaten mittels der Datenstruktur ist in Abbildung 7

dargestellt. Falls die Datenstruktur nicht vorhanden ist, müssen die erforderlichen Daten manuell mittels elektrischer Tests bestimmt werden [18]. Der entsprechende Aufwand steigt somit signifikant.

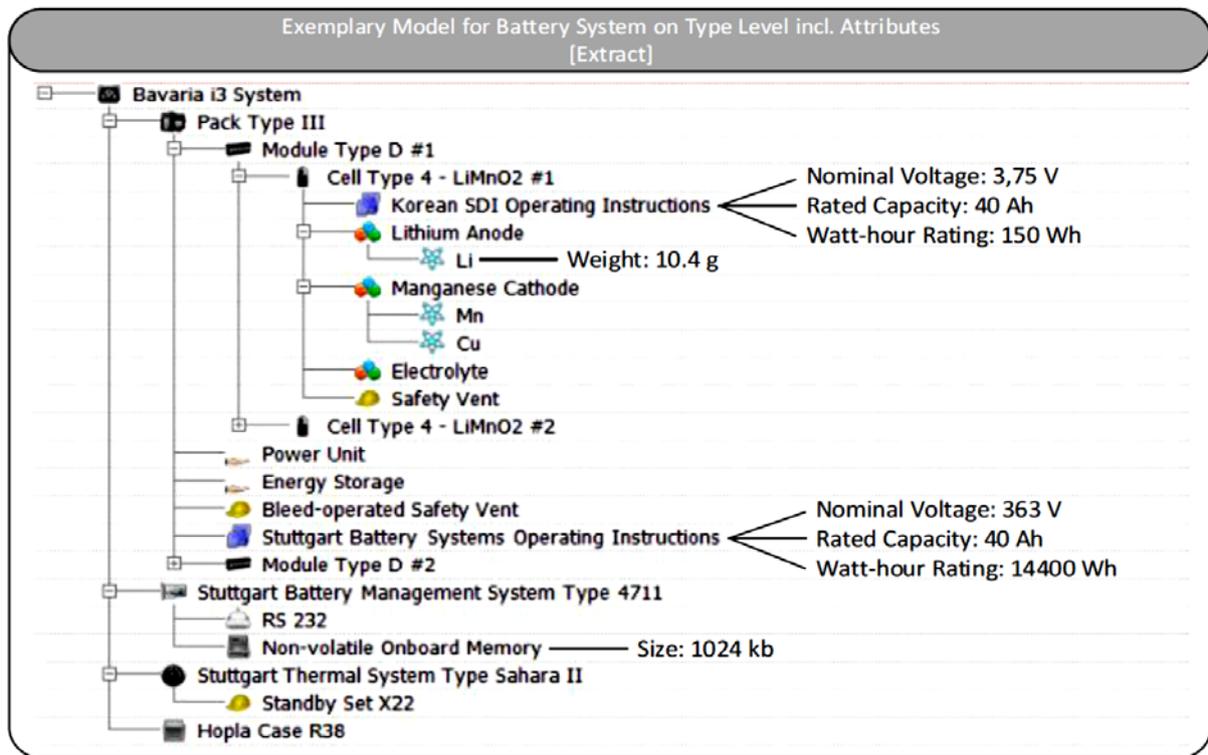


Abbildung 7: Exemplarische Darstellung der Stammdaten eines Batteriesystems [28]

Die Stammdaten dienen als Grundlage für alle weiteren Prozessschritte. Beispielsweise dürfen beim Remanufacturing und dem damit verbundenen Tausch der Batteriezellen nur einheitliche Zellen mit gleicher Form und Zellchemie zum Einsatz kommen, weshalb Kenntnisse zur vorliegenden Zellchemie essenziell sind. Da zudem eine Entwicklung der Batteriezellen hin zu verbesserten und günstigeren Zellchemien erwartet wird, kann bereits mit Hilfe der Stammdaten abgewägt werden, ob ein erneuter Einsatz des Batteriesystems mit eventuell veralteter Zellchemie wirtschaftlich sinnvoll ist. [25, 29].

Die Transaktionsdaten stellen neben den Stammdaten weitere Kennwerte zur Wahl einer geeigneten Kreislaufstrategie dar. So stellen die bisherige kalendarische sowie zyklische Lebenszeit wichtige Parameter dar, um eine geeignete Kreislaufstrategie zu wählen [27]. Die Auskunft über potentiell bereits durchlaufene Kreislaufstrategien kann außerdem aufwändige Tests ersparen, da Batteriesysteme, die bereits einmal aufgearbeitet wurden oder bereits in einer Second-Life-Anwendung zum Einsatz kamen, z. T. aus Sicherheitsaspekten dem stofflichen Recycling zugeführt werden [30].

Die Statusdaten charakterisieren den Zustand des Lithium-Ionen Batteriesystems. Sie stellen ein weiteres ausschlaggebendes Entscheidungskriterium zur Wahl einer geeigneten Kreislaufstrategie dar, da sie unmittelbare Auswirkungen auf die Lebensdauer des Batteriesystems haben. Ein entscheidender Parameter für die Wahl der passenden Kreislaufstrategie stellt der SoH des Batteriesystems dar. Der SoH eines Batteriesystems ist insbesondere von der maximalen Zyklenanzahl, dem Betrieb bei hohem und niedrigem Ladezustand (SoC Bereich), der Temperaturtoleranz und der maximalen Stromstärke (C-Rate) abhängig, siehe hierzu auch Kapitel 5.2.1 [27]. Die im Folgenden

verwendeten SoH-Werte basieren auf Literaturrecherchen und wurden durch eine spätere Expert*innenbefragung validiert.

Nach der Informationsgewinnung findet unter Berücksichtigung der beschriebenen Daten und Parameter die entscheidende Zustandsbewertung des Batteriesystems statt [18, 27]. Daraus kann anschließend eine passende Kreislaufstrategie für das vorliegende Batteriesystem abgeleitet werden. Diese Entscheidung ist von besonderer Bedeutung, da ein Batteriesystem mit einem SoH von 80 % noch immer einen monetären Restwert von etwa 70-75 % eines neuen Batteriesystems besitzt [31, 32].

3.2 Reuse/Repurpose

Reuse von Lithium-Ionen Batteriesystemen kommt zur Anwendung, wenn das ausgebaute Batteriesystem für den identischen Verwendungszweck wiederverwendet wird, also, wenn der Zustand des ausgebauten Batteriesystems neuwertig ist. Das Batteriesystem kann ohne Aufbereitungsschritte erneut in einer EV-Anwendung eingesetzt werden. Dazu wird das Batteriesystem vorerst gelagert und anschließend nach Bedarf zum Einbauort transportiert und im Fahrzeug eingebaut [18]. Zwar wird Reuse als Begriff bereits bei verschiedenen OEM als Kreislaufstrategie genannt, allerdings findet hier keine Wieder- sondern eine Weiterverwendung (Repurpose) statt [33]. Eine Wiederverwendung von Batteriesystemen für den ursprünglichen Verwendungszweck wird im industriellen Maßstab bislang nicht durchgeführt.

In der Praxis sind die Einsatzmöglichkeiten dieser Kreislaufstrategie gering, denn in der Regel werden die Batteriesysteme aufgrund des Unterschreitens eines SoH-Grenzwertes aus einem Elektrofahrzeug ausgebaut und eignen sich nicht für die Wiederverwendung in einem anderen Elektrofahrzeug. Ein Batteriesystem, welches also bereits einen SoH von 80% unterschritten hat, eignet sich nicht für den erneuten Einsatz in einer EV-Anwendung und schließt damit die Kreislaufstrategie Reuse aus [34].

Stattdessen wird, wenn sich die Batteriesysteme nicht mehr für den Einsatz in EV-Anwendungen eignen, meist ein Repurpose, also die Weiterverwendung in einem anderen Verwendungszweck, angestrebt. Statt in einem Elektrofahrzeug werden die Batteriesysteme daraufhin in Second-Life-Anwendungen eingesetzt [35].

Dazu werden die Batteriesysteme im ersten Schritt bis auf Modulebene demontiert, um im folgenden Schritt ein Austausch des BMS vorzunehmen [25]. Das BMS unterscheidet sich in der Regel je nach Anwendung und muss dementsprechend für die Second-Life-Anwendung ausgelegt sein [35, 36]. Das ausgebaute BMS wird anschließend dem Recycling zugeführt. Eine Zuführung des BMS in den Remanufacturing-Prozess wäre ebenfalls denkbar. Mit Hilfe des BMS findet anschließend eine Neukonfiguration der Zellen statt [36]. Alle weiteren Komponenten werden gereinigt und alle Verschleißteile, wie Schrauben und Dichtungen, ausgetauscht [35]. Anschließend kann das Batteriesystem wieder mit Hilfe der anwendungsspezifischen Spezifikation aufgebaut werden [36]. Es ist ebenfalls möglich, dass eine größere Anzahl an Batteriemodulen aus mehreren Batteriesystemen gemeinsam zu einem großen Batteriesystem assembliert werden, um die Anforderungen der Second-Life-Anwendung zu erfüllen [25]. Dazu müsste jedoch ein neues Gehäuse verwendet werden [25]. Das fertiggestellte Batteriesystem wird anschließend gelagert und zum Standort der Second-Life-Anwendung transportiert. Im letzten Schritt wird das System in der entsprechenden Anwendung eingebaut. Häufig handelt es sich dabei um stationäre Anwendungen

zur dezentralen Speicherung der Energie aus erneuerbaren Energiequellen [35]. Ist dies nicht möglich, stellt das Remanufacturing eine Alternative zum Recycling dar.

3.3 Remanufacturing

Remanufacturing von Lithium-Ionen Batteriesystemen wird dann durchgeführt, wenn das Batteriesystem nicht mehr den Anforderungen von Reuse/Repurpose genügt. Der Prozess des Remanufacturings von Batteriesysteme beinhaltet die fünf klassischen Prozessschritte [37, 38]. Im ersten Schritt muss das Batteriesystem demontiert werden [32, 36]. Ob die Demontage des Batteriesystems auf Zellniveau oder Modulniveau erfolgt, hängt maßgeblich von der Anzahl der Module bzw. Zellen und dem damit verbundenen Aufwand der Demontage, sowie dem Kosten-Nutzen-Verhältnis ab. Zwar gibt es mit der Daimler AG bereits einen OEM, der sich mit dem Remanufacturing auf Zellebene befasst, dies bildet jedoch die Ausnahme, denn oft ist dies konstruktionsbedingt, z.B. durch verklebte Zellen, nicht anwendbar [39, 40]. Aktuelle Forschungsprojekte befassen sich damit, dies zukünftig zu ermöglichen [41]. Anschließend werden alle Batteriezellen geprüft, da die Abnahme der Gesamtkapazität des Batteriesystems nicht gleichbedeutend mit der Degradierung jeder einzelnen Batteriezelle ist. So kann der Leistungsverlust einer Batteriezelle zu erheblichem Leistungsverlust des gesamten Batteriesystems führen [35]. Die Batteriezellen, die nicht ausgefallen sind und noch die geforderten Ladungseigenschaften besitzen, können also weiterverwendet werden [36]. Etwa 15 % der Batteriezellen bestehen diese Prüfung nicht und müssen deshalb ersetzt werden [31]. Es kommen entweder neue oder funktionstüchtige Batteriezellen aus anderen demontierten Batteriesystemen gleicher Art zum Einsatz [36]. Die ersetzten defekten Batteriezellen werden dem Recyclingprozess zugeführt [36]. Die restlichen 85 % der Zellen, die die Ladung noch halten können, werden weiterverwendet [35]. Da sich das Verhalten des Batteriemoduls an den Eigenschaften der schwächsten Zelle orientiert, sollten Batteriezellen mit gleichen Kennwerten miteinander verknüpft werden [32]. Dazu werden die Batteriezellen einerseits innerhalb des Batteriesystems zwischen den Batteriemodulen getauscht und andererseits werden weitere Batteriezellen durch Zellen aus anderen Batteriesystemen ersetzt, siehe hierzu auch Abbildung 8 [35].

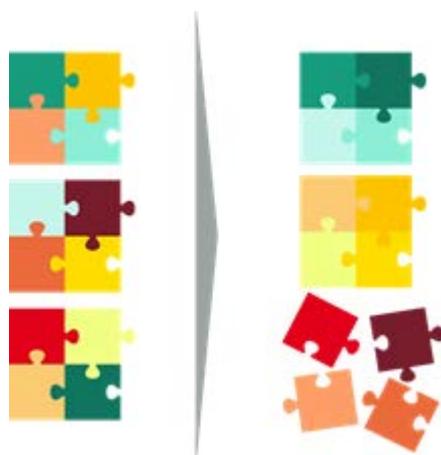


Abbildung 8: Darstellung der unterschiedlichen Alterung von Batteriesystemen (links) und neue Zusammenstellung vergleichbarer Zustände (rechts) [42]

Eine andere Form des Remanufacturing von Batteriesystemen sieht den regelmäßigen Austausch, bspw. nach 2.000 Zyklen, von 5 bis 30 % der Batteriezellen vor, wodurch das Batteriesystem wieder auf einen SoH von fast 100 % gebracht werden kann [43]. Wenn die Auswahl der Batteriezellen feststeht, werden im folgenden Schritt alle Verschleißteile ersetzt. Dies sind im Allgemeinen Teile, wie etwa Schrauben oder Dichtungen, die einen geringen Wert besitzen, aber dennoch von großer Bedeutung für die Funktion des Batteriesystems sind [38]. Alle weiteren Komponenten werden im nächsten Schritt gereinigt, um sie anschließend bewerten zu können [27, 31, 32]. Häufig werden hierbei visuelle Tests, wie beispielsweise zur Prüfung des Gehäuses, eingesetzt, siehe Tabelle 2 für eine Übersicht [18].

Tabelle 2: Beispiele für visuelle Prüfungen von Batteriesystemen, [18]

Kategorie	Parameter
Gehäuse	<ul style="list-style-type: none"> - Risse - Deformationen - Verfärbungen - Roststellen
Elektronik	<ul style="list-style-type: none"> - Schäden an der Kontaktierung
Weitere Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> - Verfärbungen - Roststellen - Sonstige Auffälligkeiten

Eine positive Bewertung der Komponenten erlaubt deren erneute Verwendung [32]. Anderenfalls wird die entsprechende Komponente durch ein neues Ersatzteil oder ein funktionierendes Teil aus einem anderen Lithium-Ionen Batteriesystem ausgetauscht [44]. Die ausgetauschten Komponenten werden wiederum dem Recycling zugeführt.

Alle funktionstüchtigen Batteriezellen und weiteren Komponenten werden anschließend nach den OEM-Spezifikationen wieder zu einem Batteriesystem aufgebaut [32, 36]. Die Batteriezellen müssen zudem balanciert werden, damit alle Batteriezellen den gleichen Zustand innehaben und das Batteriesystem somit keine Schwachstellen besitzt [35]. Im letzten nachgelagerten Schritt findet eine Endprüfung gemäß OEM-Spezifikationen statt [32, 44]. Das Batteriesystem wird anschließend gelagert, nach Bedarf transportiert und in das Fahrzeug eingebaut [18]. Ist aufgrund des stark degradierten Zustands weder ein Einsatz in EV-Anwendungen noch in Second-Life-Anwendungen und auch kein Remanufacturing möglich, so muss das Batteriesystem recycelt werden [18].

3.4 Recycling

Recycling von Lithium-Ionen Batteriesystemen wird dann angewendet, wenn aufgrund der fortgeschrittenen Alterung oder anderer Hemmnisse eine höherwertige Kreislaufstrategie wirtschaftlich nicht sinnvoll ist [25]. Aus Sicht der genannten Leistungsparameter müssen etwa 15 % der ausgebauten Batteriesysteme aufgrund ihres schlechten Zustands recycelt werden. Die restlichen 85 % der Batteriesysteme könnten theoretisch mittels einer höherwertigen Kreislaufstrategie erhalten werden [25].

In der Regel müssen zudem auch solche Batteriesysteme, die bereits einem Reuse/Repurpose oder Remanufacturing zugeführt wurden, anschließend recycelt werden [18, p. 55]. Somit gilt zu

beachten, dass trotz höherwertiger Kreislaufstrategien früher oder später stets ein Recycling erfolgt und im Idealfall sämtliche Batteriesysteme am Ende recycelt werden [45].

Recycling für Lithium-Ionen Batteriesysteme kann dabei mittels verschiedener Verfahren erfolgen, grundsätzlich können Lithium-Ionen Batteriesysteme durch das hydrometallurgische, das pyrometallurgische oder das mechanische Verfahren oder eine Kombination dieser Verfahren recycelt werden, siehe Abbildung 9 [25, 32, 46]. In Abhängigkeit der Zellchemie und anderer Faktoren eignen sich unterschiedliche Verfahren bzw. deren Kombination für das Recycling der entsprechenden Batteriezelle [34]. Durch diese Verfahren können die Rohmaterialien der Batteriezelle in verschiedenem Umfang und Qualität gewonnen werden [25]. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Rückgewinnung von Materialien wie Kobalt, Nickel, Mangan, Kupfer und Lithium [47]. Diese Materialien werden anschließend je nach vorangegangener Prozessierung weiter aufbereitet, sodass sie sich für die Produktion von neuen Batteriezellen oder anderen Produkten eignen [30, 48].

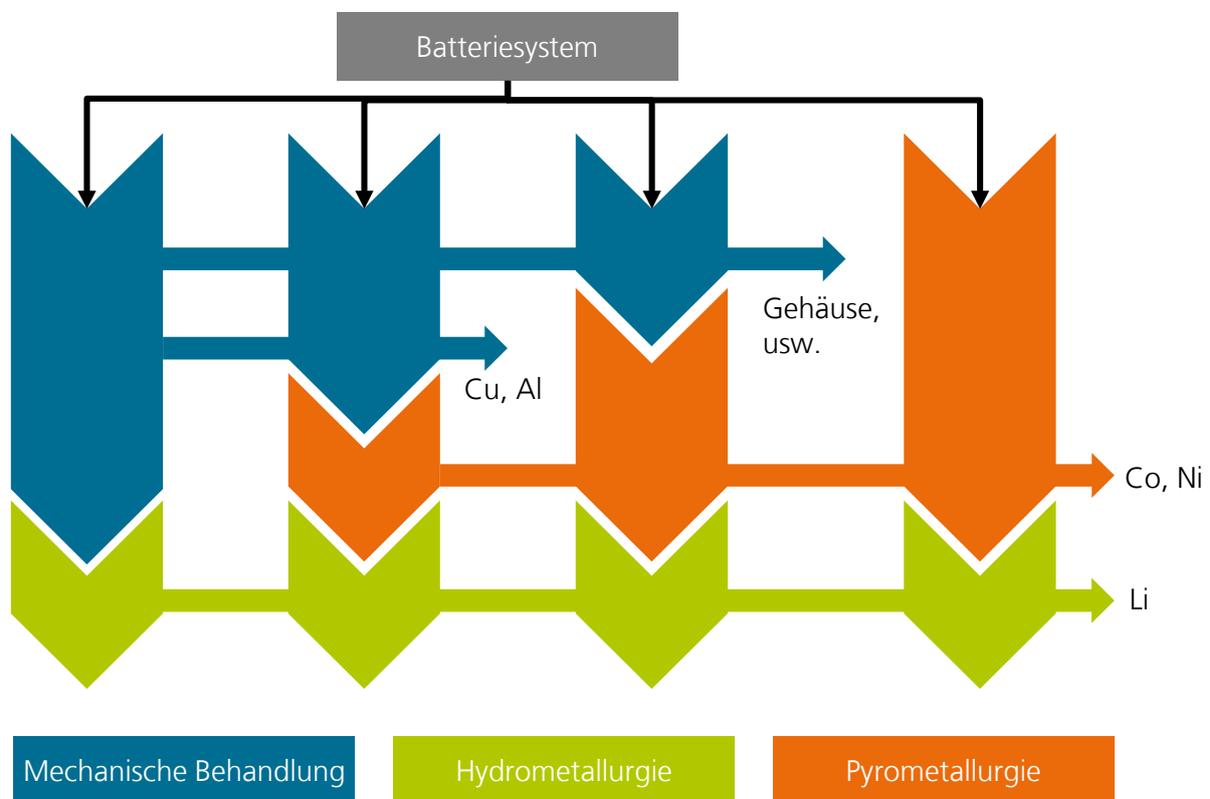


Abbildung 9: Grundoperationen und Prozesswege zum Recycling von Lithium-Ionen Batteriesystemen, eigene Darstellung in Anlehnung an [46]

Diesen speziellen Recyclingverfahren sind gemeinsame Prozessschritte vor- und nachgelagert, die nachfolgend im Allgemeinen beschrieben werden.

Im ersten Schritt werden die Batteriesysteme zur Vorbereitung auf den eigentlichen Recyclingprozess vollständig bis auf die Modul-/ Zellebene demontiert [48]. Die anfallenden Materialien werden anschließend in verschiedene Fraktionen, wie Aluminium, Kupfer und Plastik geteilt [49]. Die Materialfraktionen werden gesammelt und anschließend zu entsprechend spezialisierten Recyclingunternehmen transportiert [48]. Das Recycling dieser Materialien ist seit geraumer Zeit im industriellen Maßstab möglich. Die jeweiligen Unternehmen können dementsprechend hohe

Rückgewinnungsquoten vorweisen. Die gewonnenen Rohmaterialien werden anschließend an Unternehmen geliefert, die diese in der Produktion von neuen Batteriesystemen oder auch anderen Produkten einsetzen (Wieder- bzw. Weiterverwertung) [25, 30].

Die wichtigste Materialfraktion, die bei der Demontage bis auf die Modul-/ Zellebene anfällt, ist allerdings das Modul, bzw. die Batteriezelle selbst. Der Wert der Batteriezellen beträgt etwa 2/3 des gesamten Batteriesystems, weshalb deren Recycling eine besondere Bedeutung zukommt [32]. Bevor die Batteriezellen dem eigentlichen Recyclingverfahren zugeführt werden können, müssen diese deaktiviert werden, um die Sicherheit während der Weiterverarbeitung zu gewährleisten. Die Deaktivierung der Batteriezelle wird zumeist durch Zerkleinern oder Pyrolyse erzielt. An die Deaktivierung schließt das eigentliche Recyclingverfahren an [47]. Recycling stellt somit das endgültige Produktlebensende des Lithium-Ionen Batteriesystems dar.

Einen Ausblick auf eine zukünftige Kreislaufführung von Batteriesystemen nach deren Ausbau aus dem Fahrzeug bietet Abbildung 10. Dort werden die für eine Second-Life-Anwendung geeigneten Batterien aus einem Fahrzeug ausgebaut, von einem Recyclingunternehmen für den Einsatz vorbereitet (je nach Zustand durch die Kreislaufstrategie Repurpose oder Remanufacturing) und anschließend als Neuprodukt auf den Markt gebracht, wodurch ein vollständig neuer Produktlebenszyklus beginnt. Erst nach dem Einsatz bspw. als dezentraler stationärer Energiespeicher wird das Batteriesystem am Ende des zweiten Produktlebenszyklus recycelt [25]. Denkbar ist die Aufbereitung der Batteriesysteme selbstverständlich ebenfalls durch OEM oder andere Marktteilnehmer.

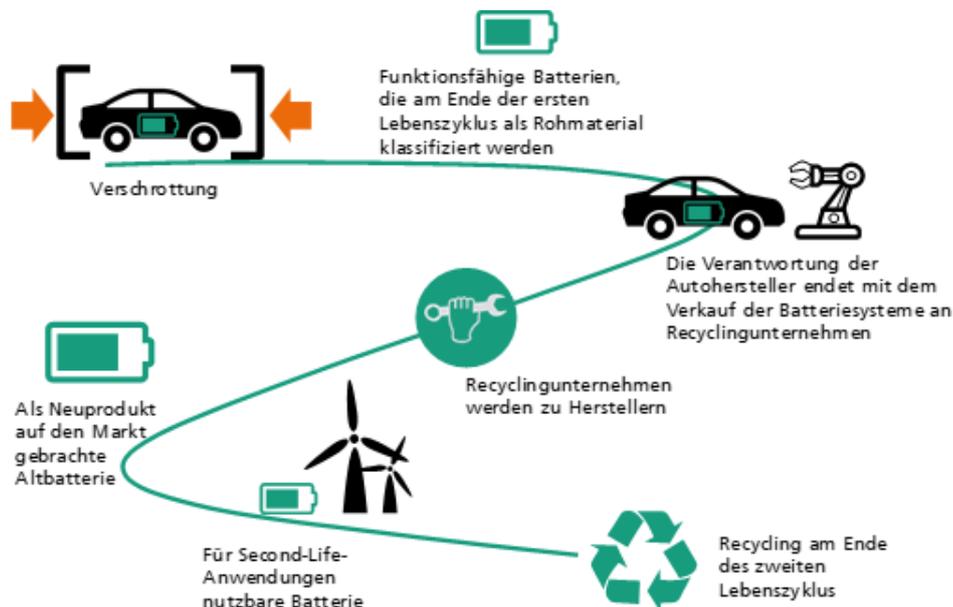


Abbildung 10: Exemplarische Darstellung einer zukünftigen Wertschöpfungskette von Second-Life-Batterien. Eigene Darstellung nach [25]

4 Umfeldanalyse zu Kreislaufstrategien für Batterien im nationalen und internationalen Kontext

Die Rückgewinnung von Rohstoffen aus Elektrofahrzeugen und insbesondere Batterien ist nicht nur ein Thema, das in Baden-Württemberg an Relevanz gewonnen hat, sondern auch in anderen Regionen weltweit. Im Folgenden werden daher sowohl die bestehenden Rahmenbedingungen für die End-of-Life Prozesse im Bereich Recycling von Traktionsbatterien in Deutschland als auch in anderen Ländern dargestellt. Aufgrund ihrer Relevanz für den Fahrzeug- und Recyclingmarkt werden an dieser Stelle die USA, China und Japan näher betrachtet. Der Schwerpunkt der Analyse liegt auf der bestehenden Umsetzung verschiedener End-of-Life und Kreislauf-Optionen für Batterien sowie einem kurzen Überblick über Forschungsaktivitäten in diesem Bereich.

4.1 Deutschland

4.1.1 Regulierung

Die für Traktionsbatterien derzeit relevanten Vorschriften finden sich in der seit 2006 geltenden EU Richtlinie 2006/66/EG über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren und in der seit 2000 geltenden Richtlinie 200/53/EC über Altfahrzeuge. Die Traktionsbatterien der E-Fahrzeuge gelten in der Batterierichtlinie als Industriebatterien und unterliegen den für diese Gruppe geltenden Regeln. Ein Aspekt ist hierbei die Herstellerhaftung. Diese schreibt vor, dass die Batterieproduzenten für die Kosten des Sammel-, Aufbereitungs- und Recyclingsystems aufkommen. In der Regel gibt je nach Herkunft der Batterien daher der OEM oder der zuliefernde Batteriehersteller einen Vertragspartner an, dem die Entsorgungsaufgabe übertragen wird [50]. Diese Informationen sind im BattG-Melderegister des Umweltbundesamts veröffentlicht [51]. Dafür, dass die Batterie diesem System zugeführt wird, ist wiederum der Fahrzeughalter verantwortlich.

Weiterhin gibt die Altbatterie-Verordnung vor, dass Industriebatterien bei den Vertriebern oder Sammelstellen zurückgegeben und mindestens 50 % der Rohstoffe von Li-Ionen Akkus, die der Untergruppe „sonstige Batterien“ zugeordnet werden, wieder verwendet werden müssen. Unter dem Gesichtspunkt der Rückgewinnung strategischer Rohstoffe kann diese Quote als eher niedrig angesehen werden [52]. Angesichts der Gewichtsanteile verschiedener Komponenten in Batterien, reicht die in den Altbatterie-Richtlinien geforderte Materialrückgewinnungsquote von 50% nicht aus, um eine flächendeckende Rückgewinnung der Elektrodenwerkstoffe zu gewährleisten. Oft wird die geforderte Quote bereits durch die Wiedergewinnung von Metallen aus der Batterieverkleidung, Verkabelungen und anderen Peripherieteilen erreicht. Angesichts der geltenden Mindestsammelquote von 45 % als Durchschnitt über alle Altbatterien wird die technisch mögliche Rückgewinnungsquote nicht durch entsprechende gesetzliche Maßnahmen gestützt. Für Deutschland gibt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) für „sonstige Batterien“ eine Sammelquote von 43 % bei einer Recyclingquote von 84 % an [53]. Seitens einiger Umweltverbände wird angemerkt, dass das derzeitige System durch die relativ niedrig angesetzten Sammel- und Recyclingquoten weder der Vielzahl verschiedener Batterietypen gerecht wird noch Anreize für eine höhere Sammel- und Rückgewinnungsquoten setzt [54]. Insbesondere fehlen spezifische Ziele für Industriebatterien, die zudem im Gegensatz zu Gerätebatterien nicht

statistisch erfasst werden. Das erschwert zurzeit die Beurteilung der tatsächlichen Recyclingsituation bei den Fahrzeugtraktionsbatterien.

Mittlerweile gibt es einen neuen Gesetzentwurf für die Altbatterie-Richtlinie. Die Sammel- und Recyclingquoten werden jedoch in dem bisher bekannten Entwurf vom Januar 2020 nicht tangiert [54]. Es sind keine Änderungen vorgesehen, die sich spezifisch auf Industrie- oder Fahrzeugtraktionsbatterien beziehen.

Als Bauteile von Fahrzeuge unterliegen die Traktionsbatterien zudem der Altfahrzeugrichtlinie und werden im ersten Schritt der Fahrzeugentsorgung demontiert. Dies beinhaltet ausdrücklich nicht nur die Batteriezellen selbst, sondern auch die Peripherieteile wie Kabel, Kühlsystem etc. [55]. Die weitere Entsorgung der Batterien unterliegt der Altbatterie-Verordnung. Zwar legt die Altfahrzeugrichtlinie auch Recyclingquoten fest. Aufgrund der unterschiedlichen Ansätze zu Recyclingquoten und Berichterstattung in beiden Richtlinien wird die Recyclingeffizienz der Fahrzeugbatterien nicht der Altfahrzeug-Recyclingquote angerechnet [55].

4.1.2 Stand der Technik

In Deutschland werden bisher nicht die Mengen an Metallen aus Li-Ionen Batterien zurückgewonnen, die technisch möglich wären, da unter den bisherigen Marktbedingungen eine Rückgewinnung oft nicht wirtschaftlich ist. Wie zuvor beschrieben, gibt die EU-Gesetzgebung vor, dass mindestens 50 % des Materials von Lithium-Ionen Akkus wiederverwendet werden müssen. Eine Infrastruktur für das Recycling von Batterien aus Elektroautos existiert prinzipiell, jedoch ist deren Transport sehr aufwendig und gilt als Gefahrguttransport.

Prinzipiell können pyro- oder hydrometallurgische Verfahren angewendet werden. Neben der Rückgewinnungseffizienz unterscheiden sich die Verfahren auch in ihrer Wirtschaftlichkeit. Ein Kriterium für das Recycling ist daher unter anderem die Möglichkeit, auch andere, nicht Li-Ionen basierte Batterietechnologien verwerten zu können. Diese Voraussetzung wird auch in Zukunft Bestand haben. Zwar ist in den nächsten zehn Jahren ein deutlicher Zuwachs an eingesetzten und potenziell dem Recycling verfügbaren Traktionsbatterien zu erwarten. Jedoch ist es wahrscheinlich, dass die Batteriechemie für automobiler Anwendungen sich weiterentwickelt, so dass Recyclinganlagen langfristig mit verschiedenen Zusammensetzungen und Batterietechnologien zurechtkommen sollten.

Derzeit gibt es in Deutschland nur wenige Recyclingbetriebe für lithiumhaltige Batterien. Die Firma Düsenfeld führt derzeit eine dezentrale, mechanische Zerkleinerung der Batterien mit Sortierung in Aluminium und Kupfer, Eisen und restliche Bestandteile durch. Diese restlichen Bestandteile werden derzeit extern aufbereitet. Dieser Schritt soll in Zukunft intern und hydrometallurgisch erfolgen. Andere Firmen wie Redux verwerten ebenso Eisen, Kupfer und Aluminium sowie das Aktivmaterial als Ganzes. Die Firma Accurec behandelt die Batteriezellen thermisch und mechanisch und trennt die Metalle nach eigenen Angaben zu 100 % in ökonomisch verwertbare Fraktionen auf [56]. Es werden, wie bei den vorgenannten Firmen, Stahl und Edelstahl, Aluminium und Kupfer sowie ein Nickel-Kobalt-Gemisch wiedergewonnen. Als zurzeit einziger Fahrzeughersteller in Deutschland plant VW eine eigene Pilotanlage für Batterierecycling. Diese soll in naher Zukunft ebenfalls die Stahl-, Aluminium- und Kupferanteile des Batteriegehäuses rückgewinnen und zusätzlich durch einen Shredder- und Siebprozess Nickel, Mangan, Kobalt und Lithium als Gesamtfraktion abtrennen. Diese Mischung soll dann mit einem hydrometallurgischen Verfahren getrennt werden [57].

Eine weitere Recyclinganlage für Batteriezellen wird zudem in Belgien betrieben. Diese Anlage wurde von der Firma Umicore im Jahr 2011 in Betrieb genommen. Mit einem mehrstufigen pyrometallurgischen Verfahren können Kupfer, Kobalt, Nickel und Lithium zurückgewonnen werden. Das Unternehmen hat in Europa mit Tesla und Toyota Verträge über die Nutzung der Schmelze zur Rückgewinnung von Edelmetallen wie Kobalt und Nickel abgeschlossen [58]. Die Rückgewinnung des Lithiums wäre ebenfalls möglich, ist jedoch bisher, aufgrund der zusätzlichen Prozesskosten, nicht wirtschaftlich.

4.1.3 Forschungsaktivitäten

In Deutschland wurden seit 2009 verschiedene Projekte zum Recycling von Traktionsbatterien gefördert. Dabei spielen sowohl Förderungen innerhalb der EU-Forschungsprogramme als auch durch das Bundesumweltministerium sowie das Bundeswirtschaftsministerium eine Rolle. Bereits im Jahr 2009 sind Projekte mit größeren Konsortien gestartet, die gezielt die Prozesskette für ein Recycling von Li-Ionen-Traktionsbatterien untersucht haben. In den Projekten wird in der Regel eine Zusammenarbeit von Forschung und Industrie angestrebt. Auf Forschungsseite sind verschiedene Universitäten und private Forschungsinstitute wie das Ökoinstitut vertreten. Industrieseitig sind sowohl Unternehmen, die Recyclingtechnologien anwenden, vertreten als auch Automobilhersteller. In den Projekten LithoRec (2009-2011) und LithoRec II (2012 – 2016) wurde die Prozesskette des Recyclings von Li-Ionen Traktionsbatterien untersucht. Bereits in LithoRec wird die gesamte Prozesskette betrachtet, d.h. die Deaktivierung der Batteriezellen, die Demontage, die maschinelle Zerkleinerung und die Rückgewinnung der verschiedenen Metallfraktionen. Darauf aufbauend wurde in LithoRec II eine temporäre Demonstrationsanlage an der TU Braunschweig erstellt. Der Prozess hat Eisen/Stahl, Aluminium und Kupfer sowie Kunststoffe und die Beschichtungsmaterialien als Gesamtfraktion sortiert. Das Projekt LiBRi (2009-2011) befasste sich ebenfalls mit verschiedenen Prozessstufen des gesamten Recyclingprozesses von Li-Ionen Traktionsbatterien. Sowohl regulatorische als auch technische Aspekte der Batteriediagnose, des -transports und der Rückführung wurden betrachtet. Basierend auf dem Umicore Batterierecyclingprozess und den dort anfallenden Schlacken wurde im Labormaßstab ein hydrometallurgisches Aufbereitungsverfahren entwickelt, durch welches das darin enthaltene Lithium zurückgewonnen werden kann. Ein weiteres hydrometallurgisches Aufbereitungsverfahren wurde entworfen, um die Rückgewinnung von Flugstäuben zu ermöglichen, welche während des Recyclingprozesses anfallen. Diese können, je nach recycelter Batterietechnologie Silber, Kobalt, Kupfer, Nickel, Cadmium, Zink und andere Schwermetalle enthalten.

Einen ähnlichen Ansatz auf europäischer Ebene hat das Projekt ABattReLife (2012-2015) mit EU Partnern im Rahmen von ERA-NET Plus verfolgt. Die darin entwickelten Recyclinglösungen beschränken sich jedoch auf die Rückgewinnung der Hauptkomponenten Aluminium, Kupfer und Eisen. Versuche, die Metalle der Schwarzmasse zurückzugewinnen, wurden ebenfalls im Labormaßstab unternommen, wobei mechanische Verfahren zur Abtrennung verschiedener Fraktionen, die pyrometallurgisch weiterverarbeitet werden könnten, im Fokus standen.

Eine Senkung der Recyclingkosten, eine Erhöhung der Materialrückgewinnungsquote sowie die Rückgewinnung von Zwischenmaterialien in einer frühen Verfahrenstiefe, die in bestehende Stoffströme integriert werden können, war das Ziel des Projekts EcoBatRec (2012-2016). Hierbei wurden verschiedene thermische und mechanische Prozessschritte in einer Demonstrationsanlage

realisiert. An weiteren alternativen Verfahren zur Materialauftrennung, wie z. B. mittels Schockwellen, wurde im Projekt New-Bat (2016-2019) geforscht.

Aktuelle Projekte beschäftigen sich mit technologischen Weiterentwicklungen wie thermischen Vorbehandlungsschritten und hydrometallurgischen Verfahren. Im Projekt MERCATOR (2019-2022) findet beispielsweise eine Konzeptionierung eines Mehrkammerofens zur pyrolytischen Vorbehandlung von Fahrzeugbatterien im Pilotmaßstab bei der Firma ACCUREC Recycling sowie der hydrometallurgischen Aufbereitung des thermisch vorbehandelten Materials statt. In dem deutsch-schwedischen Projekt LIBERO (2019-2021) wird das Ziel verfolgt, möglichst alle „Wertmetalle“ und Komponenten hydrometallurgisch zurückzugewinnen, um die Abfallmenge aus der Nutzung von Li-Ionen Batterien so niedrig wie möglich zu halten. Im Gegensatz dazu wird neben der mechanischen Zerlegung ein pyrometallurgisches Konzept im Projekt InnoRec (2019-2022) untersucht. Im Projekt AutoBatRec2020 (2018-2021) wird wiederum untersucht, wie die Effizienz der gesamten Recyclingkette gesteigert werden kann, unter anderem auch durch Wiederverwendung ganzer Batteriekomponenten. Zudem werden Möglichkeiten der erhöhten Automatisierung untersucht. Gemeinsam ist diesen Projekten, dass die Prozesse möglichst flexibel gegenüber verschiedenen Li-Ionen Zellchemietypen sein sollen. Zudem sollen mehr als die in den früheren Projekten angesprochenen Metallfraktionen zurückgewonnen werden, um eine möglichst hohe Rate an Sekundärrohstoffen für den Wiedereinsatz in der Batterieproduktion bereitzustellen. Einige der Projekte quantifizieren auch den ökologischen und ökonomischen Nutzen der Prozessketten. Die Wirtschaftlichkeit ist hierbei der bestimmende Faktor, wenn es um die Umsetzung der erforschten Recyclingprozesse in die Praxis geht [59].

Bei derzeit im Markt verwendeten Li-Ionen-Traktionsbatterien sind dementsprechend, neben der Menge der durch die Zerlegung des Batteriepacks zu gewinnenden, sortenreinen Metalle, der Kobalt, Nickel- und Kupfergehalt wichtige Parameter dafür, bis zu welcher Stufe die einzelnen Metallfraktionen aufbereitet werden.

Die Erhöhung der Prozesseffizienz in aktuellen Forschungsprojekten spielt daher eine tragende Rolle für den zukünftigen Erfolg der entwickelten Prozesse im Markt.

4.2 USA

4.2.1 Regulierung

Li-Ionen Batterien zählen in der US-weiten Gesetzgebung als „universal waste“ im Abfallgesetz von 1995 (FR Dok. 95-11143). Darin wird unter anderem geregelt, anhand welcher Kriterien ein Abfall als gefährlich eingestuft wird. Da Li-Ionen Batterien entflammbare Elektrolyte enthalten können, werden sie gemäß dieser Vorschriften als gefährlicher Abfall, mit entsprechenden Folgen bzgl. der Sicherheitsvorkehrungen bei Lagerung und Verwertung, eingestuft [60]. Zusätzlich wird der Transport von Li-Ionen-Traktionsbatterien durch das US-Verkehrsministerium geregelt (49 CFR, Paragraph 173.185(j)). Diese Gesetze zielen lediglich auf die Einstufung der Batterien als Abfälle ab. Das allgemeine Abfallgesetz erlaubt, dass Batterien oder Batteriepacks sortiert, gemischt, entladen, regeneriert, in einzelne Batterien zerlegt oder aus Produkten entfernt werden können, solange die einzelne Batteriezelle nicht verletzt wird. Der Elektrolyt und alle anderen Materialien der Batterie müssen bewertet werden, um festzustellen, ob es sich um gefährlichen Abfall handelt. Dieser muss

entsprechend der zu Grunde liegenden Gesetzgebung entsorgt werden. Zusätzlich existiert der „Mercury-Containing and Rechargeable Battery Management Act“ von 1996. Dieser zielt darauf ab, die Verbrennung und Deponierung von quecksilberhaltigen und Blei-Säure-Batterien zu verbieten [61].

Anders als in Europa gibt es in den USA keine landesweiten Vorgaben für das Recycling von Li-Ionen Batterien mit Vorgaben zur Rückgewinnung von Materialien. In einigen Bundesstaaten wie Kalifornien und New York gibt es mittlerweile weitergehende Regulierungen zum Recycling von wieder aufladbaren Batterien. In Kalifornien wurde im Jahr 2019 eine Beratungsgruppe [62] gegründet, die den Gesetzgeber in Fragen der Rückgewinnung und des Recyclings von Lithium-Ionen-Fahrzeuggatterien, die mit Kraftfahrzeugen im Bundesstaat verkauft werden, berät. Neben Mitgliedern der Umweltgemeinschaft, Autodemontagebetrieben, öffentlichen und privaten Vertretern, die an der Herstellung, Sammlung, Verarbeitung und dem Recycling von Elektrofahrzeugbatterien beteiligt sind, entsenden verschiedene Behörden jeweils einen Vertreter in die Beratergruppe. Derzeit ist noch offen, inwieweit die kalifornische Gesetzgebung zum Recycling von Traktionsbatterien in den kommenden Jahren verschärft wird.

4.2.2 Stand der Technik

Derzeit sind den USA, ähnlich wie in Deutschland, nur wenige Firmen vertreten, die Traktionsbatterien von Fahrzeugen verwerten oder planen dies zu tun. Bezüglich der Technologien für das Batterierecycling besteht derzeit keine klare Ausrichtung. Es ist offen ob der zukünftige Markt verstärkt auf pyro- oder hydrometallurgische Verfahren setzen wird.

Die Firma Retrieve kombiniert in ihrer Prozesskette verschiedene Materialtrennungsstufen mit einem hydrometallurgischen Prozess. Dabei werden ein Kobalt-Kupfer-Gemisch sowie Aluminium und Kunststoffe abgetrennt. Anschließend bleibt ein Gemisch verschiedener Metalloxide übrig. In einem weiteren Prozessschritt kann durch Zugabe von Natriumcarbonat und Kohlendioxid Lithiumcarbonat gewonnen werden. Dieses kann in der metallverarbeitenden Industrie eingesetzt werden [63]. Die Firma hat außerdem ein Verfahren zur Rückgewinnung der Kathodenmaterialien patentiert, das jedoch noch nicht kommerziell eingesetzt wird. Eine weitere Firma ist Inmetco, in deren Prozess die Batterien und anderer Schrott zusammen mit Reduktionspellets thermisch behandelt werden. Bei diesem Verfahren werden Kobalt, Nickel und Eisen als Legierung zurückgewonnen [63]. Andere Metalle verbleiben in der Schlacke.

Des Weiteren gibt es Veröffentlichungen der Firma OnTo, in denen neue Prozesse das Batterierecycling vorgestellt werden. Der Fokus liegt auf der Herstellung von sekundärem Elektrodenmaterial aus recycelten Batterien, beispielsweise durch direktes Kathodenrecycling [64, 65]. Laut eigenen Angaben stellt die Firma die Patente und die Implementierung dieser Prozesse als Dienstleistung für die Batterieindustrie zur Verfügung. Das Unternehmen American Manganese plant derzeit eine Anlage zum Recycling von Li-Ionen-Traktionsbatterien. Das dortige Interesse am Batterierecycling hat seine Wurzeln in den Prozessen der Firma zur wirtschaftlichen Herstellung von elektrolytischen Metallen aus sehr minderwertigen Mineralablagerungen. Die Firma nutzt den patentierten „RecycliCo“ Prozess, der ein hydrometallurgisches Verfahren darstellt. Damit können nach eigenen Angaben Kobalt zu 100% und Lithium zu 87% zurückgewonnen werden. Zudem werden Nickel, Mangan und Aluminium als weitere Metalle genannt, die wiedergewonnen werden.

Die Firma kann mit dem geplanten Prozess NCA (Lithium Nickel Kobalt Aluminium Oxid), NMC (Lithium Nickel Mangan Kobalt Oxid) und LCO (Lithium Kobalt Oxid) verarbeiten [66].

Weitere Kapazitäten für das Recycling von Li-Ionen Batterien befinden sich im Nachbarland Kanada. Die Firma Li-Cycle zum Beispiel hat zum Ziel, die Wirtschaftlichkeit des Recyclingprozesses zu erhöhen. Mit dem entwickelten hydrometallurgischen Verfahren sollen Lithium, Kobalt, Kupfer, Nickel und Mangan zurückgewonnen werden. Glencore wiederum verarbeitet bereits seit einigen Jahren Li-Ionen Batterien pyrometallurgisch in einem Werk in Sudbury, wobei die eigentliche Aufbereitung zu Sekundärmetall dann in Norwegen stattfindet.

4.2.3 Forschungsaktivitäten

Die Batterieforschung in den USA wird von verschiedenen Stellen finanziert. Ein Hauptförderer ist das Department of Energy (DoE), wo das Vehicle Technology Office die Programme zur Batterieforschung im Mobilitätssektor koordiniert. Im Jahr 2018 wurden im Themenbereich „Recycling and sustainability“ 5 Projekte mit einem Volumen von ca. 4,2 Mio. \$ gefördert. Die Projekte decken verschiedene Themen der Recyclingprozesskette ab. Zum einen werden Recyclingtechnologien hinsichtlich ihrer Effizienz verbessert und Empfehlungen zur Verminderung der ökonomischen Barrieren erarbeitet. Ein Schwerpunkt liegt auf dem direkten Kathode-zu-Kathoden-Recycling. Darüber hinaus gibt es ein eigenes Projekt zum Life Cycle Assessment von Li-Ionen Batterien, das unter anderem Daten für das US-Ökobilanzmodell GREET liefern soll.

Eine besondere Stellung nimmt das im Jahr 2019 gestartete Projekt ReCell Center ein. Unter der Leitung des Argonne National Laboratory (ANL) bringt es die Aktivitäten weiterer Forschungseinrichtungen wie dem National Renewable Energy Laboratory (NREL) und dem Oakridge National Laboratory sowie verschiedener Industriepartner in einem Projekt zusammen. Es adressiert sowohl aktuelle als auch zukünftige Batteriechemietypen und umfasst die Entwicklung neuer Elektroden und Zelldesigns zur effektiveren Materialrückgewinnung ebenso wie die Erforschung neuer Recyclingprozesse zur Rückgewinnung der Kathodenmaterialien. Einige Prozesse und Designs werden im Pilotmaßstab in den Laboreinrichtungen von ReCell am ANL aufgebaut. Die Bewertung der Prozesse wird mit Hilfe des EverBatt-Modells von ANL durchgeführt, das die technisch-wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen jeder Phase der Lebensdauer einer Batterie, einschließlich des Recyclings, abbilden soll. Das LIBRA-Modell von NREL wieder soll die Entwicklung von Rohstoffverfügbarkeit, Primärherstellung, Recycling und Nachfrage untersuchen. Das ReCell Center hat nach eigenen Aussagen zudem die strategische Aufgabe, eine wettbewerbsfähige Recyclingindustrie aufzubauen und somit die Abhängigkeit von ausländischen Quellen von Batteriematerialien zu verringern. Das DoE sieht eine Möglichkeit, Lithium-Ionen- und zukünftige Batterien wirtschaftlich zu recyceln und das Wachstum eines profitablen Recyclingmarktes für verbrauchte EV-, Elektronik- und stationäre Speicherbatterien zu beschleunigen. Im Rahmen dieses Projekts werden zudem auch Modellierungs- und Analysewerkzeuge eingesetzt, um Prozesse und Technologiestrategien zu optimieren.

Ebenfalls vom DoE geförderten wird der Battery Recycling Prize, der die Entwicklung der Rücknahmeinfrastruktur unterstützt.

Einen Überblick über den Stand der Forschungsprojekte gibt es in den öffentlich verfügbaren Unterlagen des jährlich stattfindenden Annual Merit Review des DoE¹. Über die ersten Projekte zum Batterierecycling wurde bereits 2009 berichtet, jedoch ist ein deutlicher Anstieg der Projektaktivitäten in den letzten beiden Jahren zu verzeichnen. Vorherrschende Themen waren dabei das direkte Recycling der Batteriekathoden, Prozessentwicklungen zur effizienteren Abtrennung verschiedener Materialien sowie die ökonomische und ökologische Bewertung der gesamten Recyclingprozesskette.

4.3 China

China investiert seit 2009 in die Bereiche Batterie- und „New-Energy-Vehicle“ (NEV – hier sind batterie- und brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge sowie Plug-in Hybride enthalten) [67, 68]. Unterstützt durch staatliche Fördergelder konnten diverse Technologiehersteller dieser Felder rasch wachsen. Heute ist China Weltmarktführer für batterieelektrische Fahrzeuge und Traktionsbatterien, hinsichtlich sowohl der jährlichen Produktion als auch der installierten Fahrzeugbasis [69, 70]. Ausgehend von der enormen Produktionskapazität und Fahrzeuganzahl ergeben sich viele Aktivitäten im Bereich der Kreislaufstrategien für Batteriesysteme auf dem chinesischen Markt. Diese Aktivitäten werden von offizieller Seite gesteuert und reguliert und finden sowohl in der Forschung als auch in der Industrie Anwendung. Durch die Ausnutzung des großen Potentials welches das Recycling von NEV-Batterien birgt [71], soll selbstverständlich auch die Abhängigkeit von Rohstoffimporten minimiert werden. China kann zwar die komplette Bereitstellungskette der Batterieherstellung eigenständig abdecken, kauft aber dennoch große Rohstoffmengen auf dem Weltmarkt ein bzw. baut diese Rohstoffe weltweit ab [72].

4.3.1 Regulierung

Die Regulierung von Batterierecyclingprozessen in der Volksrepublik China unterliegt dem Ministerium für Industrie und Informationstechnik (MIIT) [73]. Das Ministerium hat die entsprechenden Rahmenbedingungen in der Richtlinie „Comprehensive Utilization of New Energy Vehicle Waste Power Battery Industry“ festgelegt. Aus diesem Kerndokument ergeben sich weitere Richtlinien wie die „Interim Measures for the Management of Recovery and Utilization of New Energy Vehicle Power Battery“ und die „Interim Administrative Measures for New Energy Vehicle Power Battery Recycling and Utilization.“ Die Vorlage bezieht sich hierbei auf bereits in Kraft getretene Legislatur [74], namentlich:

- Law on Prevention of Environmental Pollution Caused by Solid Waste (Gesetz zur Vermeidung von Umweltverschmutzung durch Feststoff-Abfall)
- Circular Economy Promotion Law of the People's Republic of China (Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft der Volksrepublik China)
- Cleaner Production Promotion Law (Gesetz zur Förderung Sauberer Produktion)
- Environmental Protection Law (Gesetz zum Schutz der Umwelt)

¹Vorträge aus dem Annual Merit Review zu finden unter: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/annual-merit-review-presentations>

Weiterhin werden bereits erlassene technische Richtlinien und Standards als Grundlage der Richtlinie genutzt. Beispiele hierfür sind:

- Management Specification for Waste Battery Recovery (WB / T 1061)
- Waste Battery Recovery Management Practices (WB / T 1061)
- Technical Policy on the Prevention and Control of Waste Battery Pollution
- Usw.

Ziele der Richtlinie sind die Förderung einer vollumfänglichen Ressourcennutzung, der Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit sowie die gesunde und nachhaltige Entwicklung der NEV Industrie. Hieraus resultiert weiterhin die verbesserte Sicherheit von batterieelektrischen NEV. Inhaltliche Eckpfeiler sind die Anforderungen an das Design von NEV Batteriesystemen, die Vergabe fester IDs für jedes produzierte Batteriesystem zur lückenlosen Verfolgung von Herstellung bis Recycling und die Implementierung entsprechender Managementsysteme. Erste Versionen dieser Hauptrichtlinie (provisional regulations) existiert bereits seit 2016 [75], Iterationen der entsprechenden Regularien wurden 2017 verabschiedet [74, 76]. Laut Rücksprache mit chinesischen Expert*innen unterscheiden sich die Iterationen jedoch nicht grundlegend voneinander. Die ersten Schritte zur Umsetzung der Richtlinie wurden 2018 mit der Einführung der Batterie-Rückverfolgungsplattform eingeführt. Zeitgleich wurde ein Pilotprogramm in 17 verschiedenen Regionen gestartet, in welchem sich Hersteller von Batterien und Fahrzeugen sowie Fahrzeughändler und Abfallunternehmen zur Schaffung regionaler Recyclingsysteme und -ketten organisieren [77]. Die eigentliche Richtlinie ist in 6 Unterkapitel aufgeteilt, welche aus weiteren Paragraphen bestehen. Diese Kapitel, inklusive einer kurzen Zusammenfassung der jeweiligen Inhalte, sind nachfolgend aufgeführt. Die einzelnen Paragraphen der Kapitel sowie der zu beschreibende Gegenstand sind Tabelle 3 zu entnehmen.

1. The general rule (Allgemeine Regeln)

Hier werden verschiedene Punkte hinsichtlich Terminologie, Definitionen, Anwendungsbereich der Richtlinie, organisatorischer Fragen und Guidance adressiert.

2. Design, production and recycling responsibilities (Design, Produktion und Recyclingverantwortlichkeit)

Detaillierte Auflistung der Anforderungen an alle herstellungs- und recyclingrelevanten Prozesse inklusive Verkauf, Lagerung und Transport.

3. Comprehensive utilization (Umfassende Nutzbarmachung)

Analyse der Nutzbarmachung bzw. Anwendbarkeit der Regulierung anhand von Anforderungen an Unternehmen, Prozessen und Unternehmen.

4. Supervision and management (Aufsicht und Management)

Beinhaltet die Einführung und Nutzung einer Standardisierung, verschiedener Managementsysteme sowie der Beobachtung von Marktmechanismen.

5. Penalties (Strafen)

Klärung möglicher Strafen für die Missachtung der Richtlinie unterteilt nach Batterie- und Fahrzeughersteller sowie der Anwendung dieser.

6. By-law (Durchführungsbestimmungen)

Verweis auf die Anlaufstellen für die Erklärung und Interpretation der bestimmten Maßnahmen sowie den zeitlichen Geltungsbereich.

Von der „Comprehensive Utilization of New Energy Vehicle Waste Power Battery Industry“ unberührt bleiben Fragestellungen bzw. detaillierte Anweisungen rund um das Thema Lebenszeitverlängerung und Zweitnutzungskonzept (2nd Life) für Traktionsbatteriesysteme. Eine entsprechende offizielle Richtlinie wird nach Meinung von Expert*innen zeitnah erwartet, zum Stand dieser Arbeit sind jedoch keine weiteren Details bekannt. Einzelne Konzepte sind bereits Stand der Technik und werden in der Industrie zur Anwendung gebracht. Diese Konzepte umfassen beispielsweise:

- Lebenszeitverlängerung: Austausch einzelner Zellen oder Module um den weiteren Einsatz des Batteriesystems im ursprünglichen System zu ermöglichen
- Zweitnutzung: Einsatz des NEV-Batteriesystems in artgleichen Anwendungen mit geringeren Energie- oder Leistungsanforderungen wie beispielsweise batterieelektrische Fahrräder [78]
- Zweitnutzung: Einsatz der Batteriesysteme nach Erreichen der End-of-Life Restkapazität in stationären Speicheranlagen

Neben regulatorischen Vorgaben sind die starken Bemühungen chinesischer Automobil- und Batteriehersteller im Bereich Nachhaltigkeit und Recycling (inklusive Rohstoffgewinnung, Materialbereitstellung und –herstellung sowie Komponentenherstellung) ebenfalls durch Anforderungen ausländischer Kunden getrieben. Westliche Industriepartner und Kunden (wie beispielsweise Apple oder BMW) reichen ihre Vorgaben und Anforderungen direkt an die chinesischen Zulieferer weiter. Diese können sich auf Recyclingquoten für verwendete Rohstoffe und Materialien oder aber die bei der Herstellung verwendeten Energieträger beziehen.

Weitere Zielstellungen an die Batterie- und ggf. Fahrzeughersteller können aus regionalen Vorgaben von zum Beispiel Industrieparkbetreibern oder Versorgungsbetrieben resultieren. Diese können Aspekte der Nachhaltigkeit, wie beispielsweise Wasser- und Energieverbrauch, (Ab)Wasseraufbereitung oder Abwärmenutzung, betreffen, welche nicht von der offiziellen Regulierung adressiert werden.

Tabelle 3: Übersicht zur Recycling Richtlinie „Comprehensive Utilization of New Energy Vehicle Waste Power Battery Industry“

Kapitel	Paragraph	Gegenstand
Allgemeine Regeln	1	Absicht und Basis
	2	Anwendungsbereich
	3	Maßgebliches Objekt
	4	Organisation und Management
	5	Prinzipien und Anforderungen
	6	Steuerung der Richtlinie
Design, Produktion und Recyclingverantwortlichkeit	7	Anforderungen an das Design
	8	Anforderungen an die Zulassung
	9	Anforderungen an die Produktion
	10	Anforderungen an den Verkauf
	11	Anforderungen an Batteriewartung und -wechsel
	12	Anforderungen an den Recyclingprozess
	13	Anforderungen an die Verschrottung
	14	Anforderungen an den Eigentümer
	15	Sammelanforderungen
	16	Lagerungsanforderungen
	17	Transportanforderungen
Umfassende Nutzbarmachung	18	Prinzipien der umfassenden Nutzbarmachung
	19	Generelle Anforderungen an Unternehmen
	20	Anforderungen an Kaskaden- oder Mehrfachnutzung
	21	Anforderungen für Batterieprodukte zur Kaskadennutzung
	22	Recyclinganforderungen
Aufsicht und Management	23	Etablierung eines standardisierten Systems
	24	Informationsarchivierungssystem
	25	Nachverfolgbarkeits-Managementsystem
	26	Mehrfachnutzung von Batterie-Produktmanagement
	27	Studie der Marktmechanismen
	28	Soziale Aufsicht
Strafen	29	Unternehmensstrafen Fahrzeughersteller
	30	Unternehmensstrafen Batteriehersteller
	31	Übergreifende Anwendung der Unternehmensstrafen
	32	Andere Unternehmensstrafen
Durchführungsbestimmung	33	Terminologie
	34	Zeitraum der Implementierung

4.3.2 Stand der Technik

Bedingt durch die staatliche Regulierung sowie die große Konkurrenz und den dadurch resultierenden Preisdruck sind am chinesischen Markt diverse Unternehmen zu identifizieren, die sich (unter anderem) mit dem Recycling von Batterien befassen. Diese Unternehmen entlang der Batteriewertschöpfungskette kann man in drei verschiedene Kategorien hinsichtlich ihrer Prozessschritte und der Tiefe dieser Schritte unterteilen.

1. Small and medium sized enterprises (SMEs)

Die kleinen bis mittelgroßen Unternehmen können in der Regel nicht die komplette Recycling-Kette abbilden. Das Recycling von Batteriesystemen beläuft sich oftmals lediglich auf die Demontage und mechanische Verarbeitung der Batterien. Durch (hier Bearbeitungsschritte) erhalten die Unternehmen Kupfer- und Aluminium-Folie. Diese werden ebenso wie Graphit- und Kathoden-Pulver an Unternehmen mit technisch aufwändigeren Prozessschritten verkauft.

2. Medium and large sized enterprises (MLEs)

Mittelgroße bis große Unternehmen können die ersten Schritte in der Batterierecycling-Prozesskette entweder selber durchführen oder kaufen die entsprechenden Produkte von SMEs zu. Anschließend werden die Rohstoffe aufwändigeren und energieintensiveren Verarbeitungsschritten zugeführt. Hierbei wird in hydrometallurgische und pyrometallurgische Prozesse unterschieden. Der Fokus am chinesischen Markt liegt auf Hydrometallurgie für Lithium-Ionen Batterien. Unter Anwendung der genannten Prozesse werden Separations- und Extraktionslösungen zur Gewinnung von Kobalt-, Mangan-, und Nickelsulfaten in Batteriequalität produziert. Die Lösungen werden entweder vor Ort verarbeitet oder an Unternehmen mit Fokus auf Batterierecycling verkauft.

3. Unternehmen mit Fokus auf Recycling

Unternehmen mit Fokus auf Batterierecycling (jedoch in der Regel auch auf die weitere Prozessierung und die Zellherstellung) können die komplette Recyclingkette in-house abbilden. Neben den bereits skizzierten Prozessen findet hier außerdem die direkte Herstellung von Nickel-Kobalt-Mangan (NMC) Trägern (Precursor) statt. Im Regelfall wird zur Herstellung dieser Bauteile bzw. Komponenten auf eine Mischung aus recyceltem und neuem Material zurückgegriffen.

Fünf Unternehmen auf dem chinesischen Markt können als Technologiespitzenreiter für Batterierecycling identifiziert werden. *Ganzhou Highpower Technology*, *GEM Co. Ltd*, *GHTECH*, *Guangdong Brunp Recycling Technology* und *Huayou Cobalt*. Diese Unternehmen erreichen nach heutigem Stand die vom Ministerium für Industrie und Informationstechnologie vorgegebenen „Standard Conditions for the Comprehensive Utilization of New Energy Vehicle Waste Power Battery Industry“.

Die *Highpower International Inc.* [79] befasst sich mit der Entwicklung, Herstellung, Integration und dem Recycling und der Wiedernutzung von Lithium-Ionen- und Nickel-Metallhydrid-Batterien. Die 100 % Tochterfirma *Ganzhou Highpower Technology* ist hierbei spezialisiert auf Recyclingprozesse. Das Unternehmen *GEM* recycelt nicht nur Batteriesysteme, sondern bietet Recycling, Metallextraktion bzw. -rückgewinnung und Wasseraufbereitung für diverse industrielle Prozesse und Technologiebereiche an [80].

Ein weiterer chinesischer Großkonzern mit Expertise für Batterierecycling ist *GHTECH*. Ursprünglich als Chemiekonzern gestartet umfasst das Unternehmen mittlerweile Sparten für Batterierecycling und Komponentenherstellung, Photovoltaik, Automobilkomponenten, Medizin, E-Commerce, etc. [81]. Kooperationen mit Fahrzeugherstellern wie BAIC oder Golden Bus illustrieren hierbei die Möglichkeit und Vorteile von einer Bündelung der Kompetenzen um effiziente Prozesse und Kapazitäten zu erschaffen.

Die *Guangdong Brup Recycling Technology* (im Folgenden *Brup*) ist eines von weltweit nur zwei Unternehmen, die im kommerziellen Maßstab Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) Batterien recyceln. LFP war lange Zeit die vorherrschende Technologie für Traktionsbatterien in China, sowohl hinsichtlich der jährlichen Produktion als auch der in Fahrzeugen installierten Basis. Da staatliche Förderungen und Bestrebungen batterieelektrische Fahrzeuge früh in den chinesischen Markt gedrängt haben, musste man auf diese damals bereits relativ ausgereifte, sichere und weniger kostenintensivere Technologie setzen. Im internationalen Umfeld jedoch hat sich LFP nicht flächendeckend durchgesetzt, da die Anforderungen an die Batterie (vor allem an die Energiedichte) deutlich zum chinesischen Markt unterschieden. Bedingt durch die veränderten chinesischen Förderbedingungen (hin zu Batterien mit einer höheren Energiedichte, beispielsweise NMC) und die internationale Nachfrage wird die LFP Batterie, zumindest in der heutigen Entwicklungsstufe, voraussichtlich stetig an Bedeutung verlieren. Das Recyclingpotential in China kann jedoch trotzdem als sehr groß eingestuft werden. Neben LFP Technologie recycelt Brup auch NMC Batterien. Brup wurde 2015 vom weltweit zweitgrößten Batteriehersteller, dem chinesischen Konzern CATL, aufgekauft und wird seitdem als Tochterfirma betrieben. CATL entwickelt und vertreibt sowohl LFP als auch NMC Technologie. Neben CATL beliefert Brup außerdem den chinesischen Batterie- und Fahrzeughersteller BYD und den deutschen Automobilhersteller BMW über ein Joint-Venture mit CATL [82] mit recycelten Rohstoffen. Die Effizienz des Recyclingprozesses wird mit 98,58 % angegeben. Das aktuellste Großprojekt ist eine Recycling-Anlage mit einer Kapazität von 30.000 Batterien pro Jahr [83]. Mit Fertigstellung des Projektes festigt Brup seinen Status als größter Batterierecycler in China.

Huayou Cobalt ist eines der größten kobaltverarbeitenden Unternehmen der Welt [84]. Huayou prozessiert Kobalt bis hin zur Batteriequalität und verarbeitet dieses außerdem weiter zu Kathoden und Precursoren. Zu den Abnehmern zählen große Batteriehersteller sowie chinesische und internationale Automobilhersteller, zudem bestehen Joint-Ventures mit LG Chem [85] oder dem Materialtechnologie- und Recyclingkonzern Umicore [86]. In Gemeinschaft mit letzterem ist beispielsweise die weltweit erste vollautomatisierte Batterierecyclinganlage entwickelt worden. Bestandteil dieser Anlage ist nicht nur die automatisierte Demontage der Batteriemodule, sondern auch die sichere Lagerung und Überwachung der Batteriesysteme. Laut Huayou kann die Anlage NEV-Batteriesysteme aller Hersteller demontieren, einzig bei Herstellungsmängeln oder -fehlern muss von Mitarbeitern manuell nachgeholfen werden. Vergleichbare Anlagen sind laut Aussagen von Expert*innen auch bei den Mitbewerbern Ganzhou Highpower, GEM oder Brup in der Entwicklung bzw. im Testeinsatz. Vor der Demontage steht zudem ein Funktionstest der Batteriesysteme um die verbleibende Restkapazität (hinsichtlich des End-of-Life Status) und somit das Potential für Zweitnutzungskonzepte zu evaluieren.

4.3.3 Forschungsaktivitäten

Auch in der Forschung zum Recycling von Batteriesystemen und vor allem NEV Traktionsbatterien ist China breit aufgestellt. Die Forschung umfasst hier absolute Grundlagenforschung inklusive der Erstellung mathematischer Modelle, Forschungsaktivitäten zur Optimierung etablierter Prozessschritte oder zur Umsetzung und Implementierung neuartiger Prozesse und Abläufe oder die Validierung zuvor entwickelter Verfahren durch Umsetzung in der Industrie als Pilotanlagen.

Aktivitäten in der Grundlagenforschung sind vor allem am *Institute of Process Engineering der Chinese Academy of Sciences* [87]. Das Institut befasst sich mit Themen wie Biochemie, Biotechnologie oder Biomasse, betreibt aber außerdem mehrere Abteilungen mit Forschungsfragen zum Batterierecycling. Zu nennen sind hier das National Engineering Laboratory for Hydrometallurgical Cleaner Production Technology (NELHCPT), das Key Laboratory of Green Process and Engineering oder das Research Center of Circular Economy Technology, Institute of Process Engineering. Aktuelle Forschungsgegenstände umfassen die Entwicklung eines Critical Raw Materials (CRM) Kalkulationsmodelles zur Rohstoffrisikobewertung [88], eines „electronic waste MATH“ Modelles zur Evaluierung von Recyclingpotentialen verschiedener Elektronikschrott-Kategorien [88] oder die Entwicklung eines Bewertungs- und Entscheidungsmodelles für „Green Manufacturing“ und „Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Recycling“ Prozesse [89]. Neben der Modellentwicklung zur Schaffung von verschiedenen Entscheidungsgrundlagen bzw. –hilfen wird am Institut für Prozessentwicklung jedoch auch praktische Forschung betrieben. Beispiele sind die Entwicklung neuartiger Vorbehandlungs-Technologien für lithiumhaltige Materialien oder die Begleitforschung und Hilfe bei der Konstruktion einer 50.000 t/a Recycling Fabrik [88].

Als Bindeglied zwischen Wissenschaft und Industrie versteht sich das *China Automotive Technology and Research Center Co. Ltd.* (CATARC) [90]. Es handelt sich hierbei um ein Unternehmen der Zentralregierung welches selber Forschung betreibt, High-Tech Komponenten entwickelt und verschiedene Services für die Industrie anbietet. Auch Fragen der Standardisierung, Zertifizierung oder Gesetzgebung werden von CATARC adressiert, die gesammelte Expertise kann als „Think Tank“ der Chinesischen Regierung angesehen werden [91]. Weiterhin gehören auch Marktanalysen zum Leistungsumfang des Unternehmens und es existieren Kooperationen und Vernetzungen zu internationalen Forschungseinrichtungen wie dem Fraunhofer ITWM [92] oder dem ICCT [93].

Ein ebenfalls aktives Unternehmen im Umfeld der industrienahen Forschung ist das Unternehmen *BOTREE* [94]. Neben der Entwicklung neuartiger oder verbesserter Recyclingprozesse liegt der Unternehmensfokus auf der Implementierung der Prozesse in der Industrie und Wirtschaft. Derzeit ist BOTREE in über 50 Projekten entlang der Recyclingkette involviert. Diese Projekte umfassen neue Extraktionstechnologien für Kobalt, Kupfer, Nickel und andere Rohstoffe aus Recycling- und Bergbauprozessen oder die Nachbereitung von Prozesswasser und –gas. Neben der Implementierung der eigens entwickelten Prozesse und Technologien in bereits vorhandene Industriekomplexe und Fabriken bietet BOTREE auch Batterierecycling in einem „Containerized design“ an. Hierbei wird das Recycling in 3 Prozessschritte (Demontage, Leaching (engl. Herauslösen) und Extraktion) unterteilt. Die komplette Technologie für jeweils einen dieser Schritte wird in einem Industriecontainer als Komplettsystem angeboten, durch die Kombination von drei Containern kann das komplette Batterierecycling erfolgen.

Betrachtet man die technischen Prozesse des Batterierecyclings liegt der allgemeine Forschungsfokus auf hydrometallurgischen Verfahren. Diese sind zwar technisch aufwändiger zu realisieren, jedoch

lassen sich neben Kobalt, Kupfer und Nickel auch Aluminium und Lithium zurückgewinnen [95]. Aus Sicht der Industrie ist eine Rückgewinnung möglichst vieler Materialien selbstverständlich erstrebenswert. Chinesische Hersteller setzen somit zunehmend auf hydrometallurgische Prozesse.

4.4 Japan

4.4.1 Regulierung

Japanische Technologiekonzerne wie Panasonic, Sony oder Toshiba gelten als Vorreiter in der Batterieherstellung und betreiben bereits seit 1993 Batterierecycling [96]. Die offizielle Regulierung erfolgt über verschiedene Gesetze zur Nutzung und Schonung von Ressourcen wie z.B. das „Renewable Resources Law“ [96] oder den „Act on the Promotion of Effective Utilization of Resources“ [97]. Adressiert werden der angemessene Einsatz von Rohmaterialien, die Verlängerung von Produktlebensdauern und das Recycling von technologischen Abfallprodukten. Weiterhin definieren die Gesetze das Grundgerüst der eigentlichen Recyclingabläufe. Dieses basiert auf zentralen Sammelstellen für verbrauchte Batterien, wobei alle kommerziell verfügbaren Batterietypen (Blei-Säure, Lithium-Ionen, Nickel-Cadmium und Nickel-Metallhydrid) angenommen werden. Organisiert werden diese Sammelstellen durch die Non-Profit Organisation „Japan Portable Rechargeable Battery Recycle Center“ (JBRC), einer Ausgründung der „Battery Association of Japan“ (BAJ). Als Zusammenschluss verschiedener Unternehmen aus dem Batteriesektor (sowohl Herstellung als auch Anwendung) hat sich die Battery Association of Japan im Jahr 1997 etabliert und befasst sich mit vielen Aspekten der Batterieforschung und -herstellung sowie mit Fragen der Standardisierung im regionalen und nationalen Kontext, des Batterierecyclings und Umweltschutzes oder mit sicherheitsrelevanten Aspekten [98]. Das Recycling von wieder aufladbaren Batterien wird hier seit 2001 thematisiert, die Ausgründung des JBRC erfolgte wenige Jahre später, um der wachsenden Nachfrage für Sammel- und Recyclingstellen gerecht zu werden. Die erwähnten landesweit verfügbaren Sammelstellen befinden sich beispielsweise in Filialen großer Handelsketten bzw. von Einzelhändlern oder in Anlaufstellen der Regierung bzw. von Organisationen mit Bezug zu Batterien oder deren Anwendung. Die hier gesammelten Batterien werden zum Recycling an Batteriehersteller mit entsprechenden Recyclingverträgen (wie beispielsweise Sony) oder Organisationen wie die „Nippon Recycle Center Corporation“ verteilt [95, 99]. Eine hervorragende Zusammenfassung des gesamten Recycling-Planes bietet die Fallstudie „The Recycling Scheme for Compact Rechargeable Batteries in Japan - under the Act on the Promotion of Effective Utilization of Resources“ von Tasaki [100]. Das Recycling von Traktionsbatterien aus entsprechenden Fahrzeugen wird in den diskutierten Regularien nicht spezifisch adressiert.

Das Recycling von Kraftfahrzeugen wird in Japan vom „Law for the Recycling of End-of-Life Vehicles“ reguliert [101]. Dieses ist seit 01.01.2005 rechtskräftig und beschreibt die Rechte und Pflichten der Fahrzeughersteller und -eigentümer hinsichtlich der Entsorgung von Fahrzeugen die das Ende ihrer Betriebszeit erreicht haben. Analog zum „Act on the Promotion of Effective Utilization of Resources“ wird auch in diesem Gesetz das Recycling von Batterien nicht weiterführend adressiert. Erwähnung finden diese lediglich in der Richtlinie „Guideline for Pre-shredder Disassembling Automobiles and Electronic Device“. Kernpunkt der Richtlinie ist die Pflicht potentiell gefährdende Bauteile und Stoffe

wie Batterien, Öl, Kraftstoff und andere Flüssigkeiten, Leuchtmittel und Reifen vor dem eigentlichen Recyclingprozess aus dem Fahrzeug zu entfernen [102].

Eine Überprüfung und Revision des Gesetzestextes um auf Herausforderungen des Recyclings von „Next-Generation-Vehicles“ zu reagieren war bereits 2015 geplant, zum Stand dieses Dokumentes war allerdings keine aktualisierte Version vorliegend [103, 104]. Vorschläge zu möglichen Änderungen der Richtlinien und Gesetze wurden Ende 2019 diskutiert [105], laut Meinung von Expert*innen ist mit einer zeitnahen Anpassung zu rechnen.

4.4.2 Stand der Technik

Das Recycling von Traktionsbatterien soll in Japan durch einen Zusammenschluss verschiedener Automobilhersteller und Organisationen organisiert und realisiert werden. Entsprechende Pläne wurden vom Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie (Ministry of Economy, Trade and Industry – METI) [106] in Zusammenarbeit mit der Japan Automobile Manufacturers Association (JAMA) [107] bereits Ende 2018 veröffentlicht [108]. Entsprechende Fabriken wurden in sieben verschiedenen Präfekturen umgesetzt bzw. sind in der Umsetzung. Ziel ist die Einführung einer effizienten Recyclingkette in der die Kosten auf eine maximale Anzahl beteiligter Stakeholder umgelegt werden. Die operative Umsetzung obliegt der Japan Auto Recycling Partnership (JARP). Neben diesem gemeinschaftlichen Projekt gibt es ebenfalls Bemühungen einzelner Hersteller bzw. kleinerer Joint-Ventures. Der Automobilhersteller Nissan betreibt zusammen mit 4R Energy ein Werk zur Diagnose, Aufbereitung und zum Recycling von Traktionsbatterien. Die Diagnose der Batterien erfolgt hier mittels eigener Technologie sehr schnell, Batterien mit einer Restkapazität von mehr als 80 % werden als Ersatzbatterien für batterieelektrische Fahrzeuge aufbereitet [109]. Unter dem Projektnamen „The Reborn Light“ werden ausgemusterte Batterien (unter 80 % Restkapazität) in Verbindung mit Photovoltaikmodulen zum Betrieb von Straßenbeleuchtungsanlagen umgerüstet. Wenn die Batterien die Kapazität für diese Anwendung nicht mehr aufbringen können, werden sie dem Recyclingprozess zugeführt [110]. Ein ähnliches Konzept verfolgt Toyota. Gemeinsam mit dem Energieversorgungsunternehmen Chubu Electric Power will man benutzte Traktionsbatterien zu großen, stationären Batteriespeicheranlagen vernetzen um Netzschwankungen oder eine schwankende Nachfrage nach elektrischer Energie auszugleichen [111]. An Möglichkeiten zum Recycling der Batterien nach der Nutzung als stationärer Speicher soll gemeinschaftlich geforscht werden. Ein weiteres Projekt von Toyota wurde im August 2019 in Thailand umgesetzt. Toyota bearbeitet hier nicht nur firmeneigene Batterien nach dem 3R Schema (Rebuild, Reuse, Recycle) sondern bietet dieselbe Dienstleistung auch weiteren Herstellern von Hybrid-Traktionsbatterien an. Nach einem Diagnoseprozess werden die untersuchten Batterien in drei Kategorien eingeteilt. Batterien mit weiterhin hoher Effizienz werden erneut zu einem Modul zusammengesetzt und als Batterie für Hybridfahrzeuge eingesetzt. Wird die verbleibende Effizienz der Batterien als moderat eingestuft, so werden diese in stationären Energiespeichern eingesetzt. Batterien mit minderer Resteffizienz hingegen werden Recyclingprozessen zugeführt, die gewonnenen Rohstoffe werden anschließend zur Batterieproduktion nach Japan verschifft [112].

5 Künftige Entwicklung der Li-Ionen Batterietechnologie

Die wachsende Anzahl von Elektrofahrzeugen (Electric Vehicle, EV) stellt sowohl für die Hersteller, als auch für die Verwerter am Ende der Lebensdauer eine große Herausforderung hinsichtlich diverser Aspekte des Abfallmanagements dar. Auf der anderen Seite können Altbatterien auch eine Chance für nachhaltige Wertschöpfungssysteme und die Sicherung strategischer Rohstoffe darstellen. Gegenüber den Herstellern von Neufahrzeugen und Batteriesystemen kann der Zugang zu strategischen und zum Teil kritischen Materialien für Schlüsselkomponenten des Elektrofahrzeugbaus sichergestellt werden. Insbesondere Lithium-Ionen Batterien aus Elektrofahrzeugen stellen durch ein entsprechendes Recycling eine wertvolle Sekundärmaterialquelle dar. Auch weitere Kreislaufstrategien, die Batteriesysteme am Ende ihrer ersten Nutzungsphase in ein zweites Leben (sog. „Second Life“) überführen, stellen eine Möglichkeit dar, die wachsende Nachfrage nach Speichersystemen vom Ressourcenbedarf zu entkoppeln. Diverse Parameter der Lithium-Ionen Batterietechnologie wirken sich direkt auf die Rentabilität solcher EoL-Strategien aus. Die vorliegende Untersuchung soll daher einen Überblick über den derzeitigen Stand der Technik, als auch die erwartete Entwicklung der relevantesten Parameter bis zum Jahr 2030 generieren.

Verschiedene Faktoren (Zyklenzahl, Entlade- und Ladestromstärke, oder die Betriebstemperatur) verursachen eine Alterung und entsprechend einen messbaren Leistungsverlust eines Batteriesystems. Für die Planung von ökonomisch und ökologisch sinnvollen Kreislaufstrategien ist die Kenntnis über erwartete Rückläufermengen und den jeweiligen Zeitpunkt von großer Wichtigkeit. Da für heutige EV-Batterien in der Regel eine Garantie von 6-8 Jahren ausgesprochen wird, stellt dies wiederum in etwa die untere Schwelle der Lebensdauer einer Batterie für deren ersten Lebenszyklus dar [113, 114].

Unter dem Schirmbegriff der Lithium-Ionen Batterien vereinen sich verschiedene Zellchemien und -formate, die jeweils einen erheblichen Einfluss auf die erwartete Lebensdauer und weitere Leistungsfaktoren der Batterie haben können [115–117]. Entsprechend den Anforderungen der einzelnen Anwendung sowie dem jeweiligen Alter und somit der Batteriegeneration, besteht bezüglich der in EV verwendeten Zellen, Modulen und Packs eine äußerst heterogene Produktlandschaft. Die Aktivmaterialien der Kathode spielen bei der Degradation von Lithium-Ionen Batterien eine zentrale Rolle. So sind bei diesen Materialien während der Nutzungszeit strukturelle Veränderungen, Auflösungsreaktionen und etwaige Filmbildungen auf der Oberfläche zu beobachten [118]. Da diese Erscheinungen stark von den verwendeten Materialien und den entsprechenden Mengenanteilen abhängen, hat jede Batteriechemie spezifische Alterungsmechanismen. Derzeitiges relevantes Forschungsfeld im Kontext LIB (Lithium-Ionen Batterien) ist unter anderem die Auswahl alternativer Materialien in Batterien. Es werden neue Elektrodenchemien entwickelt und getestet, um höhere Zyklenzahlen bei gleichzeitig besseren Leistungen zu erreichen. Neben dieser Verlängerung der Lebenszeit und Erhöhung der gesamten Performance sind weitere zentrale Ziele der Batterieforschung die Reduzierung der Abhängigkeit von kritischen und strategischen Rohstoffen sowie die Senkung der Produktionskosten. Während dieser technologischen Evolution müssen unterschiedliche Faktoren in ganzheitlichen Analysen beachtet werden.

So sollten bereits während der Produktentwicklungsphase insbesondere die folgenden Faktoren berücksichtigt werden:

- Nachhaltigkeit (Rohstoffkritikalität/-verfügbarkeit, ökologischer Fußabdruck, etc.)
- Sicherheit (Thermal-Runaway, Toxizität des Aktivmaterials, etc.)
- Leistungen (Kapazität, Energiedichte, Ladungs-Entladungs-Charakteristik, Batteriegewicht, etc.)

Insbesondere für die Einschätzung der Wirtschaftlichkeit, aber auch die Bewertung der ökologischen Auswirkungen des stofflichen Recyclings ist die Kenntnis der Zellchemie ein zentraler Aspekt. Die Menge beinhaltenen und somit rückgewinnbarer Materialien wirkt sich neben anderer Faktoren (bspw. volatile Rohstoffpreise) direkt auf den potentiell erzielbaren Umsatz der Unternehmung aus. Durch die Prognose der künftigen Marktanteile unterschiedlicher Zellchemien kann ein Unsicherheitsfaktor in strategischen Planungsprozessen verringert und die Ausgestaltung von Kapazitäten sowie einzelner Prozesse/ Prozessparameter unterstützt werden.

5.1 Vorgehen

Für die Einschätzung der zukünftigen Entwicklung der Li-Ionen Batterietechnologie und des EoL-Sektors von Batteriesystemen (vgl. Abschnitt 6) wurde ein Umfragebogen mit insgesamt 13 Fragestellungen erstellt (siehe Anhang 11.2). Der Umfragebogen wurde in deutscher und englischer Sprache im April 2020 an insgesamt 35 Expert*innen aus Industrie und Forschung mit Erfahrung in unterschiedlichen Bereichen der Wertschöpfungskette von Batteriesystemen (von Materialentwicklung bis Recycling) verschickt. Insgesamt wurden 25 Umfragebögen ausgefüllt. Dies entspricht einer Rücklaufquote von ca. 70 Prozent – die entsprechenden Expert*innen finden sich in Anhang 11.1 aufgeführt. Nicht alle Fragebögen wurden vollständig beantwortet. Bei unausgefüllten Fragestellungen wurden diese von der auszuwertenden Grundgesamtheit abgezogen.

Für beide Fragestellungen (Batterietechnologie und Kreislaufstrategien) wurde jeweils eine individuelle Bewertungssystematik entwickelt bzw. angewendet um die impliziten Ergebnisse der Expert*innenbefragung in explizite Aussagen zu transformieren. Der Umweg über die nachfolgend vorgestellten Bewertungsmethoden wurde gewählt, um eine möglichst objektive Einschätzung zu generieren. Die beiden Methoden sind im Folgenden jeweils im Detail beschrieben (Abschnitt 5.2 und 6.1). Die Einzelergebnisse der Expert*innenbefragung sowie die aggregierten Aussagen nach Anwendung der beschriebenen Bewertungssystematiken finden sich in Abschnitt 5.3 und 6.2.

5.2 Bewertungssystematik für die erwartete Entwicklung der Li-Ionen Batterietechnologie

Bezüglich der Entwicklung der Li-Ionen Batterietechnologie wurden die Parameter erwartete Lebensdauer und die Entwicklung des Materialeinsatzes in der Zellchemie analysiert. Diese Aspekte sind bei der Prognose von stofflichen Rückläufermengen und somit Bewertung von Kreislaufstrategien von besonderem Interesse. Hierfür wurden Einflussfaktoren definiert, die sich auf die jeweiligen Parameter auswirken. Die Auswahl dieser Kriterien erfolgte dabei durch eine umfassende Literaturrecherche. Durch die bereits erwähnte Expert*innenbefragung wurde die erwartete Entwicklung dieser Kriterien abgefragt. Auf dieser Informationsbasis wurden anhand der nachfolgend vorgestellten Methodik Abschätzungen bezüglich der genannten Fragestellungen getroffen.

5.2.1 Relevante Einflussfaktoren auf die Batterielebensdauer

Gemäß dem Großteil der analysierten Studien verringert sich der State of Health (SoH) einer EV-Batterie nach ca. 8-10 Jahren auf 80% [119, 120]. Tabelle 4 stellt hingegen einen Überblick über die Garantieleistungen der OEM, sowie die entsprechende Laufleistung dar. Zu erkennen ist, dass die OEM auf die in ihren Fahrzeugen verbauten Batteriesysteme zumeist eine Garantie von 8 Jahren aussprechen, bei einer Laufleistung von bis zu 240.000 km. Zu beachten ist jedoch auch, dass die Werte innerhalb eines Unternehmens je nach Modell variieren können (bspw. BMW i3, i8 vs. BMW i Performance/ PHEV). In der Regel wird dabei auch garantiert, dass der SOH-Wert eines Batteriesystems einen definierten prozentualen Grenzwert im Vergleich zum Auslieferungszustand nicht unterschreitet.

Tabelle 4: Garantien für Batteriesysteme in Abhängigkeit des Alters, Laufleistung und Restkapazität ausgewählter OEM [121–128]

							
Batterie-Garantie [Jahre]	8	8	6-8	8	8	8	8
Laufleistung [km]	160.000	160.000	100.000-160.000	160.000	100.000	160.000	160.000-240.000

Externe Faktoren wie z.B. Betriebstemperatur, Überladung/Entladung, hohe Lade-/Entladeraten und unsachgemäße Lade-/Entladezyklen können den SoH negativ beeinflussen. Im Folgenden werden einige relevante Einflussfaktoren und deren Auswirkungen zusammengefasst dargestellt:

- Maximale Zyklenzahl:** Die Zyklenzahl gibt, als einer der wichtigsten Leistungsparameter einer Batteriezelle, einen Hinweis auf die erwartete Lebensdauer der Zelle. Als gängige Schwelle und somit als Abbruchkriterium für die Lebensdauer gilt häufig die Anzahl der Zyklen, die eine Zelle durchlaufen kann, bevor ihre Kapazität auf 80 % ihrer ursprünglichen spezifischen Kapazität sinkt, oder alternativ der Innenwiderstand sich verdoppelt hat. Jeder Lade-/Entladezyklus und die damit verbundenen Reaktionen des Aktivmaterials gehen mit einer langsamen, für den/die Nutzer*in kaum wahrnehmbaren Verschlechterung der Performance einher. Die fortschreitende Degradation (bedingt durch kalendarische Alterung, oder durch die tatsächliche Nutzung der Batteriezelle) wird durch eine Vielzahl von Mechanismen hervorgerufen. Allgemein unterscheidet man hierbei die beiden Verlustmechanismen (1) Aktivmaterialverlust und (2) Lithiumverlust (auf Grund von Lithium Plating – siehe Abschnitt C-Rate). Diese werden ihrerseits wiederum durch eine Vielzahl von Reaktionsmechanismen bedingt [129, 130].
- Betrieb bei hohem und niedrigem Ladezustand (SoC Bereich):** Der Ladezustand, State-of-Charge (SoC) der Zellen wird als die verfügbare Kapazität (in Ah) definiert und als Prozentsatz ihrer Nennkapazität ausgedrückt. Der SoC-Parameter kann als eine thermodynamische Größe betrachtet werden, die es ermöglicht, die potentielle Energie einer Batterie zu beurteilen. Der SoC-Wert beschreibt die noch verfügbare Kapazität einer Batterie im Verhältnis zum Nominalwert und ist somit eine Kenngröße für den Ladezustand von Batterien. Dies bedeutet, dass eine Batterie bei 100 % SoC vollständig geladen und bei 0 % SoC vollständig entladen ist. Batterie-Management-Systeme (BMS) in EVs ermöglichen es dem Fahrer etwa 80 % seiner gesamten Batteriekapazität (von 90 bis 10 % SoC) zu nutzen [131]. Der nutzbare SoC-Bereich hat direkten Einfluss auf die maximale Zyklenzahl (vor Unterschreiten der 80 %-Schwelle) des Batteriesystems. Wird die Nutzung des SoC Bereichs eingeschränkt, bspw. zwischen 70-20 % ermöglicht dies, die Zyklenzahl einer Batterie auf bis zu 6.000 Zyklen zu verlängern (vgl. Tabelle 5) [132].

Tabelle 5: Zusammenhang zwischen der max. Zyklenzahl und dem genutzten SoC-Bereich [132]

SoC von...bis...[%]	Max. Zyklenzahl	SoC von...bis...[%]	Max. Zyklenzahl
100 – 0	500	80 – 0	3.000
100 – 10	500	80 – 10	3.000
100 – 20	1.000	80 – 20	3.500
90 – 0	1.500	70 – 0	5.000
90 – 10	1.500	70 – 10	5.500
90 – 20	2.000	70 – 20	6.000

- **Temperaturtoleranz:** Temperaturen über 30 Grad Celsius bedeuten eine hohe Belastung für Lithium-Ionen Batteriesysteme. Batteriesysteme verlieren schneller an Leistungsfähigkeit, sobald die Umgebungstemperatur gewisse Grenzwerte überschreitet (insbesondere über längere Zeiträume). Dies liegt in unerwünschten Nebenreaktionen an der positiven Interphase und somit der Oxidation von Bestandteilen des Elektrolyten begründet [133]. Das Ziel ist also die Resistenz der Batteriesysteme auf solche Temperaturextreme zu erhöhen.
- **Maximale Stromstärke (C-Rate):** Die C-Rate (ausgeschrieben Capacity-Rate) ist ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der eine Batterie in Bezug auf ihre maximale Kapazität entladen wird. Eine C-Rate von „1“ bedeutet, dass der Entladestrom die gesamte Batterie in einer Stunde entlädt. Somit entspricht bei einer 50 kWh-Batterie eine C-Rate von 1 C einem Entladestrom von 50 kW. Wird der empfohlene maximale Lade-/Entladestrom einer Batterie überschritten, so hat dies negative Auswirkung auf den SoH. So beträgt beispielsweise die empfohlene maximale kontinuierliche Entladungsrate für NCA-Zellen 1C um eine maximale Lebensdauer zu garantieren [134]. Durch unsachgemäße Nutzung kann die tatsächliche C-Rate jedoch viel höher liegen. Eine hohe Stromstärke bedeutet eine große Diffusionsgeschwindigkeit der Lithium-Ionen durch den Elektrolyten. Zu hohe Ladeströme (zu schnelle Reaktionsgeschwindigkeit der Li-Ionen) oder zu geringe Temperaturen (zu langsame Reaktionsgeschwindigkeit der Li-Ionen) während des Ladevorgangs resultieren im sogenannten Lithium-Plating, einer unerwünschten lokalen Ansammlung von metallischem Lithium an der Anodenoberfläche [129, 130]. Auch bei idealen Ladebedingungen können nach einigen Ladezyklen durch das kontinuierliche Wachstum der SEI-Schicht (solide electrolyte interface) die Poren der Elektroden verstopfen. Diese Ablagerungen führen zu einer verfrühten Alterung und somit zu Fehlfunktionen der Batterien [133, 135]. Dieses Phänomen ist bei allen Li-Ionen-Zellchemien zu beobachten. Die Ladegeschwindigkeit und somit der maximale Ladestrom einer Batterie ist insbesondere bei EVs eine relevante Kenngröße. Mehrere Batterie- und Automobilhersteller zielen auf einen schnellen bis ultraschnellen Ladevorgang ab. Dabei soll das vollständige Aufladen in weniger als 30 Minuten vollbracht sein [136, 137]. Entsprechend wird zumindest seitens der Industrie eine signifikante Erhöhung der maximalen C-Rate mittelfristig als möglich erachtet.

5.2.2 Relevante Einflussfaktoren auf die Batteriechemie

Obwohl bereits einige Roadmaps für die Entwicklung der LIB-Technologie existieren, ist aktuell noch nicht absehbar, welche Batteriechemien sich nach 2030 auf dem Markt etablieren werden. Manche Studien sprechen von einer Dominanz der NMC-Chemie [138], andere Studien prognostizieren hingegen den Durchbruch von alternativen Zellchemien [139–141]. Die Mehrheit vorliegender Analysen ist sich jedoch einig, dass eine Marktdurchdringung von Post-Lithium-Ionen Technologien vor 2030 eher unwahrscheinlich ist. So fokussiert die nachfolgende Abschätzung auf die Marktentwicklung von LIB.

Laut einer Marktanalyse von Frost & Sullivan wird der Anteil der Nickel-Mangan-Kobalt-Chemie (NMC) an der gesamten Batterieproduktion bis 2025 von 19% (im Jahr 2018) auf 48% steigen [142]. Hierbei ist zu erwähnen, dass NMC-Chemien mit unterschiedlichen Massenanteilen und entsprechenden individuellen Vor- und Nachteilen existieren:

- NMC 111: mit einer quantitativ gleichen Zusammensetzung der Elemente Ni, Mn und Co. Hohe chemische Stabilität.
- NMC 532/ 622: mit höherer Energiedichte und niedrigerem Preis als NMC 111 aufgrund eines höheren Nickelanteils und eines geringeren Kobaltgehalts.
- NMC 811: sehr aktuell, höchste theoretische Leistung; allerdings mit potentiellen Sicherheitsbedenken (z.B. thermal runaway).

Um das zukünftige Recyclingpotential abzuschätzen, ist es wichtig, die mögliche Entwicklung der unterschiedlichen NMC-Derivate zu beurteilen. Wie im Abschnitt 5.2 beschrieben, gibt es mehrere Faktoren, die bei einer solchen Analyse berücksichtigt werden müssen. Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Entscheidung über die zu wählende Kathodenchemie sind:

- **Steigende Rohstoffpreise:** Da die meisten Batteriehersteller derzeit keine langfristigen Festpreisverträge mit Lieferanten von kritischen Materialien wie bspw. Kobalt haben, würden Fluktuationen in den Preisen der entsprechenden Metalle letztlich zu erhöhten Batterieproduktionskosten führen. Der Kobaltpreis ist extrem volatil, und die Nachhaltigkeit dieses Elements hinsichtlich den Umständen seiner Förderung ist fraglich. Auf der anderen Seite zeichnet sich Nickel durch eine höhere Verfügbarkeit in der Erdkruste aus, ist zudem geografisch breiter verteilt und wird dementsprechend in größeren Mengen gefördert. Da die Materialkosten einen signifikanten Anteil zu den gesamten Produktionskosten von LIB beitragen und Kobalt hierbei im Besonderen zu Buche schlägt, werden unter Berücksichtigung steigender Rohstoffpreise nickelreiche Kathodenformulierungen favorisiert [143–145]. Ein höherer Nickelanteil bringt eine höhere Kapazität und eine höhere Energie mit sich.
- **Erhöhung der Energiedichte und der Kapazität:** Im Falle von NMC, steigert eine Erhöhung des Nickelanteils bei gleichzeitiger Verringerung des Kobaltanteils die Entladungskapazität und Energiedichte, da die Lithiummenge, die reversibel in das Kathodenmaterial ein- bzw. ausgelagert werden kann steigt. Zum Beispiel besitzt NMC 111 eine spezifische Kapazität von 160 mAh g^{-1} , wobei dieser Wert bei NMC-811 mehr als 200

mAh g⁻¹ erreicht [146]. Die Energiedichte liegt bei etwa 600-650 Wh kg⁻¹ für NMC111 und 760 Wh kg⁻¹ für NMC 811 [147].

- **Verringerung des Batteriegewichts:** Die Reichweite eines EV hängt nicht nur von der Batteriekapazität, sondern auch vom Gewicht der Batterie ab. Die Zellen mit hohem Ni-Gehalt haben eine höhere gravimetrische Energiedichte und benötigen daher weniger aktive Materialien [147]. Weniger aktives Material reduziert das Gewicht einer Zelle, was letztendlich das Gewicht des Packs und schließlich das Gesamtgewicht des Fahrzeugs verringert [148].
- **Erhöhung der Temperaturtoleranz und der Stabilität (Sicherheit):** Nickelreiche Kathoden stehen aufgrund geringerer Stabilität der Kathoden/Elektrolyt-Interphase vor Herausforderungen in Bezug auf die Zyklenstabilität und die thermische Stabilität. Problemstellungen in Bezug auf Herstellung, Stabilität und Sicherheit von NMC 811 bergen die Gefahr, dass die erwartete Marktdurchdringung der Zellchemie möglicherweise zurückhaltender zu bewerten ist. Zudem bestehen bei Kathoden mit einem Nickelanteil von $\geq 80\%$ derzeit noch diverse Schwierigkeiten hinsichtlich der Kommerzialisierung in Bezug auf Pulvereigenschaften und Elektrodenherstellungsprozesse. Bezüglich einer Begegnung von Sicherheitsbedenken wie Temperaturtoleranz und -stabilität sind zusätzliche Additive erforderlich, die möglicherweise zu erhöhten Produktionskosten führen.

Nicht alle der beschriebenen Einflussfaktoren haben die gleiche Auswirkung auf die Wahl der NMC-Zusammensetzung. So ist beispielsweise die Erhöhung des Rohstoffpreises für die Produktionskosten relevant, während die meisten anderen Faktoren für die Leistung und Sicherheit von Elektrofahrzeugen von Bedeutung sind. Deshalb ist es wichtig, ihre Gewichtung zu berücksichtigen (Abschnitt 5.3.2).

5.2.3 Methodik

Bezüglich der eingeführten Fragestellungen hinsichtlich der Entwicklung technologischer Parameter künftiger Generationen von LIBs (Lebensdauer & Zellchemie), wurde eine individuelle Bewertungssystematik entwickelt. Anstatt die Expert*innen explizit nach Ihrer Einschätzung bzgl. des Zustandes der LIB-Technologie im Jahr 2030 zu befragen, wurden die gewünschten Resultate implizit abgeleitet. Dies geschah durch Befragung nach der erwarteten Entwicklung der eingeführten themenspezifischen Einflussfaktoren. Hierbei konnte nach Form einer geschlossenen Frage aus vorgegebenen Antwortmöglichkeiten gewählt werden, die für die Bewertungsmethodik in numerische Werte umgewandelt wurde. Von den Antworten der befragten Expert*innen wurde für die nachfolgenden Berechnungen jeweils diejenige ausgewählt, die am Häufigsten gegeben wurde. Wurden für einen Einflussfaktor gleich viele Antworten für zwei unterschiedliche Antwortmöglichkeiten vergeben, wurde die Antwortmöglichkeit mit der progressiveren Ausprägung gewählt (bspw. „Hoch“ > „Gering“, „Stimme zu“ > „Stimme nicht zu“). Tabelle 6 stellt die Antwortmöglichkeiten und die entsprechenden numerischen Umrechnungsfaktoren (x) dar.

Tabelle 6: Antwortmöglichkeiten für die Entwicklung der jeweiligen Einflussfaktoren

Parameter	Antwortmöglichkeiten	Numerischer Wert (x)
Batterielebensdauer	Gering	0
	Mittel	0,5
	Hoch	1
Batteriechemie	Stimme nicht zu	0
	Unentschieden	-
	Stimme zu	1

Zudem ist hinsichtlich der Zellchemie zu beachten, dass einzelne Einflussfaktoren für nickelreiche Kathodenzusammensetzungen sprechen, andere nicht. Entsprechend werden die Kriterien, die gegen eine Erhöhung des Nickelanteils sprechen invertiert und mit einem Faktor belegt (z). Tabelle 7 stellt die Zusammenhänge dar.

Tabelle 7: Invertierung der Einflussfaktoren der Batteriechemie

Zielkriterium	Favorisiert Ni-reiche Kathoden?	Faktor (z)
Steigende Rohstoffpreise	JA	1
Erhöhung der Kapazität	JA	1
Erhöhung der Energiedichte	JA	1
Erhöhung der Temperaturtoleranz	NEIN	-1
Erhöhung der Stabilität (Sicherheit)	NEIN	-1
Verringerung des Batteriegewichts	JA	1

Da die aufgeführten Einflussfaktoren (Abschnitt 5.2.1) die Lebensdauer und Entwicklung der Zellchemie in unterschiedlichem Maß beeinflussen, wurden die Expert*innen zudem gebeten die Kriterien hinsichtlich ihrer Relevanz zu ordnen und somit eine Gewichtung vorzunehmen (y).

Anschließend wurde für die Entwicklung der Batterietechnologie jeweils ein konservatives und ein progressives Szenario definiert. Während das konservative Szenario keine Weiterentwicklung bis zum Jahr 2030 annimmt (und somit den derzeitigen Ist-Zustand abbildet), wurde das progressive Szenario bestimmt, indem die Expert*innen hinsichtlich der Marktanteile der einzelnen NMC-Zellchemien und der erwarteten Lebensdauer unter Annahme von optimalen Bedingungen im Jahr 2030 befragt wurden. Daraufhin wurde versucht aus diesen beiden Extremwerten ein realistisches Szenario abzuleiten. Hierfür wurde eine Methodik verwendet, die die gebildeten numerischen Werte miteinander verrechnet. Die nachfolgende Formel verdeutlicht die Berechnung des „Realitätsfaktors (r)“. Die verwendeten Variablen sind im vorangegangenen Fließtext definiert. Die Summe wird dabei jeweils über die Anzahl der Einflussfaktoren gebildet (#).

Formel 1: Berechnung des "Realitätsfaktors"

$$r = \frac{\sum_{\# = 1}^{\#} (x_{\#} * y_{\#} * z_{\#})}{\sum_{\# = 1}^{\#} y_{\#}}$$

Die Variable z als Invertierungsfaktor ist dabei optional und findet nur bei der Berechnung des "Realitätsfaktors" für die Batteriechemie, nicht aber bei dem der Lebensdauer Anwendung. Weiterhin wird die Differenz (d) zwischen den Ausprägungen des progressiven- (s_p) und des konservativen Szenarios (s_k) gebildet.

Formel 2: Berechnung der Differenz der Ausprägungen in den definierten Szenarien

$$d = s_p - s_k$$

Ausgehend vom konservativen Szenario und somit vom derzeitigen Ist-Zustand wird durch Verrechnung mit dem „Realitätsfaktor“ das realistische Szenario (s_r) errechnet. Formel 3 stellt den Zusammenhang dar.

Formel 3: Berechnung des realistischen Szenarios

$$s_r = s_k + d * r$$

5.3 Ergebnisse

Die nachfolgenden Abschnitte stellen die Einzelergebnisse der Expert*innenbefragung dar und bringen diese unter Anwendung der vorgestellten Bewertungssystematik in einen übergeordneten Zusammenhang um Prognosen für die definierten Fragestellungen bezüglich der Entwicklung der Batterielebensdauer und der Batteriechemie abzuleiten.

5.3.1 Bewertung der Entwicklung der Batterielebensdauer

Die meisten in Elektrofahrzeugen verwendeten Batterien haben derzeit eine Garantie von meist 8 Jahren (siehe Abschnitt 5.2.1). Diese wird in vorliegender Untersuchung mit der derzeitigen Batterielebensdauer gleichgesetzt und entspricht somit dem konservativen Szenario (s_k). Nach Ansicht der 24 Expert*innen wird die durchschnittliche Lebensdauer einer EV-Batterie im Jahr 2030 in einem technisch fortschrittlichen und somit progressiven Szenario (s_p) auf durchschnittlich 12.2 Jahre geschätzt. Abbildung 11 stellt die Rückmeldungen der Expert*innen hinsichtlich der Einschätzung der Batterielebensdauer unter Annahme eines progressiven Szenarios im Jahr 2030 dar.

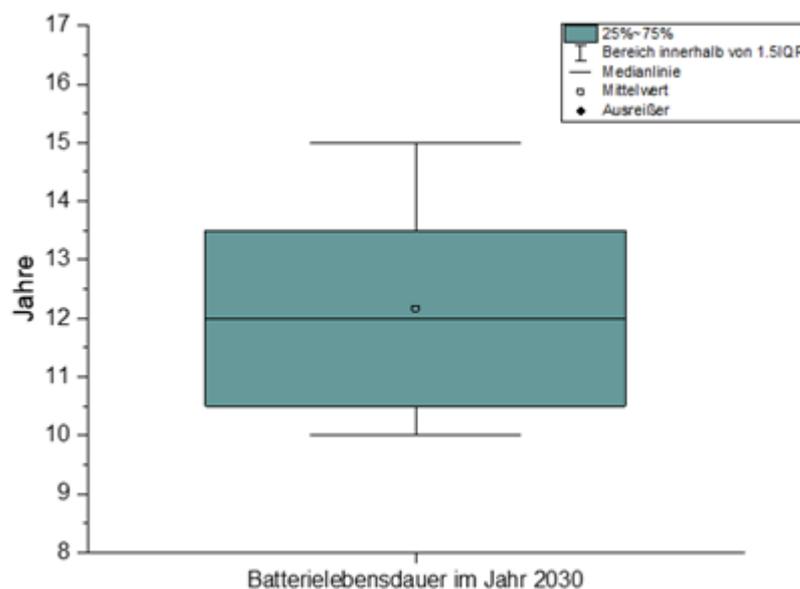


Abbildung 11: Batterielebensdauer im Jahr 2030 im progressiven Szenario

Nach der Auswertung der 21 Antworten bzgl. der Gewichtung der relevanten Einflussfaktoren ergibt sich die in Abbildung 12 dargestellte Reihenfolge:

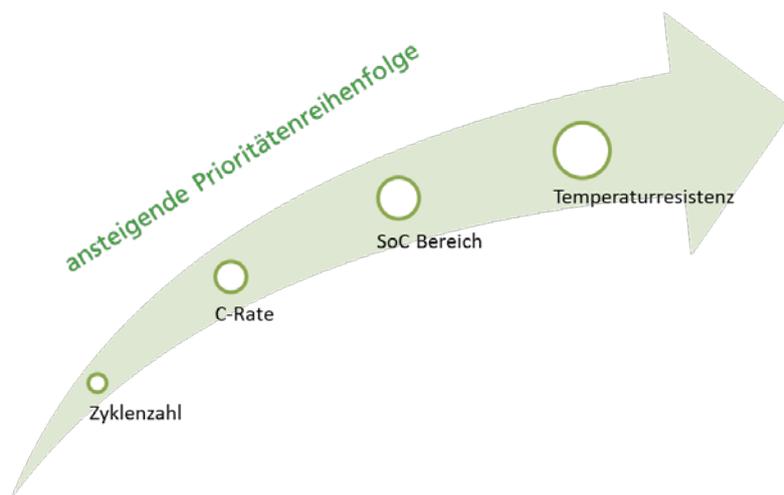


Abbildung 12: Prioritätenreihenfolge der Einflussfaktoren auf die Batterielebensdauer

Während nach Bildung des Durchschnitts aller 21 Rückläufer eindeutige Ergebnisse hinsichtlich der Positionierung der Temperaturresistenz und der Zyklenzahl abgeleitet werden konnten, wurden die Auswirkungen von SoC Bereich und C-Rate nahezu gleich bewertet. Es ist also zu schlussfolgern, dass aus Sicht der Expert*innen künftige Entwicklungen in der Batterietechnologie insbesondere auf eine höhere Unempfindlichkeit gegenüber Schwankungen der Betriebstemperatur fokussieren sollten.

Die folgende Tabelle stellt die Verteilung der Einschätzungen bzgl. des Entwicklungspotentials der einzelnen Einflussfaktoren dar. Markiert ist jeweils die dominierende Antwort und somit diejenige, die für die Berechnung des realistischen Szenarios herangezogen wird.

Tabelle 8: Entwicklungspotenzial der einzelnen Einflussfaktoren auf die Lebensdauer

Einflussfaktoren	Entwicklungspotenzial bis 2030			Anmerkungen
	Gering	Mittel	Hoch	
Erhöhung der Temperaturresistenz	3	10	6	Es wird nicht erwartet, dass die thermische Stabilität einer Batterie bei extrem hohen oder extrem niedrigen Temperaturen in hohem Ausmaß verbessert wird
Breiterer SoC Bereich	4	14	1	Es wird nicht erwartet, dass der SoC –Bereich im Betrieb extrem verbessert wird
Erhöhung der C-Rate	2	6	10	Aufladen/Entladen mit höheren C-Raten wird als möglich bewertet
Erhöhung der maximalen Zyklenzahl	0	9	10	Höhere Zyklenzahl als heute werden erwartet

Unter Berücksichtigung der resultierenden Gewichtung sowie der erwarteten Entwicklung der Einflussfaktoren und dem definierten konservativen und progressiven Szenario wird unter Zuhilfenahme der in Abschnitt 5.2.3 beschriebenen Bewertungssystematik ein realistisches Szenario hinsichtlich der Entwicklung der Batterielebensdauer errechnet.

Entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise erhält man einen „Realitätsfaktor“ von 0,65. Verrechnet mit der Differenz zwischen progressivem und konservativem Szenario von 4,2 Jahren, ergibt sich für das Jahr 2030 eine realistische erwartete Lebensdauer von Lithium-Ionen Batteriesystemen von gerundet 11 Jahren.

Zusätzlich zur Erstnutzung besteht die Möglichkeit Batterien am Ende der identifizierten Lebensdauer einer Zweitnutzung zuzuführen. Die gesamte Lebensdauer des Batteriesystems wird entsprechend um diese Nutzungszeit verlängert. Im Zuge der vorliegenden Untersuchung wurden auch hierzu Abschätzungen getroffen. Die entsprechenden Ergebnisse finden sich in Abschnitt 6.2

5.3.2 Bewertung der Entwicklung Batteriechemie

Das in Abbildung 13 dargestellte Säulendiagramm stellt die aktuelle Marktsituation der unterschiedlichen NMC-Derivate [138] und die Zukunftsprognosen der Expert*innen unter Annahme eines progressiven Szenarios dar. Wie aus der Grafik hervorgeht, sind die befragten Expert*innen der festen Überzeugung, dass der Marktanteil von NMC 111 drastisch sinken und der der NMC 811 entsprechend steigen wird. Die Zunahme des Nickelgehalts verringert nach derzeitigem Stand der Technik jedoch die Stabilität einer Batterie, was bedeutet, dass NMC 532 und NMC 622 trotzdem weiterhin Konkurrenzalternativen zu NMC 811 bleiben werden.

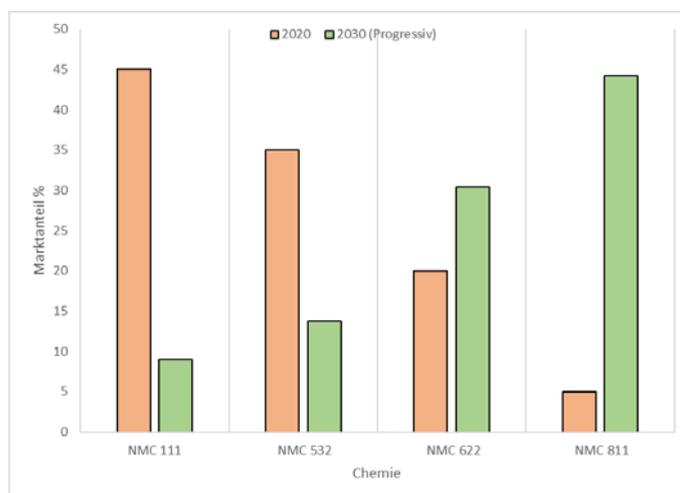


Abbildung 13: Heutige und künftig erwartete (2030) Marktanteile der NMC-Zellchemien

Analog zu Abschnitt 5.3.1 wurden die Expert*innen gefragt, wie sie die in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Einflussfaktoren hinsichtlich ihrer Wirkung auf eine Änderung der dominierenden Kathodenzusammensetzung von NMC-Batterien einordnen würden. In Summe beantworteten 17 Expert*innen diese Frage, wovon die Mehrzahl "steigende Rohstoffpreise" als den wichtigsten Einflussfaktor für die zukünftige Entwicklung der dominierenden Batteriechemie in Richtung höherer Nickelanteile wählten (Neigung zu NMC 811). Erhöhung der Kapazität und Energiedichte folgen hinsichtlich des Ausmaßes ihrer Auswirkungen dem Rohstoffpreis. Die gesamte Reihenfolge wird in Abbildung 14 dargestellt.

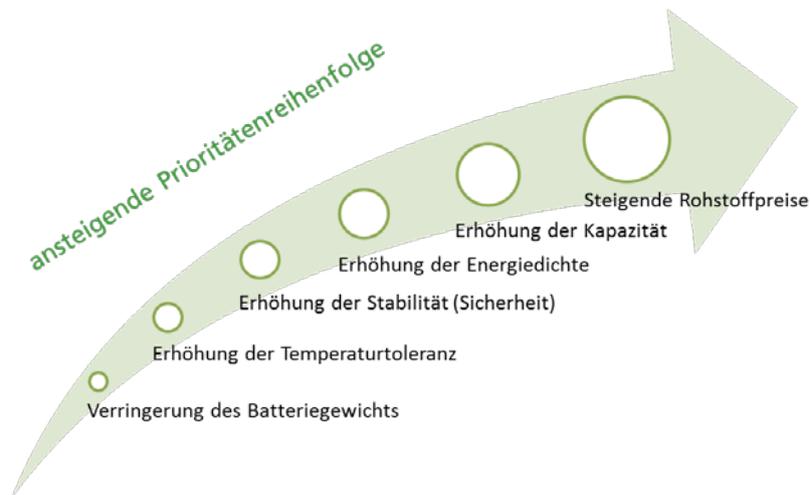


Abbildung 14: Prioritätenreihenfolge der Einflussfaktoren auf die Batteriechemie

Tabelle 9 listet noch einmal alle relevanten Einflussfaktoren auf und zeigt die Einschätzung der Expert*innen zur zukünftigen Entwicklung auf. Abermals sind die dominierenden Antworten der 17 Expert*innen für die einzelnen Einflussfaktoren fett markiert. Für die weitere Bewertung wurden Rückmeldungen mit der Antwortmöglichkeit „Unentschieden“ vernachlässigt. Nach der beschriebenen Vorgehensweise bei Gleichstand der Rückmeldungen, dominiert hinsichtlich der steigenden Rohstoffpreise die Rückmeldung „Stimme zu“.

Tabelle 9: Entwicklungspotenzial der einzelnen Einflussfaktoren auf die Batteriechemie

Einflussfaktoren	Entwicklungspotenzial bis 2030			Anmerkungen
	Stimme nicht zu	Unentschieden	Stimme zu	
Die Rohstoffpreise für Batteriematerialien werden steigen	8	9	8	Bezüglich der Rohstoffpreise sind die Expert*innen geteilter Meinung. Dies kann als Abbild volatiler Rohstoffmärkte interpretiert werden.
Die Energiedichte von Batteriesystemen wird zunehmen	0	3	22	Hinsichtlich der Entwicklung der Energiedichte herrscht weitestgehend Einigkeit. Hohe Energiedichten sprechen für nickelreiche Kathoden
Das Gewicht von Batteriesystemen wird abnehmen	5	4	16	In Sachen Temperaturtoleranz und Gewichtsabnahme der künftigen Batteriesysteme entsteht ein ähnliches Meinungsbild
Die Temperaturtoleranz von Batteriesystemen wird zunehmen	3	7	15	
Die Stabilität von Batteriesystemen wird zunehmen	1	8	16	In Übereinstimmung mit der Literatur [149] rechnet die große Mehrheit der Expert*innen, dass sich die Stabilität und Kapazität des Batteriesystems verbessern wird.
Die Kapazität von Batteriesystemen wird zunehmen	1	4	20	

Verrechnet man entsprechend der beschriebenen methodischen Vorgehensweise das konservative mit dem progressiven Szenario, so erhält man die in Tabelle 10 dargestellten Differenzen. Diese werden wiederum mit dem kalkulierten „Realitätsfaktor“ (0,626) für die Entwicklung der Batteriechemie verrechnet. Entsprechend erhält man realistische Marktanteile, die der letzten Zeile der Tabelle 10 zu entnehmen sind.

Tabelle 10: Marktanteile der NMC-Zellchemien in den definierten Szenarien [%]

Szenario	NMC 111	NMC 532	NMC 622	NMC 811	Referenz
Konservativ	45	30	20	5	Laut Literatur [138]
Progressiv	9	14	30	47	Laut Expert*innen
-	-36	-16	10	42	Differenz
Realistisch	23	20	26	31	Berechnung

5.3.3 Weitere Erkenntnisse aus der Expert*innenbefragung (Batterietechnologie)

Ausgehend von den Einschätzungen der Expert*innen hinsichtlich einiger weiterführender Fragen, die dem Fragebogen in Anhang 11.2 zu entnehmen sind und den Erfahrungen der Autorenschaft, können zudem die nachfolgenden weiterführenden Erkenntnisse über Leistungsparameter der LIB-Technologie abgeleitet werden.

In den meisten Anwendungen werden die Batteriezellen aufgrund der niedrigen Zellspannung normalerweise in Serie geschaltet, um Batteriemodule zu bilden und das erforderliche Spannungsniveau zu erreichen. Ein häufiges Problem dabei ist jedoch der Unterschied im Ladezustand (SoC) zwischen einzelnen Batteriezellen in einem Modul. Hierfür gibt es zwei grundlegende Ursachen: (1) Eine derzeit nicht vermeidbare Differenz der Leistungsfähigkeit der Zellen auf Grund von leicht unterschiedlichen Produktionsparametern (Fluktuation bei der Beschichtungsqualität des Elektrodenfilms, Befüllung mit Elektrolyt, usw.). (2) Aufgrund der Zusammenschaltung der Zellen zu Modulen / Packs sind die einzelnen Zellen unterschiedlichen Übergangswiderständen ausgesetzt und werden entsprechend unterschiedlich belastet. Unterschiedliche Kapazitäten, Selbstentladungsraten und Innenwiderstände führen zu einer Variation der Zelleistung. Neben den eben genannten Faktoren gibt es noch weitere Einflussgrößen wie z.B. extreme Temperatureinwirkungen und erhöhte C-Ratenbelastung. Ein typisches Fallbeispiel ist ein nicht homogen gekühlter Batteriepack. Dies führt dazu, dass die im Schnitt wärmeren Zellen stärker altern als die anderen.

All diese Faktoren sind der Grund dafür, dass einige Zellen stärker geschädigt sind während andere Zellen auch nach einigen Jahren noch in einem guten Zustand sind. Um eine längere Lebensdauer der Batterien zu erreichen, sollte diese ungleiche Abnutzung der einzelnen Batterien aufgehoben oder reduziert werden. Die befragten Expert*innen sind sich allerdings nicht darüber einig, ob die ungleiche Abnutzung von Batteriezellen abnehmen wird. Von insgesamt 25 befragten Personen denken 12, dass dieses Problem in der Zukunft gelöst wird, 11 sind unentschieden und zwei glauben nicht, dass dieses Problem bis 2030 gelöst werden kann.

6 Künftige Entwicklung des EoL-Sektors

Neben der Entwicklung der Li-Ionen Batterietechnologie gilt es zu evaluieren welche der in Kapitel 3 beschriebenen Kreislaufstrategien für die Wieder-/Weiterverwendung bzw. Wieder-/Weiterverwertung von Batteriesystemen derzeit das größte Potential aufweist. Auch diese Einschätzung hängt von verschiedenen Faktoren ab, deren Entwicklung anhand vorliegender Untersuchung abgeschätzt werden soll. Ziel ist es eine Entscheidungsunterstützung sowie eine fundierte Diskussionsbasis für die Umsetzung von Kreislaufstrategien im Kontext Lithium-Ionen Batterie zur Verfügung zu stellen. Abermals wird dabei auf Ergebnisse der im Rahmen der Untersuchung durchgeführten Expert*innenbefragung zurückgegriffen.

Die Bewertung und anschließende Priorisierung der betrachteten Kreislaufstrategien anhand geeigneter Zielkriterien erfolgt in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2243 „Recyclingorientierte Produktentwicklung“. Dort werden qualitative und quantitative Recycling-Kriterien beschrieben, die einzeln oder in Kombination als Bewertungsgrundlage dienen sollen [17]. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden dazu die vier Zielkriterien Umfeld, Technologie, Ökonomie und Ökologie aus der VDI-Richtlinie herangezogen, wie in Abbildung 15 dargestellt. Damit werden sowohl technische als auch ökonomische und ökologische Kriterien betrachtet, um eine ganzheitliche Bewertung der Lösungsalternativen vornehmen zu können [17].

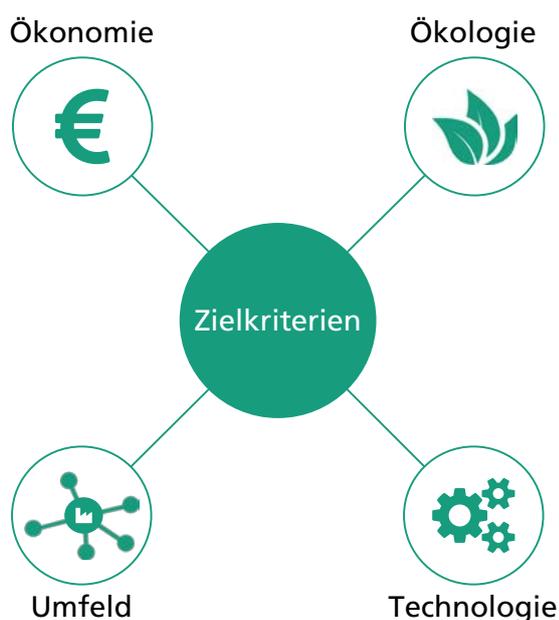


Abbildung 15: Zielkriterien für die Bewertung der Kreislaufstrategien nach VDI-Richtlinie 2243 [17]

Die Zielkriterien setzen sich wiederum aus verschiedenen Einflussfaktoren zusammen. Einflussfaktoren sind in der VDI-Richtlinie 2243 beispielhaft genannt, wurden für die vorliegende Untersuchung jedoch adaptiert, weil nicht alle gleichermaßen auf die betrachteten Kreislaufstrategien zutreffen. Die stoffliche Verwertbarkeit kommt zum Beispiel insbesondere bei der Kreislaufstrategie Reuse/Repurpose nicht zur Anwendung. Das Zielkriterium Umfeld umfasst die Einflussfaktoren aktuelle Marktreife der einzelnen Kreislaufstrategien, die Anwendbarkeit in Abhängigkeit des SoH-Wertes eines Batteriesystems, den Stand der Technik in Forschung und

Umsetzung im industriellen Maßstab sowie etwaige gesetzliche Anforderungen hinsichtlich der Anwendung einer der betrachteten Kreislaufstrategien. Die zukünftige technologische Entwicklung der jeweiligen Prozessrouten der Kreislaufstrategien und die prognostizierte Entwicklung von Batteriesystemen als Produkt bilden die Einflussfaktoren auf das Zielkriterium Technologie. Darüber hinaus geht das Zielkriterium Ökologie, also die Umweltfreundlichkeit der Kreislaufstrategien bzw. deren zugrundeliegende Prozesse und das Zielkriterium Ökonomie in Form von Aufwand und Ertrag in die ganzheitliche Betrachtung und die darauf aufbauende Bewertung der Kreislaufstrategien ein. Die vorgestellte Expert*innenbefragung enthielt ebenfalls Fragestellungen zu den identifizierten Zielkriterien bzw. deren Einflussfaktoren. Eine ausführliche Beschreibung der Expert*innenbefragung und die Darstellung der Ergebnisse erfolgte in Abschnitt 4. Mit Hilfe gezielter Fragestellungen wurden die Expert*innen hinsichtlich ihrer Einschätzung des aktuellen Stands und zur zukünftigen Entwicklung einzelner Einflussfaktoren bis zum Jahr 2030 befragt. Darüber hinaus konnten Informationen aus der Freitexteingabe bei der Frage nach zusätzlichen Herausforderungen bei der Kreislaufführung von Batteriesystemen gewonnen werden. Die Meinungen der Expert*innen gingen neben Literaturrecherchen in die Bewertung der Kreislaufstrategien und der anschließenden Priorisierung ein. Der Aufbau und die Entwicklung der zugrundeliegenden Bewertungssystematik werden in Abschnitt 6.1 näher erläutert.

6.1 Bewertungssystematik für alternative Kreislaufstrategien

Im Folgenden wird die Entwicklung einer übertragbaren Bewertungssystematik für die Priorisierung der betrachteten Kreislaufstrategien für Batteriesysteme erläutert. In der Literatur existiert eine Vielzahl möglicher Bewertungsverfahren, die in unterschiedlichen Bereichen Anwendung finden, für einen Überblick siehe beispielsweise Breiing und Knosala [150]. Die Bewertungsverfahren dienen in der Regel zur systematischen Beurteilung von Objekten bzw. Systemen und unterstützen beider Entscheidungsfindung [151].

Grundsätzlich kann zwischen quantitativen und qualitativen Verfahren unterschieden werden. Quantitative Bewertungsmethoden kommen zum Einsatz, wenn eine numerische Bewertung von Problemen bzw. Themenstellungen möglich ist. Innerhalb der quantitativen Bewertungsverfahren kann zudem zwischen statischen (z. B. Berechnung mit Durchschnittswerten) und dynamischen (z. B. Abzinsung von Ausgaben und Einnahmen) Verfahren unterschieden werden. Anwendung finden quantitative Bewertungsmethoden insbesondere bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Lösungsvarianten und den damit verbundenen Investitionskosten. Die Kenntnis möglichst exakter (in der Regel monetärer) Daten ist jedoch Voraussetzung für die Anwendung solcher quantitativer Verfahren [152].

Da für die Bewertung der in dieser Untersuchung betrachteten Kreislaufstrategien die notwendigen Daten oftmals nicht quantifizierbar sind, bzw. in der Regel nicht-monetäre Aspekte in die Bewertung eingehen, wird ein qualitatives Bewertungsverfahren für die Gegenüberstellung der Kreislaufstrategien herangezogen [152]. Qualitative Bewertungsverfahren betrachten nicht-monetäre Aspekte und finden Anwendung, wenn rein rechnerische Betrachtungen keine eindeutigen Ergebnisse liefern oder nicht sinnvoll durchführbar sind [153].

Als Grundlage für die Entwicklung einer übertragbaren Bewertungssystematik dient die Nutzwertanalyse. Diese ist eine leistungsfähige Planungsmethode und dient der systematischen

Entscheidungsvorbereitung durch Bewertung und Auswahl von Alternativen und eignet sich insbesondere dann, wenn sich ein Gesamtnutzen aus unterschiedlichen Teilnutzen zusammensetzt und eine ausschließlich monetäre Bewertung unzureichend ist. In die Nutzwertanalyse können sowohl objektive als auch subjektive Informationen einfließen [154]. Nach Zangemeister kann die Nutzwertanalyse definiert werden als „Analyse einer Menge komplexer Handlungsalternativen mit dem Zweck, die Elemente dieser Menge entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers bezüglich eines multidimensionalen Zielsystems zu ordnen“ [155]. In Abbildung 16 sind die einzelnen Schritte zur Durchführung einer Nutzwertanalyse aufgeführt. Für die Entwicklung einer übertragbaren Bewertungssystematik hinsichtlich der Kreislaufstrategien für Batteriesysteme wird im Folgenden genauer auf die einzelnen Schritte zur Durchführung der Nutzwertanalyse eingegangen [156].

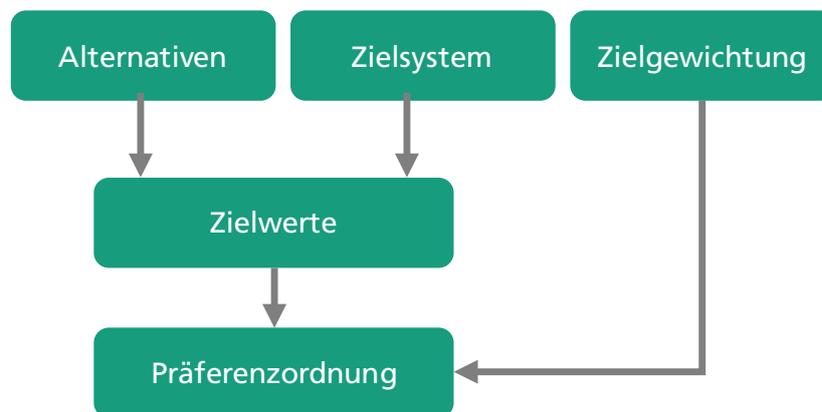


Abbildung 16: Schritte der Nutzwertanalyse, Eigene Darstellung nach [156]

6.1.1 Definition von Alternativen

Die unterschiedlichen Alternativen, aus denen ausgewählt werden soll, werden zunächst gesammelt und entsprechen in diesem Fall der Beschreibung der betrachteten Kreislaufstrategien für Batteriesysteme: Reuse/Repurpose, Remanufacturing und Recycling. Eine detaillierte Beschreibung und Abgrenzung dieser Kreislaufstrategien findet sich in Abschnitt 3.

6.1.2 Ableitung des Zielsystems

Im nächsten Schritt gilt es, ein geeignetes Zielsystem abzuleiten, indem die Zielkriterien festgelegt werden, anhand derer eine Entscheidung getroffen werden soll. Das Zielsystem zur Kreislaufführung von Batteriesystemen besteht aus den folgenden Zielkriterien: Ökonomie, Ökologie, Technologie und Umfeld, wie in Abschnitt 6 beschrieben. Dadurch werden in der Nutzwertanalyse nicht nur rein ökonomische Ziele berücksichtigt, sondern beispielsweise ebenso ökologische Ziele, denen vor der Vision einer etablierten Kreislaufwirtschaft für Batteriesysteme eine besondere Bedeutung zukommt.

6.1.3 Zielgewichtung

Den Zielkriterien, die im vorherigen Schritt abgeleitet wurden, kann zusätzlich ein Prozentsatz hinterlegt werden, der die Wichtigkeit des jeweiligen Kriteriums widerspiegelt. Je höher die Gewichtung des Zielkriteriums, umso höher ist dessen Beitrag zur Gesamtbewertung. Dabei muss die Summe der Einzelgewichtungen insgesamt 100 % betragen. Es ist jedoch nicht zwangsläufig erforderlich, eine Zielgewichtung vorzunehmen, dadurch gehen alle Zielkriterien gleichermaßen in die Bewertung ein. Zusätzlich können auch Zielkriterien als Voraussetzung definiert werden, ohne deren Erfüllung eine Alternative nicht weiter betrachtet wird [152].

Eine solche grundlegende Voraussetzung ist die Rückführung von Batteriesystemen zu entsprechenden Unternehmen, die die jeweilige Kreislaufstrategie umsetzen, denn sonst ist eine Kreislaufführung faktisch nicht möglich. Die Rücklaufquote hat somit direkten Einfluss auf die Menge an Batteriesystemen, die im Kreislauf gehalten werden [157]. Dies gilt jedoch für alle betrachteten Kreislaufstrategien gleichermaßen und kann somit als grundlegende Voraussetzung betrachtet werden. Unter den vorliegenden Umständen wird angenommen, dass dieses Kriterium für alle betrachteten Strategien erfüllt ist (obwohl derzeit noch nicht State-of-the-Art). Die von der Europäischen Union in der Richtlinie 2006/66/EG über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Alttakkumulatoren vorgegebene Mindestsammelquote beträgt für Lithium-Ionen Batteriesysteme derzeit 45 % [158]. Die Befragung der Expert*innen hinsichtlich der Rückführung von Batteriesystemen hat ergeben, dass diese aktuell sogar von einer Rücklaufquote in Höhe von ca. 60 % ausgehen und eine Steigerung der Rücklaufquote auf ca. 85 % in 2030 erwarten, siehe Abbildung 17.

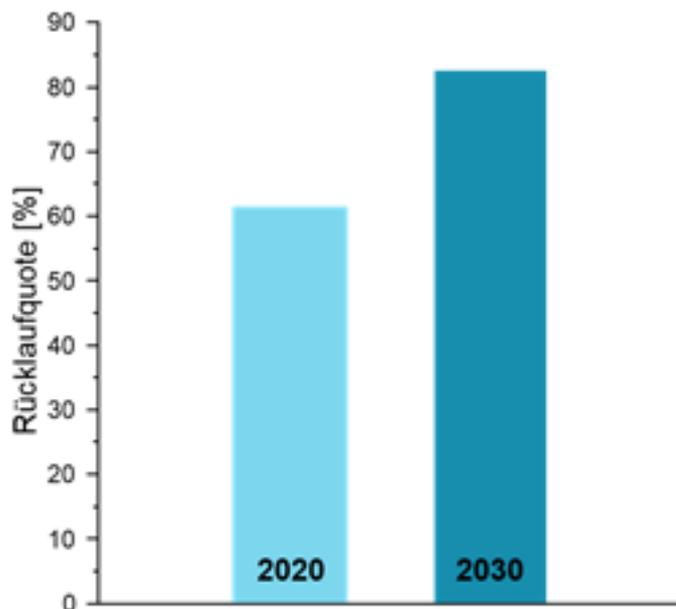


Abbildung 17: Einschätzung der befragten Expert*innen zur Rücklaufquote Heute vs. 2030 [%]

Dazu passt auch die Einschätzung der Expert*innen bezüglich einer zukünftig verbesserten Nachverfolgbarkeit von Batteriesystemen, wovon mehr als 80 % der befragten Expert*innen ausgehen. Dadurch ist diese Voraussetzung für eine Kreislaufführung von Batteriesystemen gegeben. Die Erhöhung der Sammelquote von EV-Batteriesystemen ist zudem auch eines der Ziele des neuen

Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft der Europäischen Kommission [159]. Bei den nicht zurückgeführten Batteriesystemen wird davon ausgegangen, dass diese den Europäischen Binnenmarkt verlassen, um beispielsweise in Gebrauchtwagen verwendet oder als Schrott in Drittländer verkauft zu werden [160]. Die Effizienz einer Kreislaufwirtschaft ist somit auch davon abhängig, zu welchem Zeitpunkt, in welchem Zustand und in welcher Menge die Produkte in den Kreislauf zurückgeführt werden [161]. Somit ist es notwendig, einen stabilen Produktrückfluss zu generieren. Dafür gibt es diverse Instrumente des Handels und der Hersteller, mit denen das Konsumentenverhalten gesteuert werden kann, falls keine vertragliche oder gesetzliche Rückgabe festgelegt ist. Diese Instrumente sind unter anderem Pfandsysteme, Inzahlungnahme und Rückkaufprogramme [162].

Die Bestimmung der Gewichtung der einzelnen Zielkriterien erfolgt mit Hilfe eines paarweisen Vergleichs. Im Gegensatz zum „klassischen“ paarweisen Vergleich werden in vorliegender Untersuchung die Zielkriterien für eine Bewertung von möglichen Lösungsalternativen hinsichtlich ihrer Bedeutung miteinander verglichen und nicht die Lösungsvarianten selbst [163]. Dafür werden je zwei Zielkriterien mittels einer Präferenzaussage im Sinne des betrachteten Zielkriteriums beurteilt. Zunächst wird dazu eine Präferenzmatrix aufgestellt, um die zu vergleichenden Zielkriterien gegenüberzustellen. Im nächsten wird Schritt beurteilt, welches der beiden Zielkriterien „wichtiger“ ist, beziehungsweise welchem Zielkriterium aus Sicht des Anwenders eine höhere Bedeutung zukommt. Diesem Kriterium wird entsprechend ein Punkt vergeben. Anschließend erfolgt eine zeilenweise Summierung und die Ermittlung der Gesamtpunktzahl, aus der sich die prozentuale Verteilung und damit die Gewichtung der Zielkriterien ergeben. Der Paarweise Vergleich wurde mit Hilfe ausgewählter Expert*innen durchgeführt und hat zu folgender Gewichtung der Zielkriterien geführt: Umfeld (38,10 %), Technologie (14,29 %), Ökonomie (23,81 %), Ökologie (23,81 %). Es ist an dieser Stelle wichtig anzumerken, dass die Ergebnisse der Zielgewichtung auf den subjektiven Einschätzungen der Expert*innen beruhen und sich dementsprechend in Abhängigkeit der jeweiligen Perspektive eines einzelnen Stakeholders eine andere Gewichtung der Zielkriterien ergeben kann.

6.2 Bewertung und Priorisierung alternativer Kreislaufstrategien

Nachdem die Zielkriterien aufgestellt worden sind und die Zielgewichtung vorgenommen wurde, werden im nächsten Schritt die zugehörigen Zielwerte ermittelt. Diese dienen als Ausgangsbasis für die Bewertung der Kreislaufstrategien und der anschließenden Priorisierung. Grundlage für die Ermittlung der Zielwerte sind sowohl Literaturrecherchen zum aktuellen Stand und der zukünftigen Entwicklung der Kreislaufstrategien, als auch die Ergebnisse der Expert*innenbefragung.

6.2.1 Ermittlung der Zielwerte

Nachdem die Alternativen definiert, die Zielkriterien zur Bewertung abgeleitet sowie die Zielgewichtung durchgeführt wurde, findet im nächsten Schritt die Ermittlung der Zielwerte statt. Der Zielwert ist die an einer Messskala quantifizierte Wirkung (Zielertrag) einer zu bewertenden Alternative auf ein Ziel [156]. Dies bedeutet, dass die einzelnen Zielkriterien mit Punkten bewertet werden. Wichtig dabei ist es sicherzustellen, dass ein definierter Bewertungsmaßstab verwendet wird. Im Rahmen dieser Nutzwertanalyse wird dazu eine fünfstufige Punkteskala zwischen 1 (geringster Zielertrag) und 5 (größter Zielertrag) verwendet.

Ökonomie

Eine Herausforderung bei der Bewertung der Kreislaufstrategien für Batteriesysteme besteht in der Abschätzung der zu erwartenden Aufwände auf der einen und der prognostizierten Erträge auf der anderen Seite. Industrieunternehmen, deren Geschäftsmodell darin besteht eine der Kreislaufstrategien umzusetzen (wie z. B. Recyclingunternehmen), veröffentlichen dazu in der Regel keine Zahlen bzw. ist es meist nicht möglich, diese auf ein einzelnes Produkt herunterzubrechen. Darüber hinaus unterscheiden sich die Batteriesysteme z. B. in ihrem Aufbau und der verwendeten Zellchemie, was allgemeingültige Aussagen zusätzlich erschwert. Ein Vergleich verschiedener Kreislaufstrategien auf dieser Basis ist dadurch nur eingeschränkt möglich und für einen detaillierten Vergleich sind weiterführende Analysen notwendig. Auch in wissenschaftlichen Veröffentlichungen liegt der Fokus vorwiegend auf der technischen Umsetzung, der Optimierung von bestehenden Prozessen oder der Entwicklung und Kombination neuer Verfahrensschritte für eine der betrachteten Kreislaufstrategien. Eine Ausnahme bildet die Arbeit von Foster et al. aus dem Jahr 2014, in der die drei Kreislaufstrategien Reuse/Repurpose, Remanufacturing und Recycling mit dem Betrachtungsgegenstand EV-Batteriesystem gegenübergestellt werden [49]. Allerdings gilt anzumerken, dass auch diese Untersuchung auf einer Reihe von Annahmen beruht. Bezugsgröße ist das Batteriesystem eines Chevrolet Volt mit einem Gewicht von ca. 200 kg, bei einer Kapazität von 16 kWh und Herstellungskosten von ca. \$ 10.000. Darauf aufbauend werden die Aufwände zur Umsetzung der Kreislaufstrategie (u.a. für Arbeit, Material und Transport) den Erträgen in Form von Einsparungen bei der Produktion neuer Batteriezellen oder dem Verkauf der gewonnenen Rohstoffe gegenübergestellt [49].

Tabelle 11 zeigt eine Übersicht der von Foster et al. (2014) prognostizierten Erträge und Aufwände sowie dem daraus resultierenden Gewinn und Verlust für die drei Kreislaufstrategien Reuse/Repurpose, Remanufacturing und Recycling hochgerechnet für das Jahr 2017. Demnach sind die erzielten Erträge durch das Remanufacturing des Batteriesystems, bei dem mit einem Austausch von 10 Prozent der Zellen kalkuliert wurde, am höchsten. Die Erträge durch die Kreislaufstrategien Reuse/Repurpose und Recycling von Batteriesystemen entsprechen nur ca. 40 bzw. 15 Prozent des durch das Remanufacturing möglichen Ertrages. Beim Recycling ist zu berücksichtigen, dass hier die Verkaufspreise der Rohstoffe als Bewertungsgrundlage dienen und diese dynamischen Änderungen im Zeitverlauf unterworfen sind. Demnach sind die entstehenden Kosten für das Recycling derzeit größer als der Ertrag durch den Verkauf der wiedergewonnenen Materialien [19, 49].

Der notwendige Aufwand zur Umsetzung der jeweiligen Kreislaufstrategie ist für das Remanufacturing am höchsten und beträgt für das Reuse/Repurpose von Batteriesystemen nur ca. 60 % und für das Recycling des Batteriesystems ca. 65 % dieses Wertes. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass auftretende Skaleneffekte nur eingeschränkt berücksichtigt wurden. Aus der Differenz zwischen Ertrag und Aufwand ergibt sich der entsprechende Gewinn bzw. Verlust.

Tabelle 11: Prognostizierter Ertrag, Aufwand und Gewinn der betrachteten Kreislaufstrategien pro Batteriesystem für das Jahr 2017 [49]

	Reuse/Repurpose	Remanufacturing	Recycling
Ertrag	\$ 3.382	\$ 7.867	\$ 1.290
Aufwand	\$ 2.735	\$ 4.702	\$ 3.103
Gewinn (+) / Verlust (-)	\$ 647	\$ 3.165	- \$ 1.813

Idjis und da Costa kommen mit einer systemdynamischen Simulation auf ein ähnliches Ergebnis hinsichtlich der Profitabilität von Recycling [164]. Sie ermittelten einen Verlust zwischen 700 €/t und 5.500 €/t für das Recycling von Batteriesystemen im Jahr 2020 und prognostizieren steigende Erträge für das Recycling von Lithium-Ionen Batteriesystemen, sodass bis 2030 der Verlust der reinen Recyclingaktivität zwischen 0 €/t und 1.250 €/t liegen soll [164]. Auch Fischhaber et al. beschreiben, dass das Recycling von Lithium-Ionen Batteriesystemen aufgrund der energieintensiven Prozesse derzeit nicht ökonomisch ist und prognostizierten, dass durch Skaleneffekte und Effizienzsteigerungen zwischen 2024 und 2026 die Gewinnschwelle für das Recycling von NMC-Batterien erreicht werden könnte [165]. Die Strategie-Beratung Roland Berger schätzt ein künftiges Batterierecycling ebenfalls als rentabel ein. Demnach sei bei einem mittelgroßen Batteriesystem mit NMC 811 Zellchemie ein potenzieller Nettogewinn zwischen 12 €/kWh und 15 €/kWh möglich und im Jahr 2030 könnten dadurch rund 250 Tsd. Tonnen Aktivmaterial (Nickel, Kobalt, Mangan, Lithium) zurückgewonnen werden [166]. Die Kreislaufstrategie Remanufacturing wird daher mit vier Punkten bewertet, da hier der größte wirtschaftliche Gewinn möglich ist. Die Kreislaufstrategie Reuse/Repurpose zeichnet sich durch einen niedrigeren Gewinn bei sinkendem Aufwand mit drei Punkten bewertet und das Recycling mit zwei Punkten.

Umfeld

Die Analyse der Marktreife der betrachteten Kreislaufstrategien soll zunächst einen Überblick geben, wie etabliert die betrachteten Kreislaufstrategien bereits sind. Die Kreislaufstrategie Reuse/Repurpose, also insbesondere die Umwidmung von gebrauchten Batteriesysteme für einen anderen Einsatzzweck als in der automobilen Verwendung ist bereits in verschiedenen Studien untersucht worden, siehe dazu unter anderem Fischhaber et al. und Becker et al. für einen Überblick [19, 165]. Dort werden verschiedene Anwendungsfälle, wie zum Beispiel die Bereitstellung von Primärregelleistung und die Verwendung in Hausspeichersystemen beschrieben und die möglichen Potentiale aufgezeigt. Automobilhersteller sind an dieser Kreislaufstrategie interessiert. So kündigte beispielsweise die Groupe Renault an, mit dem „Advanced Battery Storage“ das größte stationäre Energiespeichersystem aus gebrauchten Batteriesystemen aufbauen zu wollen, um damit die Integration von erneuerbaren Energien in das Stromnetz zur erleichtern [167]. Auch deutsche Automobilhersteller haben solche Batteriespeicher auf Basis gebrauchter Batteriesysteme bereits implementiert, wie z. B. die Daimler AG mit einem 13 MWh-Batteriespeicher [168]. Eine Übersicht mit weiteren Forschungsprojekten zum Einsatz in einer 2nd-Life Anwendung findet sich bei Fan et al. [140]. Allerdings gibt es auch kritische Stimmen, die davon abraten, Batteriesysteme zunächst in

einer 2nd-Life Anwendung zu betreiben und in Abhängigkeit der jeweiligen Zellchemie ein Recycling für sinnvoller erachten. Argumentiert wird hierbei insbesondere, dass in EVs hoch performante Batteriesysteme verbaut sind und diese für alternative Anwendungen „überqualifiziert“ sind. Eine frühzeitige Rückgewinnung der Rohstoffe wird von diesen Stimmen entsprechend als sinnvoller erachtet.

In der Automobilbranche ist Remanufacturing bezogen auf konventionelle Komponenten, wie beispielsweise Anlasser, Lichtmaschine oder Turbolader bereits etabliert. Remanufacturing von Batteriesystemen ist bereits Forschungsgegenstand, wie beispielsweise im Projekt „BatteReMan“ [169]. Allerdings befassen sich auch Automobilhersteller intensiv mit der Umsetzung dieser Kreislaufstrategie. Hervorzuheben sind an dieser Stelle insbesondere die beiden deutschen Automobilkonzerne Daimler AG und Volkswagen AG, bei denen mit Remanufacturing als Kreislaufstrategie für Batteriesysteme bereits geworben wird [33, 170]. Laut Angabe der Daimler AG wurden bereits aufgearbeitete Batteriesysteme im vierstelligen Bereich an Kunden ausgeliefert [39]. Recycling wird, aufgrund der gesetzlichen Anforderungen, von allen Automobilherstellern angewandt, in der Regel geschieht dies in Zusammenarbeit mit spezialisierten Recyclingunternehmen. Davon gibt es Europaweit mehr als 15 verschiedene Unternehmen, wie zum Beispiel Umicore NV/SA (Belgien), Duesenfeld GmbH (Deutschland) oder Recupyl AG (Frankreich), mit einer geschätzten Gesamtkapazität für das Recycling von Lithium-Ionen Batteriesystemen von 33 000 Tonnen/Jahr [25]. Zusätzlich gibt es eine Reihe weiterer Forschungs- und Pilotanlagen, mit dem Ziel die Recyclingeffizienz zu erhöhen und neue, umweltschonende Verfahren, z. B. durch die Anwendung von biometallurgischen Prozessen oder dem physischen Recycling, zu entwickeln [63]. Die Forschungsaktivitäten in Deutschland werden zudem in den kommenden Jahren durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung in Form des Batterie-Kompetenzclusters „Recycling / Grüne Batterie (greenBatt)“ mit rund 30 Millionen Euro als Teil des Dachkonzepts „Forschungsfabrik Batterie“ gefördert [41].

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die Anwendbarkeit der Kreislaufstrategien ist deren Abhängigkeit in Bezug auf den State of Health (SoH) eines Batteriesystems. Der SoH ist definiert als das Verhältnis zwischen der aktuellen Kapazität und der Anfangskapazität einer Batterie. Das End-of-Life von Batteriesystemen in ihrer ersten Nutzung in Elektrofahrzeugen wird allgemein mit dem Unterschreiten eines SoH-Werts von 80% definiert, daraufhin können diese jedoch z. B. in 2nd-Life Anwendungen weiterverwendet werden [119, 120].

Im Rahmen der Expert*innenbefragung wurde unter anderem danach gefragt, wie hoch der untere SoH-Grenzwert für die Anwendbarkeit der jeweiligen Kreislaufstrategie in Prozent sein sollte, damit diese eingesetzt werden kann. Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 zusammengefasst. Demnach kann ein Recycling von Batteriesystemen unabhängig von dessen Zustand erfolgen, während der SoH-Bereich für Reuse/Repurpose deutlich kleiner ist und laut Expert*innen von 100 % bis ca. 75 % reicht. Ein Remanufacturing von Batteriesystemen kommt für die Expert*innen bis zu einem unteren SoH-Grenzwert von ca. 65 % in Frage. Zum Vergleich ist zusätzlich der erste Nutzungszyklus in einem Elektrofahrzeug eingetragen.

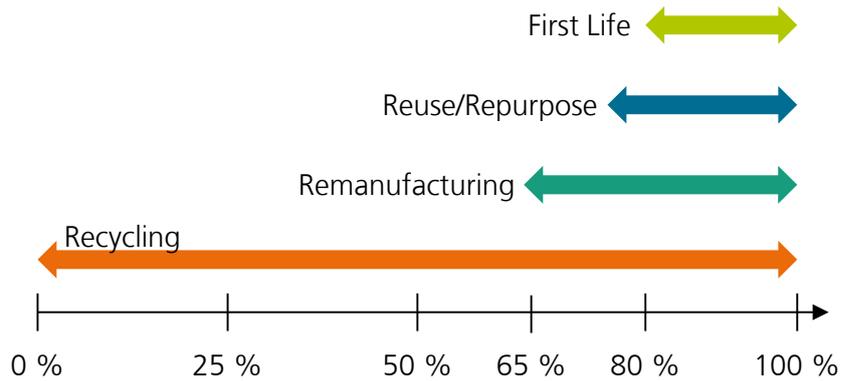


Abbildung 18: SoH-Grenzwert in % für die jeweiligen Kreislaufstrategien

Die Lebensdauer für Batteriesysteme in Elektrofahrzeugen beträgt derzeit ca. 8 Jahre. Durch die Wieder- bzw. Weiterverwendung in einer 2nd-Life Anwendung kann diese noch verlängert werden. Die Meinungen der Expert*innen über die Gesamtlebensdauer eines Batteriesystems inklusive der 2nd-Life Anwendung sind in Abbildung 19 dargestellt. Demnach verlängert sich die ursprüngliche Lebensdauer laut Expert*innen im Durchschnitt um 5,4 Jahre. Somit beträgt die erwartete Gesamtlebensdauer eines EV-Batteriesystems ungefähr 13 Jahre.

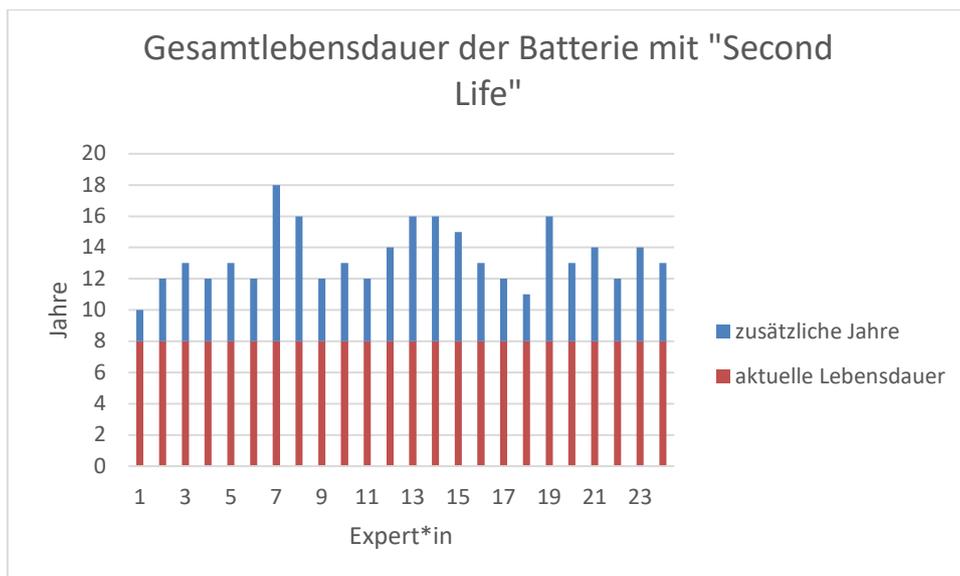


Abbildung 19: Befragung - Verlängerte Lebensdauer durch Second Life

Durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz und die dort beschriebene Abfallhierarchie in § 6 ist eine eindeutige Reihenfolge der hier analysierten Kreislaufstrategien beschrieben. Demnach sind dem Recycling die Abfallvermeidung und die Vorbereitung zur Wiederverwendung vorzuziehen. Dem gegenüber stehen die gesetzlichen Mindestanforderungen an die Behandlung und das Recycling von Batteriesystemen, die in Richtlinie 2006/66/EG der Europäischen Union festgehalten sind und in Deutschland durch das Batteriegesetz in nationales Recht überführt wurden. Die Mindestsammelquote beträgt demnach 45 % und die Recyclingeffizienz 50 % des durchschnittlichen Gewichts von Batteriesystemen, die nicht auf Blei-Säure oder Nickel-Cadmium basieren [158, 171, 172]. Dadurch steht aktuell das Recycling im Vordergrund der Anstrengungen auf europäischer

Ebene. Hintergrund ist die Bedeutung des Recyclings zum Schließen von Materialströmen, denn zum einen sind nicht alle Batteriezellen für ein Remanufacturing geeignet und zum anderen wird auch nach dem erfolgreichen Einsatz in einer 2nd-Life Anwendung anschließend ein Recycling der Batteriesysteme vorgenommen. Eine Kreislaufwirtschaft beziehungsweise das vollständige Schließen der Materialkreisläufe ist somit ohne die Kreislaufstrategie Recycling nicht möglich. Daher erfüllt das Recycling Zielkriterium Umfeld hinsichtlich der Marktreife, der Anwendbarkeit und der Erfüllung gesetzlicher Anforderungen vollständig und wird mit fünf Punkten bewertet. Der Fokus des Gesetzgebers liegt derzeit nicht auf der Umsetzung möglicher 2nd-Life Anwendungen, daher wird Reuse/Repurpose mit 3 Punkten und wegen der geringeren Marktreife Remanufacturing mit zwei Punkten bewertet.

Im Rahmen des neuen Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft, den die Europäische Kommission im März 2020 veröffentlicht hat, wird speziell auf EV-Batteriesysteme eingegangen. Demnach will die Kommission einen neuen Rechtsrahmen vorschlagen und dabei insbesondere die Sammel- und Recyclingquoten verbessern, zudem soll die Transparenz erhöht werden, um Wiederverwendung, Umfunktionierung und Recycling von Batteriesystemen zu erleichtern [159].

Ökologie

Die Umweltfreundlichkeit der betrachteten Kreislaufstrategien wird an dieser Stelle nur qualitativ bewertet, für eine detaillierte Gegenüberstellung verschiedener Kreislaufstrategien ist eine Ökobilanzierung (engl. Life Cycle Assessment) notwendig. Für die priorisierte Kreislaufstrategie wird in Abschnitt 8 eine Ökobilanzierung vorgenommen.

Reuse/Repurpose ist die umweltfreundlichste der betrachteten Kreislaufstrategien, denn dadurch wird die Lebensdauer des Produktes verlängert, wobei nur geringfügige Änderungen am Produkt vorgenommen werden. In die Nutzwertanalyse geht dies mit einem Zielwert von vier Punkten ein. Für das Remanufacturing von Batteriesystemen müssen diese demontiert, die Batteriezellen getestet und zu neuen Batteriemodulen und –systemen assembliert werden, wodurch der notwendige Aufwand höher ist. Je nach Ausgestaltung des Remanufacturing wird entweder ein Teil der Batteriezellen/-module gegen neue ausgetauscht, oder aber Batteriezellen/-module mehrerer Batteriesysteme neu kombiniert [42, 173]. Zusätzlich ist es in der Regel notwendig, weitere Komponenten durch Neuteile zu ersetzen, bspw. wenn eine vollständig zerstörungsfreie Demontage nicht möglich ist [42]. Daher erhält Remanufacturing bezogen auf das Zielkriterium Ökologie eine Bewertung von drei Punkten. Das Recycling von Batteriesystemen hat im Vergleich zu den anderen Kreislaufstrategien den höchsten Umwelteinfluss, denn in der Regel sind pyro- und hydrometallurgische Verfahren notwendig, um die in den Batteriezellen enthaltenen Metalle zurückzugewinnen. Pyrometallurgische Verfahren sind gekennzeichnet durch einen hohen Energieaufwand für das Einschmelzen, während bei hydrometallurgischen Verfahren verschiedene Chemikalien zur Abspaltung der Metalle verwendet werden [45, 174]. Daher erhält das Recycling als Kreislaufstrategie für Batteriesysteme eine Bewertung von zwei Punkten.

Technologie

Die Einschätzung hinsichtlich der Entwicklung von Batteriesystemen insbesondere hinsichtlich deren Zellchemie und erwarteter Lebensdauer bis 2030 wurde in der Expert*innenumfrage abgefragt, eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse ist in Abschnitt 4 dargestellt. An dieser Stelle soll gezielt auf

den Einfluss von ausgewählten Produktmerkmalen von Batteriesystemen auf die betrachteten Kreislaufstrategien eingegangen werden.

Zunächst nimmt eine Mehrheit der Expert*innen (60 %) an, dass die Variantenvielfalt von Batteriesystemen bis 2030 nicht abnehmen wird. Es kann also angenommen werden, dass weiterhin verschiedene Zellchemien und Zelldesigns miteinander konkurrieren und sich gleichzeitig auf dem Markt befinden werden. Die ungleiche Abnutzung von Batteriezellen wird laut 45 Prozent der Expert*innen bis 2030 abnehmen, 45 Prozent sind sich diesbezüglich unsicher und weitere 10 Prozent glauben nicht an eine solche Entwicklung. Dies hat insbesondere einen Einfluss auf das Remanufacturing von Batteriesystemen, bei dem einzelne Batteriezellen ausgetauscht bzw. neu kombiniert werden. Sollten sich die Batteriezellen in Zukunft gleichmäßig abnutzen, dann wäre der periodische Austausch der am stärksten abgenutzten Zellen nicht mehr lohnenswert.

Zudem sind 65 Prozent der befragten Expert*innen der Meinung, dass sich die Anschaffungskosten von Batteriesystemen in Zukunft verringern werden, 10 Prozent stimmten dem nicht zu, 25 Prozent waren sich diesbezüglich unsicher. Gleichzeitig herrschte bei den Expert*innen Uneinigkeit hinsichtlich der Entwicklung der Rohstoffpreise zur Herstellung von Batteriesystemen. 30 Prozent gehen von keinem Preisanstieg aus, 35 Prozent haben sich dazu nicht eindeutig geäußert und weitere 35 Prozent gehen von einem Anstieg der Preise aus. Je nachdem, wie sich die Preise für einzelne Rohstoffe und die Zellchemie zukünftiger Batteriesysteme entwickeln werden kann dies ebenfalls einen Einfluss auf die betrachteten Kreislaufstrategien haben. Durch eine Verlängerung des Produktlebens in einer 2nd-Life Anwendung kann das Batteriesystem zwar länger genutzt werden, es ist jedoch kein Zugriff auf die eventuell benötigten Rohstoffe möglich.

Auch hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung der Prozesse, die den jeweiligen Kreislaufstrategien zugrunde liegen wurden die Expert*innen befragt. 75 Prozent der Expert*innen schätzen, dass sich die Demontagefähigkeit von Batteriesystemen bis 2030 verbessern wird. Zudem hat die Demontagefähigkeit laut der befragten Expert*innen gleichzeitig den höchsten Einfluss auf die Umsetzung der Kreislaufstrategie Remanufacturing und den zweithöchsten Einfluss auf die Umsetzung des Recyclings. Für beide Kreislaufstrategien wird sich diese Entwicklung positiv auswirken, insbesondere wenn die Frage nach der Kreislaufführung von Batteriesystemen bereits im Design- und Produktentwicklungsprozess berücksichtigt wird. In Anbetracht der stark ansteigenden Zahl an Batteriesystemen, die es zukünftig zu recyceln gilt, wird zukünftig eine Automatisierung der aktuell noch manuell durchgeführten Demontage notwendig. Mit diesem Thema befasst sich aktuell ein Verbund im bis 2022 laufenden Forschungsprojekt DeMoBat mit dem Ziel einer automatisierten Demontage von Batteriemodulen und E-Antriebsaggregaten [175]. Ebenso wird eine solche Fragestellung im seit Anfang 2018 laufenden Forschungsprojekt AutoBatRec2020 beleuchtet [176]. Neben der Demontagefähigkeit von Batteriesystemen, die eine Kreislaufführung der betrachteten Kreislaufstrategien verbessert, haben die befragten Expert*innen insbesondere eine Verbesserung der Recyclingfähigkeit bis 2030 prognostiziert, insgesamt 80 % der Expert*innen stimmten dieser Aussage zu. Die Ursachen dafür sind vielfältig und umfassen unter anderem die erwarteten strengeren gesetzlichen Anforderungen an die Recyclingeffizienz sowie die angestrebte Verringerung des Versorgungsrisikos der für die Produktion von Batteriesystemen notwendigen Rohstoffe. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass sich die Kosten für das Recycling in Zukunft verringern werden und Skaleneffekte genutzt werden können. Einig sind die Expert*innen auch hinsichtlich einer zukünftig verbesserten SoH-Bewertung, von der 90 Prozent ausgehen. Dies ist eine der Voraussetzungen für die Wahl einer adäquaten Kreislaufstrategie und wirkt sich insbesondere auf

die Kreislaufstrategien Reuse/Repurpose und Remanufacturing positiv aus, weil dadurch bspw. nur solche Batteriezellen dem Recycling zugeführt werden, die nicht für eine Wieder- bzw. Weiterverwendung geeignet sind. Auch hinsichtlich der Nachverfolgbarkeit gehen 90 Prozent der Expert*innen von einer Verbesserung aus, dies kann neben erhöhten Sammelquoten im Idealfall auch dazu führen, dass entsprechende Daten zum jeweiligen Batteriesystem bereitgestellt werden können, was wiederum bspw. die Recyclingeffizienz erhöhen kann. Aus Sicht eines der Expert*innen ist eine eindeutige Zuordnung von Batteriezellen zu einem standardisierten Datensatz notwendig, der unter anderem den Aufbau des Batteriesystems und weitere Details enthält, um die Effizienz der Kreislaufstrategien zu steigern. Tabelle 12 zeigt die Bedeutung der sechs Einflussfaktoren für die drei Kreislaufstrategien Reuse/Repurpose, Remanufacturing und Recycling. Der Einfluss auf die jeweilige Kreislaufstrategie wurde in absteigender Reihenfolge von den Expert*innen festgelegt. Dort lassen sich die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Kreislaufstrategien gut ablesen, denn während beispielsweise die SoH-Bewertung und die Demontagefähigkeit für ein Remanufacturing die beiden wichtigsten Einflusskriterien sind, hat die SoH-Bewertung nur eine geringe Bedeutung für das Recycling, ebenso wie die Demontagefähigkeit auf die Kreislaufstrategie Reuse/Repurpose. Bei Betrachtung der drei wichtigsten Ergebnisse zeigt sich, dass insbesondere der Demontagefähigkeit, der SoH-Bewertung und der zukünftigen Preisentwicklung der für die Herstellung der Batteriesysteme notwendigen Rohstoffe eine wichtige Rolle zukommt.

Tabelle 12: Ergebnis Expert*innenbefragung

	Reuse/Repurpose	Remanufacturing	Recycling
1	Verbesserte SoH-Bewertung	Verbesserte Demontagefähigkeit	Steigende Rohstoffpreise
2	Steigende Rohstoffpreise	Verbesserte SoH-Bewertung	Verbesserte Demontagefähigkeit
3	Sinkende Preisunterschiede	Steigende Rohstoffpreise	Änderung der Zellchemie
4	Änderung der Zellchemie	Sinkende Preisunterschiede	Änderung des Zelldesign
5	Änderung des Zelldesign	Änderung des Zelldesign	Verbesserte SoH-Bewertung
6	Verbesserte Demontagefähigkeit	Änderung der Zellchemie	Sinkende Preisunterschiede

Vor dem Hintergrund der zukünftigen Entwicklung von Produkt und Prozess werden für die Kreislaufstrategie Recycling vier Punkte vergeben, denn mit dieser können zukünftige Entwicklungen wie steigende Rohstoffpreise oder eine zunehmende Variantenvielfalt und daraus resultierende Herausforderungen bewältigt werden. Reuse/Repurpose wird mit drei Punkten bewertet, denn in Zukunft ist von einer Verbesserung der dafür notwendigen SoH-Bewertung auszugehen, während die Demontagefähigkeit sowie die Entwicklung der zukünftigen Zellchemie eine deutlich geringere Rolle spielen. Remanufacturing erhält für dieses Zielkriterium zwei Punkte, denn auch wenn eine Verbesserung der Demontagefähigkeit in Zukunft erfolgen wird stellen die weiterhin hohe Variantenvielfalt, Preisdruck und insbesondere die Verbesserungen hinsichtlich einer gleichmäßigen Abnutzung der Batteriezellen diese Kreislaufstrategie vor Herausforderungen.

6.2.2 Bildung der Präferenzordnung

Damit sind alle vorbereitenden Maßnahmen zur Durchführung der Bewertung abgeschlossen und die eigentliche Bewertung pro Zielkriterium und betrachteter Kreislaufstrategie kann durchgeführt werden. Durch die Multiplikation der Zielgewichtung mit den vergebenen Punkten können für jede Lösungsalternative die Teilnutzenwerte der einzelnen Kriterien berechnet werden. Der Gesamtnutzwert einer Alternative ergibt sich aus der Summe ihrer Teilnutzenwerte. Anschließend werden die einzelnen Alternativen in eine Rangfolge gebracht [152].

In Abbildung 20 sind die Summen der Teilnutzenwerte für die betrachteten Kreislaufstrategien in Abhängigkeit der Bewertung des Zielkriteriums und dessen Zielgewichtung dargestellt. Daraus lässt sich die Präferenzordnung und damit die Rangfolge Recycling, Reuse/Repurpose und Remanufacturing der betrachteten Kreislaufstrategien ableiten.

		Kreislaufstrategien					
		Reuse/ Repurpose		Remanufacturing		Recycling	
	Gewichtung	Bewertung	Wert	Bewertung	Wert	Bewertung	Wert
		Umfeld	38,10%	3	1,14	2	0,76
Technologie	14,29%	3	0,43	2	0,29	4	0,57
Ökologie	23,81%	4	0,95	3	0,71	2	0,48
Ökonomie	23,81%	3	0,71	4	0,95	2	0,48
Summe		13	3,24	11	2,71	13	3,43
Rang		2		3		1	

Abbildung 20: Präferenzordnung der Kreislaufstrategien

Demnach sollte zunächst sichergestellt werden, dass die Materialkreisläufe geschlossen werden („close the loop“), denn durch die Kreislaufstrategien Reuse/Repurpose und Remanufacturing können die Kreisläufe zwar verlangsamt, allerdings langfristig nicht vollständig geschlossen werden. Reuse/Repurpose verlängert den Produktlebenszyklus und verzögert so die Notwendigkeit des Recyclings auf einen späteren Zeitpunkt. Durch das Remanufacturing wird zwar ein neuer Produktlebenszyklus des Batteriesystems ermöglicht, allerdings sind dafür nicht alle Batteriezellen geeignet, diese müssen entsprechend dem Recycling zugeführt werden. Daher sollte im ersten Schritt ein effizientes Recycling von Batteriesystemen als Grundlage der Kreislaufwirtschaft angestrebt werden [45]. Im nächsten Schritt sollte daran gearbeitet werden, höherwertige Kreislaufstrategien im Sinne des eingangs beschriebenen Kaskadensystems zu etablieren und diese bereits in der Produktentwicklung zu berücksichtigen, wie zum Beispiel durch eine vereinfachte Demontagefähigkeit für das Remanufacturing von Batteriesystemen.

In Abschnitt 8 wird daher das Recycling als priorisierte Kreislaufstrategie hinsichtlich der Umweltwirkungen zweier entsprechenden Prozessrouten genauer analysiert. Anschließend werden Handlungsempfehlungen für die öffentliche Hand und potentielle Marktteilnehmer abgeleitet, mit denen die identifizierten Hemmnisse der alternativen Kreislaufstrategien abgebaut werden können.

7 Erfassung des aktuellen und zukünftigen Marktumfelds der Elektromobilität in Baden-Württemberg

Um die Potenziale des Li-Ionen-Batterierecyclings zu erfassen, ist es notwendig, die erwarteten Mengen an theoretisch verfügbaren Traktionsbatterien aus dem Fahrzeugmarkt zu betrachten. Aufgrund des regionalen Fokus dieser Studie werden vordergründig die Fahrzeugmärkte für Baden-Württemberg analysiert, wobei dies Transporte von End-of-Life Batterien aus oder in Nachbarregionen nicht ausschließen soll. Die Fahrzeugkategorien, die für diese Studie relevant sind, sind Personenkraftwagen (Pkw), leichte Nutzfahrzeuge (Nfz) und Elektrofahrräder. Die folgende Analyse des Fahrzeugmarkts beinhaltet außerdem mit einem Überblick über Marktanreizmechanismen und strategische Ziele im Bereich der Elektromobilität. Diese sind wesentliche Treiber für den zukünftigen Markthochlauf von elektrifizierten Antriebssträngen in Deutschland und Baden-Württemberg.

Kern der Studie sind bottom-up Analysen des zukünftigen Batterieaufkommens für verschiedene Fahrzeugtypen. Prognosen wurden für folgende Fahrzeugtypen erstellt:

- Pkw
- Nfz
- Busse
- Krafträder
- Elektrofahrräder

Damit wurde für jede der fünf Fahrzeugkategorien ein jährliches Batterieaufkommen in kWh für Recycling bzw. Zweitverwendung für den Zeitraum 2020-2050 berechnet. Die Vorgehensweise erfolgte generell in drei Schritten:

- Prognose der jährlichen Neuanmeldungen/Verkäufe von Fahrzeugen mit Traktionsbatterien in Baden-Württemberg
- Annahme zu Batteriekapazität, die in Fahrzeugen verbaut ist
- Annahme zu Batterielebensdauer

Die Vorgehensweise und Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben. Die Ergebnisse aller Fahrzeugkategorien sind illustrativ für die Jahre 2030 und 2050 in Abschnitt 7.7 zusammenfassend dargestellt.

7.1 Übersicht des relevanten Fahrzeugmarkts

7.1.1 Relevante Fahrzeugkategorien

Die vorliegende Studie dient der Abschätzung des zukünftigen Aufkommens von Traktionsbatterien für Recycling-Anlagen in Baden-Württemberg. Dabei sind vor allem diejenigen Fahrzeugkategorien relevant, die in großer Anzahl vorhanden sind sowie ein hohes Elektrifizierungspotential aufweisen. Demnach sind folgende Fahrzeugkategorien von besonderem Interesse:

Pkw: hohe Anzahl, hohes Elektrifizierungspotential

Von größter Relevanz für den Batterie-Recyclingmarkt sind Pkw aufgrund ihrer hohen Anzahl und zunehmender Elektrifizierung des Antriebsstrangs. So waren am 1. Januar 2020 beim Kraftfahrtbundesamt (KBA) 6,7 Mio. Pkw in Baden-Württemberg gemeldet, davon knapp 109.000 elektrifizierte Fahrzeuge. Während dies momentan nur 1,6 % aller Pkw entspricht, gibt es einen starken Zuwachs der Anzahl neu zugelassener Fahrzeuge. In den ersten drei Quartalen 2019 hatten rund 9 % aller neu zugelassenen Fahrzeuge einen elektrischen Antrieb [177]. Dies entspricht insgesamt 35.564 Fahrzeugen und somit fast eine Verdopplung der neu verkauften Elektrofahrzeuge gegenüber dem gleichen Zeitraum im Jahr 2018.

Leichte Lastkraftwagen (Lkw): mittlere Anzahl, hohes Elektrifizierungspotential

Zahlenmäßig überschaubarer als Pkw, aber dennoch in großer Anzahl vorhanden, sind leichte Lkw (Fahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse bis zu 3,5 Tonnen). Am 1. Januar 2019 waren 300.000 leichte Lkw in Baden-Württemberg gemeldet [178]. Während der Anteil von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antrieben aktuell noch gering ist, wird deren Markthochlauf durch die Politik und Industrie vorangetrieben. Zum Beispiel fördert das Ministerium für Verkehr (2020) in Baden-Württemberg den Erwerb von E-Fahrzeugen, leichte Nfz eingeschlossen, in Form eines Kaufbonus von 9.000 Euro. Seitens der Industrie werden beispielsweise Roadmaps zur Umstellung der Antriebsarten hin zu Elektromobilität entwickelt, zum Beispiel vom Verband der Automobilindustrie (VDA).

Elektrofahrräder: hohe Anzahl, hohe Elektrifizierungsrate

Im Jahr 2019 wurden bundesweit 1,4 Millionen E-Fahrräder verkauft [179]. Allerdings sind die Traktionsbatterien von E-Fahrrädern zu klein, um für den Recyclingmarkt nennenswerte Mengen zu liefern.

Weitere Fahrzeugkategorien, wie schwere Nfz, Busse und Krafträder sind wegen ihrer geringer Anzahl oder / und fehlenden Potentialen für deren Elektrifizierung für diese Studie von geringer Relevanz. Dennoch werden diese ebenfalls berücksichtigt.

7.1.2 Rahmenbedingungen des Fahrzeugmarkts

Ein wichtiger Treiber für die aktuelle Verkehrspolitik ist Deutschlands internationale Verpflichtung zu erheblichen Reduktionsmaßnahmen von CO₂-Emissionen. Dementsprechend wurde im Klimaschutzplan 2050 festgesetzt, dass die zulässige Emissionsmenge im Verkehr in Deutschland bis

2030 schrittweise auf 95 Millionen Tonnen (t) CO₂-Äquivalente (CO₂e) begrenzt wird, was einer Senkung um 42 % im Vergleich zu den Emissionen des Jahres 1990 entspricht. Bei einer Verfehlung fallen erheblichen Zahlungspflichten an.

Im Rahmen der Klimapolitik wurden im Klimaschutzprogramm 2030 [180] konkrete Ziele festgelegt, was den Antriebswechsel von Straßenfahrzeugen betrifft. Während heute fast alle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren funktionieren, sollen in Zukunft elektrische Antriebe eine größere Rolle spielen (Tabelle 13).

Tabelle 13: 2030 Ziele der Bundesregierung im Bereich Fahrzeugantriebe

Fahrzeugkategorie	Fahrzeuge
Pkw	7-10 Millionen Elektroautos im Bestand
Schwerer Güterverkehr	Ein Drittel der Fahrleistung im schweren Straßengüterverkehr soll elektrisch oder auf Basis strombasierter Kraftstoffe sein

Um diese Veränderungen im Verkehrssektor herbeizuführen, hat die Bundesregierung Maßnahmen und Regulierungen auf den Weg gebracht, die zu Veränderungen der Rahmenbedingungen des Fahrzeugmarkts führen und damit zum Beispiel den Kaufpreis der Fahrzeuge, die Kfz-Steuer, den Kraftstoffpreis und die Infrastrukturverfügbarkeit erheblich beeinflussen. Im Allgemeinen führen diese zu einer Verbesserung der Marktbedingungen für den Absatz von elektrifizierten Fahrzeugen. Die wichtigsten klimapolitischen Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 sind [180]:

- Umweltbonus (Kaufprämien) für Pkw und leichte Nfz
- Ausbau der Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität und alternative Antriebe für Pkw und Lkw
- Stärkere Ausrichtung der Kfz-Steuer an den CO₂-Emissionen der Fahrzeuge
- CO₂-Bepreisung fossiler Kraftstoffe
- CO₂-Differenzierung der Lkw-Maut zugunsten klimaschonender Antriebe

Zusätzlich zu den Maßnahmen der Bundesregierung gibt es eine Reihe weiterer Regulierungen auf europäischer Ebene, die für die zukünftige Entwicklung des Fahrzeugmarkts von hoher Relevanz sind. Wichtigstes Instrument dabei ist die Europäische CO₂-Flottenregulierungen für Pkw und leichte Nfz sowie schwere Nfz [181, 182]. Im Rahmen dieser Verordnungen sind die europäischen Fahrzeughersteller verpflichtet, Grenzwerte für CO₂-Emissionen der Fahrzeugflotte einzuhalten. Im Pkw-Bereich muss demnach ab 1. Januar 2021 ein Grenzwert von 95 g CO₂/km eingehalten werden, welcher sukzessive bis 2030 verringert wird. Für leichte Nfz ist der Grenzwert auf 147 g CO₂/km festgelegt worden. Für 2025 und 2030 ist jeweils eine Absenkung der Grenzwerte vorgesehen. Vorläufige Zahlen der durchschnittlichen Emissionen von Pkw im Jahr 2018 zeigen, dass im Durchschnitt die europäische Flotte 121 g CO₂/km ausstößt [183].

Bei der Berechnung der Flottendurchschnittswerte wird Strom für E-Fahrzeuge mit Null Emissionen angesetzt. Um die Grenzwerte einzuhalten setzen demnach Fahrzeughersteller vermehrt auf den Absatz von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb.

Nutzfahrzeughersteller müssen ab 2025 erstmals CO₂-Normen für neu zugelassene Lkw und Busse erfüllen. Demnach muss der durchschnittliche CO₂-Ausstoß von neuen schweren Lkw ab 2025 um 15 Prozent geringer sein als 2019. Ab 2030 müssen die CO₂-Emissionen um 30 Prozent geringer sein als im Bezugsjahr.

7.2 Pkw-Markt

Die Verringerung der Treibhausgasemissionen aus dem Straßenverkehr erfordert einen besonderen Fokus auf Pkw, da diese für 44 % der gesamten verkehrsbedingten Emissionen in Europa verantwortlich sind [184]. Seit 2019 ist Deutschland mit 110.000 Fahrzeugen der größte EV-Markt in Europa. Mit einem Elektrofahrzeug-Anteil von 2,8 % am Gesamtneufahrzeugmarkt liegt Deutschland jedoch im europäischen Durchschnitt und weit hinter Norwegen (knapp 45 %), Island (22 %) und den Niederlanden (13 %) [185].

Obwohl die Elektrifizierung des Antriebsstrangs einer der wichtigsten Trends der Automobilindustrie ist und Verkäufe exponentiell ansteigen, ist der Anteil von EVs im Bestand immer noch gering. China konnte 2019 als einziger der weltweit 10 größten Fahrzeugmärkte einen Anteil von 1 % E-Fahrzeuge im Pkw-Bestand erreichen [69]. Vor diesem Hintergrund erfordert die Prognose des zukünftigen Marktanteils von EVs die Berücksichtigung verschiedener Aspekte des Fahrzeugmarkts. Der Markthochlauf elektrifizierter Pkw wird deshalb mithilfe des Simulationsmodells VECTOR21 (Vehicle Technology Scenario Model) erstellt [10, 186, 187].

7.2.1 Methodik

Für die Schätzung des zukünftigen Batterieaufkommens erfolgt im ersten Schritt eine Szenario-basierte Prognose der Neufahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebsstrang für den Zeitraum 2020-2050 mithilfe von VECTOR21. VECTOR21 wurde am DLR Institut für Fahrzeugkonzepte entworfen und kontinuierlich weiterentwickelt. Es handelt sich hierbei um ein Agenten-basiertes Modell für die Simulation des Kaufverhaltens von Neuwagenkunden unter Berücksichtigung komplexer Rahmenbedingungen

Dabei werden zwei verschiedene Szenarien betrachtet. Das „Business-as-usual-Szenario“ (im Folgenden als moderates Szenario bezeichnet) bildet die Fortschreibung derzeitiger Regularien und moderate technische Weiterentwicklungen ab. Das „Progressive Szenario“ setzt eine Verschärfung bestehender Regularien voraus und geht von schnellerem technologischem Fortschritt im Bereich der Elektromobilität aus.

Die Ergebnisse von VECTOR21, jährliche neu zugelassene Fahrzeuge in Baden-Württemberg 2020-2050, werden im zweiten Schritt mit einer Annahme zur Lebensdauer der Batterie im Fahrzeug kombiniert, um das Gesamtvolumen von Batterien im Pkw-Markt in Baden-Württemberg abzubilden. Die Tabelle auf nachfolgender Seite zeigt die wichtigsten Annahmen und Quellen, die für den Pkw-Markt zugrunde gelegt werden.

Tabelle 14: Methode Schätzung Batterieaufkommen: Pkw

	2018	2050	Kommentar / Datenquellen / Annahmen
Anzahl Neuzulassungen: Deutschland	3.435.778	2.961.529	- Quelle 2018 Werte: [188] - Quelle 2050 Werte: [189]
Anzahl Neuzulassungen: Baden-Württemberg	480.095	435.587	- Quelle 2018 Werte: [178] - Market development forecast in [189] applied to the 2018 sales in Baden-Württemberg
Anzahl Neuzulassungen mit elektrifiziertem Antriebsstrang: Deutschland	36.062	Moderates Szenario: 2.035.851 Progressives Szenario: 2.515.308	- Quelle 2018 Werte: [188] - Simulation der 2020-2050 Werte mit DLR-Software VECTOR21
Anzahl Neuzulassungen mit elektrifiziertem Antriebsstrang: Baden-Württemberg	5.806	Moderates Szenario: 299.436 Progressives Szenario: 369.956	- Quelle 2018 Werte: [178] - Simulation der 2020-2050 Werte mit DLR-Software VECTOR21
Durchschnittliche Batteriekapazität / Fahrzeug	BEV: 15 – 76,8 kWh G-PHEV: 5,7 – 11 kWh FCEV: 3 – 4 kWh D-HEV and G-HEV: 1,1 – 1,3 kWh		- [10], [177] und DLR Marktanalysen
Durchschnittliche Nutzungsdauer Batterie im Fahrzeug	Fahrzeuglebensdauer = Batterielebensdauer		

Wie bereits erläutert, werden für diese Studie die jährliche Anzahl der neu zugelassenen Pkw, unterteilt nach Antriebsstrang für den Zeitraum 2020-2050 in Baden-Württemberg, unter zwei verschiedenen Szenarien, „Business-as-usual-Szenario“ und „Progressives Szenario“ simuliert.. Die Simulation wurde für Deutschland auf Postleitzahlen-Ebene durchgeführt, Ergebnisse für wurden dementsprechend für Baden-Württemberg aggregiert.

VECTOR21 bildet nachfrageseitig Kundenprofile mit unterschiedlichen demographischen und ökonomischen Eigenschaften ab sowie jeweils konkreten Anforderungen an das Fahrzeug. Darauf basierend wird für diese Kundengruppen die Zahlungsbereitschaft für Fahrzeuge mit unterschiedlichen Kriterien (z. B. CO₂-Emissionen) abgeleitet. Die wichtigsten Kaufkriterien, die in VECTOR21 berücksichtigt werden, sind:

- Anschaffungskosten Fahrzeug
- Betriebskosten
- Fahrdynamik
- CO₂-Emissionen
- Reichweite

Auf Angebotsseite werden im Modell Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebskonzepten und -technologien, sowie Treibstoffarten generiert. Die Fahrzeugmodelle unterscheiden sich nach folgenden Eigenschaften:

- Antriebsstrang:
 - Verbrennungsmotor; Diesel
 - Verbrennungsmotor; Benzin
 - Verbrennungsmotor; Erdgas (Compressed Natural Gas - CNG)
 - Plug-In Hybrid (PHEV)
 - Hybrid Electric Vehicles; Diesel (D-HEV)
 - Hybrid Electric Vehicles; Benzin (G-HEV)
 - Battery Electric Vehicle (BEV)
 - Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)
- Fahrzeugsegment:
 - Kleinwagen
 - Mittelklasse
 - Oberklasse
- Konfiguration zentraler Antriebskomponenten: z. B. Größe der Batterie
- Einsatz von Effizienztechnologien zur Senkung des Energieverbrauchs: z. B. Leichtbau

Die Kaufentscheidung wird in einem modellierten Umfeld simuliert, das zum einen auf politischen Entscheidungen/Diskussionen (z. B. Kraftstoffbesteuerung oder CO₂-Flottengrenzwert) und zum anderen auf Angaben aus der Literatur (z. B. mögliche Entwicklung der Energiekosten, Ausbau der Lade- und Betankungsinfrastruktur) basiert.

Den Kunden wird unterstellt, dass sie jenes Fahrzeug kaufen, welches ihre Anforderungen an ein Fahrzeug sowie die notwendige Infrastruktur erfüllt und welches für sie hinsichtlich der Gesamtkosten die günstigste Variante darstellt. Die Kunden sind zudem in Adopter-Gruppen eingeteilt, die unter anderem Informationen über die Technologieoffenheit und finanzielle Zuzahlungsbereitschaft für CO₂-Minderung enthalten. Eine Übersicht der wichtigsten Eingabe -und Ausgabeparameter von VECTOR21, sowie Systemgrenzen zeigt Abbildung 21.

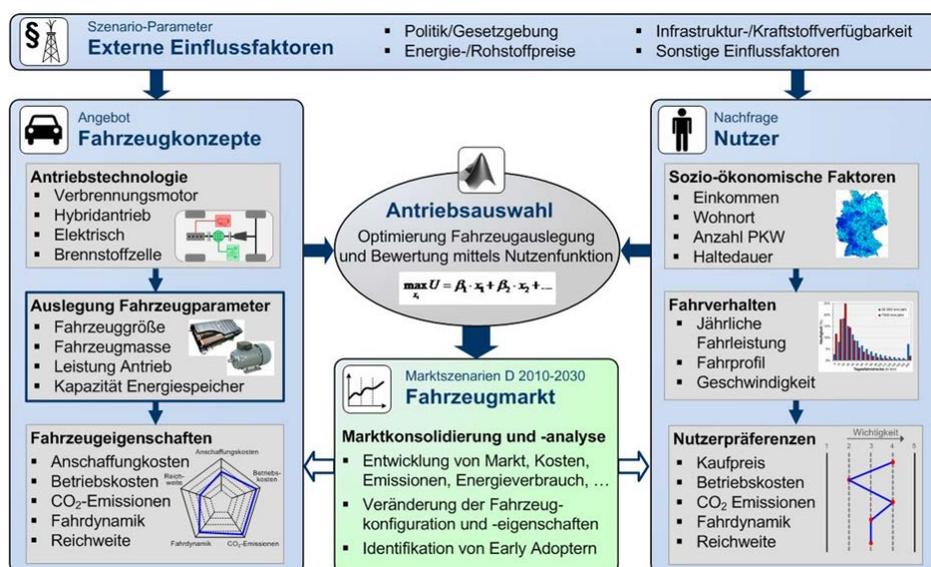


Abbildung 21: VECTOR21 (Pkw-Modell)

Die wichtigsten Einflussgrößen beim Pkw-Kauf und die Abbildung in VECTOR21 werden im Folgenden näher diskutiert sowie weitere Annahmen dargestellt.

2009 führte die Europäische Kommission mit der Verordnung Nr. 443/2009 eine durchschnittliche CO₂-Emissionsgrenze von 130 g/km bis 2015 und 95 g/km bis 2020 für neu zugelassene Kraftfahrzeuge der Kategorie M1 (Pkw) ein [190]. Später einigte sich der Rat der Europäischen Union darauf, das 2020-Ziel auf Ende 2020 zu verschieben [191]. Die letzte Aktualisierung der Verordnung im Jahre 2019 legte die Zielvorgabe für den durchschnittlichen CO₂-Ausstoß für 2030 auf 59 g/km fest [182].

Die spezifischen Grenzen für einzelne Hersteller werden auf Basis des Fahrzeuggewichts ihrer Flotte bestimmt. Zudem gibt es Superkredite und Öko-Innovationen, die bei der Bestimmung der herstellereinspezifischen Ziele angerechnet werden können. Rein batterieelektrische Fahrzeuge werden bei der Berechnung mit Null Emissionen angesetzt. Hersteller, die die spezifischen CO₂-Grenzwerte nicht einhalten, müssen bei einer Grenzwertüberschreitung bis zu 95 € pro Fahrzeug und Gramm CO₂ zahlen. Folglich müssen die Hersteller mit hohen Zahlungen rechnen, sollten sie die CO₂-Emissionsgrenzen überschreiten [190].

Die CO₂-Emissionsnormen haben einen großen Einfluss auf den Pkw-Markt in Europa, da Strafzahlungen bei Nichteinhaltung hoch sein können. Weiterhin bieten elektrifizierte Antriebe, durch ihre Anrechnung von null Emissionen bei vollelektrischen Fahrzeugen, eine gute Strategie für Hersteller, die Durchschnittsemissionen ihrer Flotte wirksam reduzieren zu können.

Nach der ersten Regulierung im Jahr 2009 haben sich die durchschnittlichen CO₂-Emissionen zwischen 2006 und 2011 um 15 % verringert. Somit hat sich die durchschnittliche jährliche CO₂-Reduktionsrate im Vergleich zum Zeitraum vor der Regulierung verdoppelt [192]. Daten zu Pkw-Verkäufen zwischen Januar und März 2020 zeigen außerdem, dass sieben der dreizehn führenden Hersteller ihre spezifischen CO₂-Ziele erreichen können, wenn die durchschnittlichen CO₂-Emissionswerte der verkauften Pkw im Laufe des Jahres gleich bleiben [193].

Aufgrund der strikten CO₂-Emissionsstandards sind diese ein Schlüsselfaktor in VECTOR21. Die bestehenden CO₂-Normen sind jedoch nur für den Zeitraum bis 2030 gesetzlich festgelegt. Im moderaten Szenario wird davon ausgegangen, dass die jährliche CO₂-Reduktionsrate von 37,5 % auch für die Zeit nach 2030 beibehalten wird. Das CO₂-Ziel im Jahr 2050 wird mit 20 g/km angenommen und entspricht somit, bei der derzeitigen Reduktionsrate, annähernd dem Zielwert von 23 g/km. Im progressiven Szenario wird von ehrgeizigeren Zielen ausgegangen und die CO₂-Emissionsgrenze für 2050 dementsprechend auf null gesetzt. Abbildung 22 zeigt die den beiden Szenarien zugrunde gelegten Entwicklungen der CO₂-Grenzen.

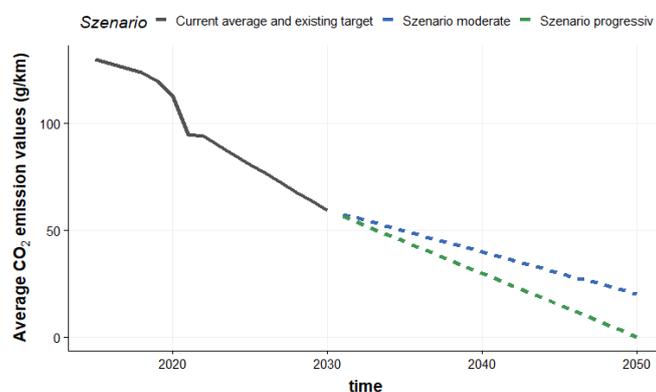


Abbildung 22: CO₂ Emissionsziele in Europa

Die mangelnde Verfügbarkeit an Ladesäulen gilt als eine der größten Hemmnisse für die Einführung elektrischer Fahrzeuge [194, 195]. Um CO₂-Ziele zu erreichen und alternative Kraftstoffe in den Markt zu bringen, hat die Europäische Kommission einen gemeinsamen Rahmen für den Aufbau von Infrastruktur in den EU-Mitgliedsstaaten geschaffen [196].

In VECTOR21 wird die Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur bei der Fahrzeugwahl als Minimalkriterium für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben (Elektro-, Wasserstoff und CNG) abgebildet. Wenn die Infrastrukturverfügbarkeit einen bestimmten Schwellenwert nicht erreicht (dieser ist für verschiedene Kundensegmente unterschiedlich hoch), wird ein Fahrzeug vom Kunden nicht gewählt. Im Modell wird Infrastrukturverfügbarkeit als die Wahrscheinlichkeit definiert, eine freie öffentliche Ladesäule zu finden.

Die in dieser Studie betrachteten Szenarien gehen von unterschiedlichen Entwicklungen im Bereich des Infrastrukturausbaus für elektrische Fahrzeuge, bzw. alternative Kraftstoffe aus. Im moderaten Szenario wird für die Geschwindigkeit des Infrastrukturausbaus für die alternativen Kraftstoffe der Trend der vergangenen Jahre in die Zukunft projiziert. Im progressiven Szenario wird angenommen, dass die Infrastruktur für elektrische und CNG- und Wasserstoff-betriebene Fahrzeuge schneller ausgebaut wird. Insbesondere wird angenommen, dass die Infrastruktur in den Jahren 2030 (Strom), bzw. 2045 (CNG) und 2050 (Wasserstoff) das Niveau der Infrastruktur konventioneller Kraftstoffe erreicht. Die Entwicklung der Infrastruktur für beide Szenarien ist in Abbildung 23 dargestellt.

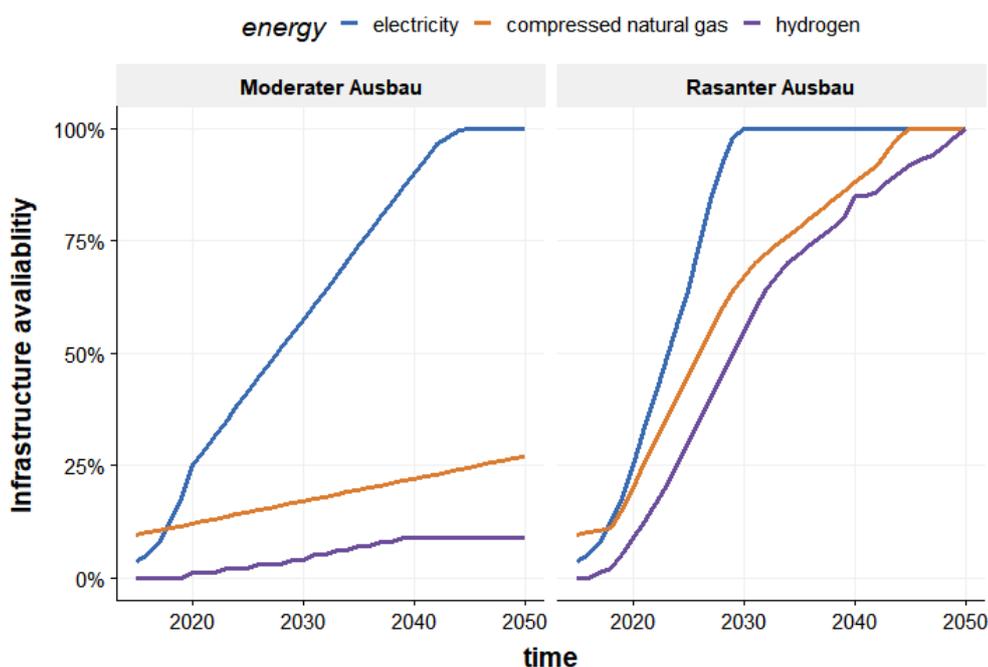


Abbildung 23: Annahmen zur Infrastrukturverfügbarkeit, moderates und progressives Szenario

EVs sind im Allgemeinen teurer als ihre mit Benzin oder Dieselmotoren betriebenen Pendanten. Es wird davon ausgegangen, dass ein beträchtlicher Teil der Kunden ein Elektrofahrzeug nur in Betracht zieht, wenn die Kosten vergleichbar sind [197]. Die höheren Kosten werden vor allem durch die Batterie verursacht. Seit 2007 sind Batteriekosten jährlich um fast 14 % gesunken und nähern sich 150 \$/kWh, was allgemein als Grenze für Kostenparität zwischen EVs und konventionellen Fahrzeugen angesehen wird [198]. Eine McKinsey Studie geht davon aus, dass für ein Auto mit einer 60 kWh-Batterie die Gesamtbatteriekosten bei etwa \$ 13.600 liegen, was etwa 225 \$/kWh

entspricht [185]. Gemäß einer weiteren Studie sind EVs nur dann mit konventionellen Fahrzeugen wettbewerbsfähig, wenn die Batteriekosten unter 100 \$/kWh sinken würden [199].

Die Batteriepreisentwicklung ist in VECTOR21 eine exogene Größe. Annahmen für diese Studie beruhen auf eine aktuelle Untersuchung von Hsieh et al., die als wichtiger Einflussfaktor für zukünftige Batteriekosten unter anderem die Kosten der Rohstoffe für Batterien berücksichtigen [145]. Hsieh et al. weisen darauf hin, dass viele Studien von einer Batteriepreisentwicklung bis unter 100 \$/kWh ausgehen, dass dies jedoch aufgrund eines Anstiegs in Materialkosten eine optimistische Annahme sei [145]. Unter diesen Annahmen würden Batteriekosten deshalb lediglich bis auf 124 \$/kWh reduziert werden; für die Zeit danach sind Schätzungen wegen großer Unsicherheiten schwierig. Daher wird in dieser Studie angenommen, dass die Batteriepreise bis 2030 auf 124 \$/kWh (110 €/kWh) sinken werden und für die Zeit bis 2050 konstant bleiben. Die entsprechende jährliche Entwicklung der Batteriekosten ist in Abbildung 24 dargestellt.

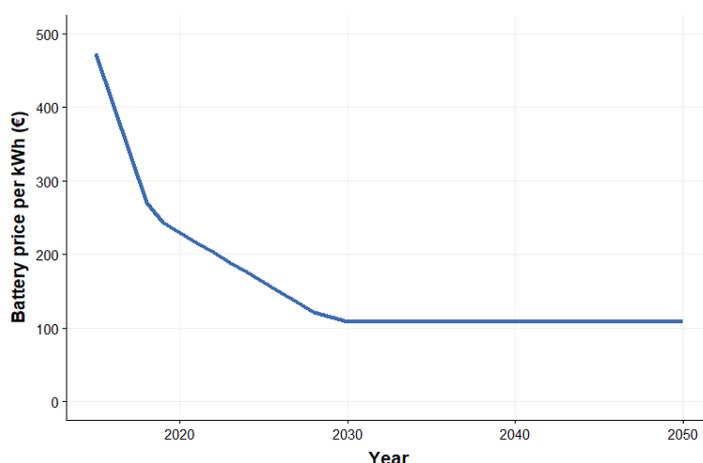


Abbildung 24: Annahme Batteriepreisentwicklung

Annahmen zu Batteriekapazitäten unterscheiden sich nach Antriebsstrang und Fahrzeugsegment. Während die Batterie der Hauptenergiespeicher bei rein elektrischen Fahrzeugen ist, spielt sie bei HEVs eine geringere Rolle. Sie dient lediglich der Verbesserung der Effizienz des Antriebs, während ein Verbrennungsmotor für die Bereitstellung der Energie für den Antrieb zuständig ist. Die folgende Abbildung zeigt die in dieser Studie angenommen Batteriekapazitäten nach Antriebsstrang und Segment (Abbildung 25).

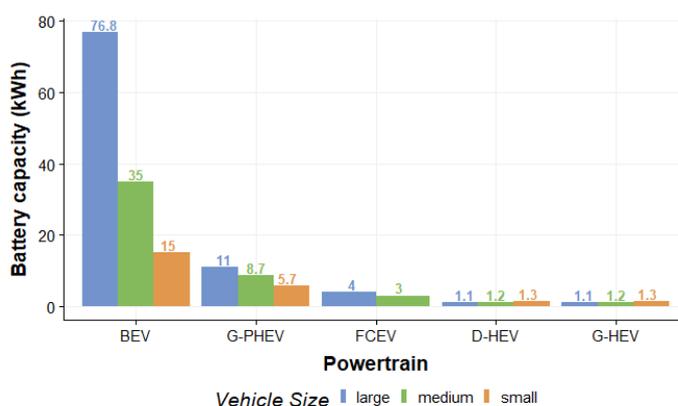


Abbildung 25: Annahme Batteriekapazitäten

Die Energie-/Kraftstoffpreise bestimmen die Betriebskosten des Fahrzeugs und sind somit ein Einflussfaktor für die Kaufentscheidung. In VECTOR21 wird ein Regressionsmodell genutzt, um, basierend auf zugrunde gelegten Entwicklungen des Erdölpreises, die Preise fossiler Kraftstoffe zu ermitteln [10]. Die im Modell verwendeten Kraftstoffpreise sind in Tabelle 15 für jeweils fünf Jahre enthalten.

Tabelle 15: Energiepreise im Modell

Energieart	Einheit	2015	2020	2030	2050
Benzin	€/l	1,13	1,36	1,91	2,01
Diesel	€/l	0,98	1,28	1,99	2,10
CNG	€/kg	0,88	0,91	0,94	0,96
H2	€/kg	9,90	6,60	5,00	5,00
Strom	€/kWh	0,18	0,19	0,19	0,18

Um die Elektromobilität zu fördern, hat die Bundesregierung ein Umweltbonus eingeführt. Aktuell belaufen sich die Kaufprämien für BEVs und FCEV auf 6.000 € und für PHEVs auf 4.000 €. In dieser Studie wird angenommen, dass diese bis 2025 verfügbar sind.

7.2.1 Pkw-Aufkommen in Baden-Württemberg

2018 betrug die Anzahl der Pkw-Neuzulassungen in Baden-Württemberg etwa 480.000 [200]. Für diese Studie wird angenommen, dass sich der Absatz in Baden-Württemberg bis 2050 analog zu den Verkaufszahlen in Deutschland entwickelt. Prognosen für die zukünftige Entwicklung auf Bundesebene beruhen auf Daten des BMVI (2019) [189] und gehen von folgenden Wachstumsraten aus:

- 0,65 % jährliches Wachstum zwischen 2015 und 2020
- 0,18 % jährliches Wachstum zwischen 2020 und 2030
- 0,18 % jährliches Wachstum zwischen 2030 und 2040
- 0,19 % jährliches Wachstum zwischen 2040 und 2050

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der Simulationen für Deutschland und Baden-Württemberg zusammengefasst.

Für die Gesamtentwicklung in Deutschland nimmt in beiden Szenarien (moderate und progressiv) der Marktanteil von Pkw mit elektrifiziertem Antriebsstrang bis 2030 bzw. 2050 substantiell zu (Abbildung 26). Im moderaten Szenario erhöht sich der Anteil von BEVs an Neuzulassungen bis 2030 auf 33 % und bis 2050 auf 69 %. 2050 machen außerdem HEVs 25 % der Neuzulassungen aus, während Fahrzeuge mit reinen Verbrennungsantrieben (Benzin, Diesel und CNG) lediglich 6 % ausmachen; FCEVs und PHEVs spielen bei den Neuzulassungen keine Rolle.

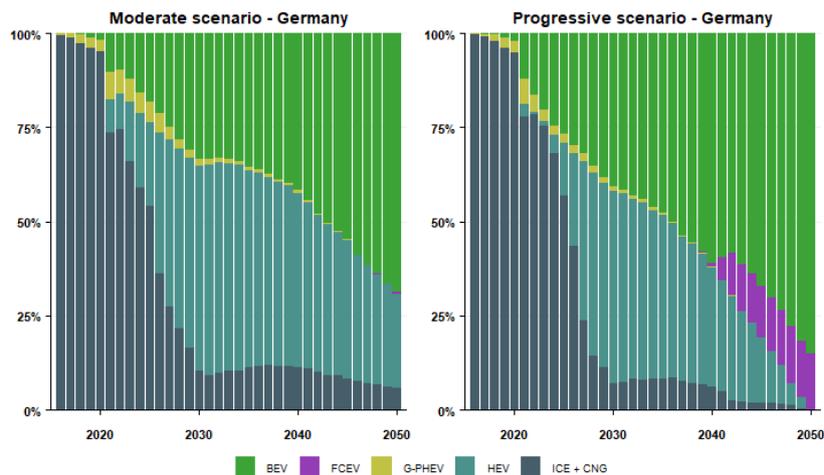


Abbildung 26: Markthochlauf elektrifizierter Pkw in Deutschland

Die Entwicklung der Neuzulassungen in Baden-Württemberg ist vergleichbar mit den Entwicklungen auf Bundesebene. Von Interesse für diese Studie sind die in Pkw verbauten Batteriekapazitäten, die zukünftig recycelt werden müssen. Dementsprechend werden im Folgenden die Ergebnisse für die verschiedenen Fahrzeugsegmente (Kleinwagen, Mittelklasse, Oberklasse) getrennt vorgestellt, da sich diese ja nach Kategorien deutlich hinsichtlich der verbauten Batteriekapazitäten unterscheiden. Wenn die Trends in Gesamtdeutschland auch für Baden-Württemberg gelten, wird die erwartete Zahl der Anmeldungen im Kleinwagen Segment einen Spitzenwert von etwa 100.000 erreichen und dann leicht auf 90.000 sinken. Abbildung 27 zeigt, dass im moderaten Szenario bei den Kleinwagen die Anzahl der neu zugelassenen BEVs bis 2050 auf 50.000 steigt. HEVs werden bis 2030 ansteigen, und dann kontinuierlich auf 30.000 Pkw sinken. Im progressiven Szenario ist ein hoher Anteil an BEVs und FCEVs die einzige Möglichkeit, bis 2050 die CO₂-Emissionen der neuen Pkw-Flotte auf null zu senken, wie in diesem Szenario vorausgesetzt wurde. Bei den Kleinfahrzeugen wird dies durch BEVs erreicht; die FCEVs haben sich in diesem Segment nicht durchgesetzt.

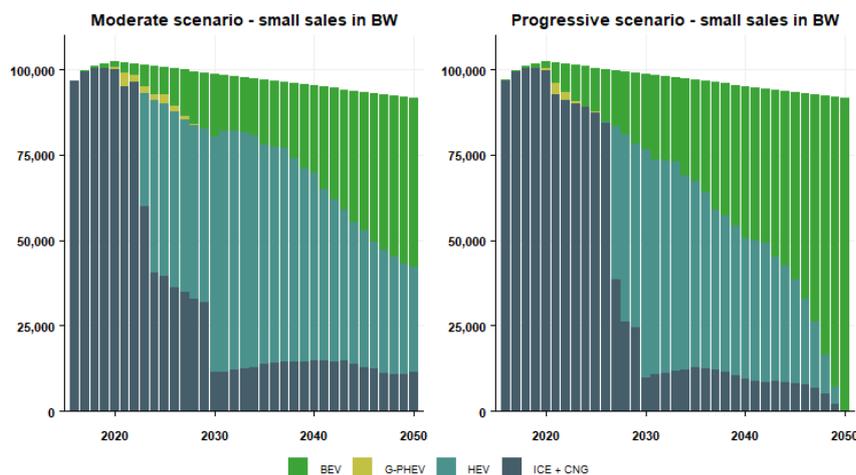


Abbildung 27: Markthochlauf elektrifizierter Pkw (Kleinwagen) in Baden-Württemberg

Mittelklassefahrzeuge machen den größten Anteil aller verkauften Pkw in Deutschland (und Baden-Württemberg) aus. Abbildung 28 zeigt, dass sich der Trend analog zur Entwicklung der Kleinfahrzeuge verhält, der Anteil der BEVs steigt in beiden Szenarien kontinuierlich an. Im

moderaten Szenario ist der erwartete Anteil der BEVs bei Mittelklassefahrzeugen höher als im Segment der Kleinfahrzeuge. Demnach steigt der Anteil bis 2050 auf knapp 80 % aller Neuzulassungen (220.000 Pkw). Ein ähnliches Bild für 2050 ergibt sich im progressiven Szenario, für das der Anteil an BEVs ebenfalls auf 80 % ansteigt. Verglichen mit Kleinfahrzeugen können FCEVs gegenüber BEVs im Mittelklassesegment ab 2040 wettbewerbsfähig werden und Marktanteile dazu gewinnen. Hierbei verdrängen diese die HEVs vom Markt.

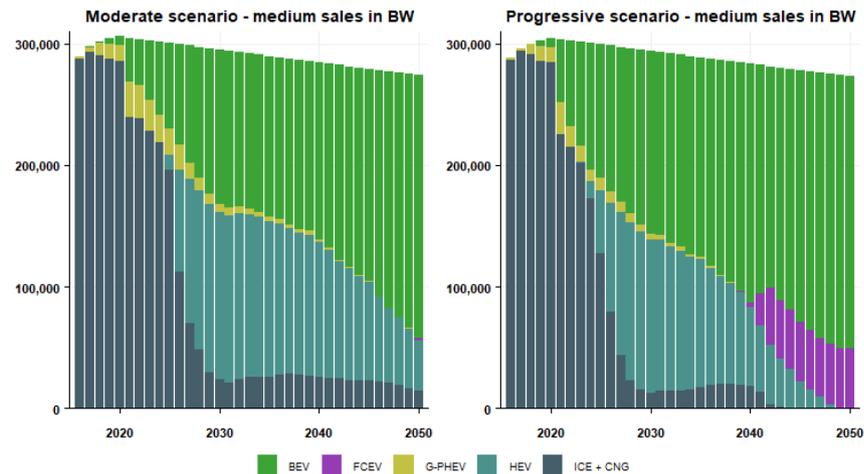


Abbildung 28: Markthochlauf elektrifizierter Pkw (Mittelklasse) in Baden-Württemberg

Abbildung 29 zeigt den Markthochlauf elektrifizierter Antriebsstränge in der Kategorie der Oberklassefahrzeuge. Dort ist insgesamt mit einem geringeren Marktanteil von BEVs, verglichen mit den beiden anderen Fahrzeugsegmenten zu rechnen. Im moderaten Szenario teilen sich BEVs und HEVs den Gesamtmarkt im Jahre 2050 zu fast gleichen Anteilen (48 %, bzw. 51 %). Im progressiven Szenario erreichen FCEVs 2050 einen Marktanteil von rund 25 %, während HEVs vom Markt verschwinden. BEVs machen demnach den Hauptanteil der Fahrzeuge aus.

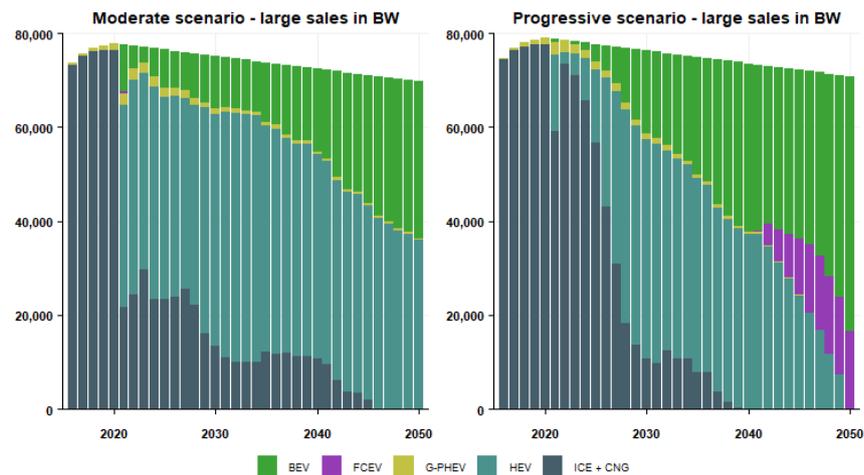


Abbildung 29: Markthochlauf elektrifizierter Pkw (Oberklasse) in Baden-Württemberg

7.2.2 Gesamtaufkommen Batterien für Recycling

Um den Rücklauf von Traktionsbatterien in Baden-Württemberg zu analysieren, werden zunächst die Entwicklung des Fahrzeugbestands und die Anzahl der Fahrzeuge, die den Bestand verlassen, benötigt. Hierfür wird eine größenabhängige Funktion für das Fahrzeugüberleben und den Rückgang der Fahrleistung verwendet. Die Überlebensfunktionen für die drei Fahrzeuggrößensegmente unterscheidet sich erheblich (Abbildung 30). Die großen Fahrzeuge weisen eine flachere Kurve auf. Das heißt, dass diese Fahrzeuge, verglichen mit denen aus dem S- und M-Segment, häufiger in den ersten Jahren nach Erstzulassung den deutschen Fahrzeugmarkt verlassen, auf der anderen Seite jedoch häufiger länger als 15 Jahre gefahren. Zusätzlich erfordert die Berechnung des Fahrzeugbestands eine geeignete Anfangsverteilung für die Fahrzeugkohorten [201], die zu Beginn des ersten Jahres in den VECTOR21-Simulationen vorhanden sind. Jedes Jahr wird eine Kohorte neu zugelassener Autos in den Fahrzeugbestand aufgenommen, während die Fahrzeuge aus den Kohorten der vergangenen Jahre aus verschiedenen Gründen entfernt werden, z.B. Verschrottung oder Export (Abbildung 30). Fahrzeuge mit einem Alter von über 25 Jahren werden aufgrund der geringen Anzahl vernachlässigt. Bisher lässt sich aus den statistischen Daten zur Fahrzeuglebensdauer nicht ablesen, ob E-Fahrzeuge eine andere Lebensdauer als bisherige Verbrennungsfahrzeuge haben. Daher wird für alle Fahrzeuge eine einheitliche Berechnung angewendet.

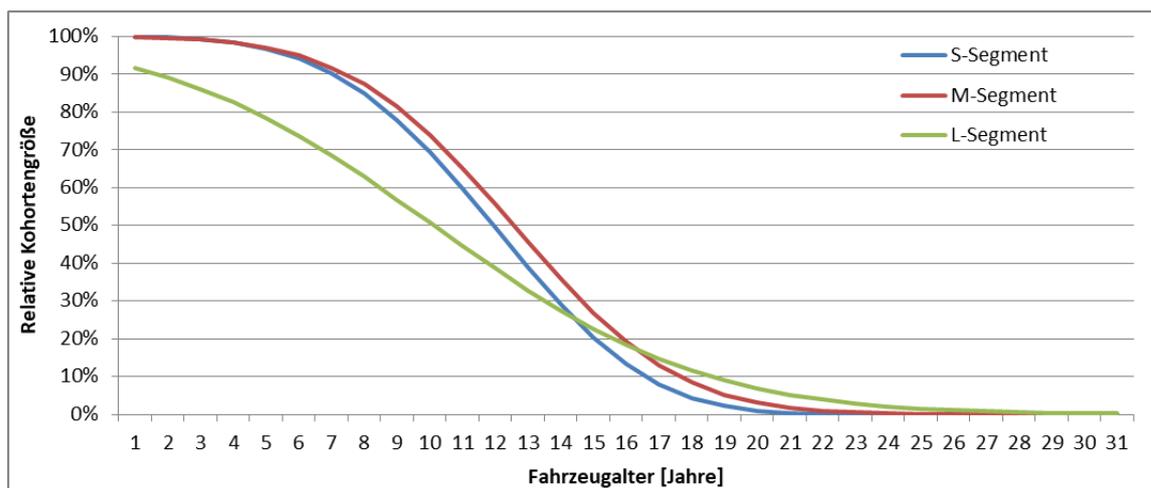


Abbildung 30: Überlebensfunktionen nach Fahrzeuggröße der Fahrzeuge in Deutschland

Aufgrund der langen Lebensdauer von durchschnittlich etwas mehr als 10 Jahren, setzt sich eine Umwälzung der Fahrzeugtechnologien im Vergleich zum Neufahrzeugmarkt langsamer durch. Obwohl die beiden betrachteten Szenarien „moderat“ und „progressiv“ sich deutlich in der Entwicklung der Zusammensetzung des Neufahrzeugmarkts unterscheiden, befinden sich annähernd gleich viele EVs bis 2033 im Markt. Erst ab 2033 weist der Fahrzeugbestand in Baden-Württemberg deutlich mehr EVs im progressiven als im moderaten Szenario auf (Abbildung 31).

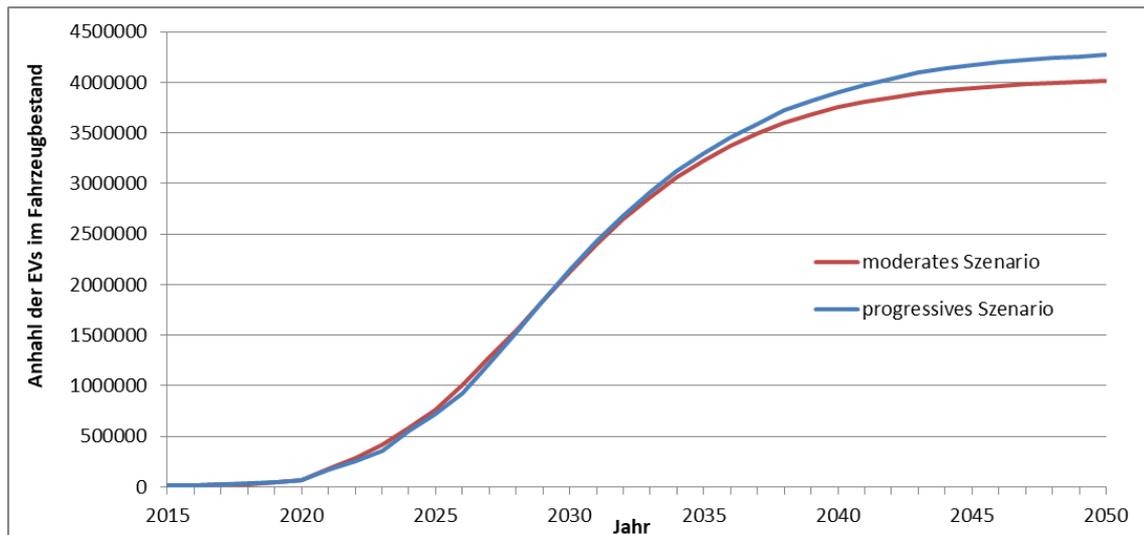


Abbildung 31: Anzahl der EVs im Fahrzeugbestand in Baden-Württemberg 2015 - 2050

Bezüglich der Rücklaufmengen an Traktionsbatterien spielen verschiedene Faktoren eine Rolle. Zum einen sind die Annahmen zur Batterie-Lebensdauer entscheidend für das Gesamtaufkommen an Fahrzeugbatterien. Würden die Traktionsbatterien nach der Garantiedauer von 8 Jahren ausgetauscht werden, so beschleunigt dies den Rücklauf an NMC-Batterien. Aus der Expert*innenbefragung ergibt sich eine durchschnittliche Lebensdauer von etwa 11 Jahren für die NMC-Batterien (s. Abschnitt 5.3.1). Aus diesen Daten ist anzunehmen, dass ein durchschnittliches E-Fahrzeug zwar mit niedriger Batteriekapazität nach einer gewissen Anzahl an Ladezyklen oder Lebensjahren auskommen muss, ein Batterietausch jedoch nicht vorgenommen wird, solange kein tatsächlicher Defekt der Traktionsbatterie vorliegt. Dies erscheint aus heutiger Sicht auch aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll. Ein weiterer Einflussfaktor für die Menge der zur Verfügung stehenden Traktionsbatterien ist die Sammelquote für eben diese. Diese hängt zu einem nicht unerheblichen Maße von dem Verbleib bzw. dem Export der Fahrzeuge ab (Abbildung 32). Aufgrund der Vorgaben zur Altfahrzeugbehandlung ist eine hohe Rücklaufquote von Traktionsbatterien in Zukunft wahrscheinlich, jedoch verlässt aktuell der Großteil der Altfahrzeuge Deutschland als Gebrauchtfahrzeuge. So wurden im Jahr 2018 lediglich 17 % der in Deutschland stillgelegten Fahrzeuge nachgewiesenermaßen der Altfahrzeugverwertung zugeführt, bei weiteren 10 % ist dies möglich, da der Verbleib dieser Fahrzeuge unklar ist [202]. Für EVs gibt es hierzu jedoch keine separat ausgewiesenen Daten. Für eine Abschätzung der potenziellen Rücklaufmenge wurden verschiedene Rücklaufquoten zwischen 30 % und 100 % angenommen. Anhand der bisherigen Erfahrungen mit konventionellen Fahrzeugen erscheint eine maximale Rücklaufquote von 30 % wahrscheinlich. Da sich mit steigendem Fahrzeugalter der SoH der eingesetzten Traktionsbatterie verschlechtert, erscheint eine Erhöhung der Rücklaufquote als realistisch. Diese Annahme ist durch zwei Faktoren begründet. Einerseits ist der Weiterbetrieb des Fahrzeuges mit einer stark gealterten Traktionsbatterie nicht zielführend, weiterhin kann sich der kostenintensive Austausch der Batterie in Altfahrzeugen als nicht wirtschaftlich darstellen. Zudem kann eine Steigerung dieser Quote durch Regulierung und monetär greifende Mechanismen (bspw. Batteriepfand) angestrebt werden. Im moderaten Szenario ergeben sich daraus Rücklaufmengen zwischen 5.000 und 18.000 t an NMC Batterien, während die Mengen im progressiven Szenario mit 7.000 bis knapp 25.000 t etwas höher sind (Abbildung 32). Werden die Batterien der Fahrzeuge, die den Markt verlassen, gesammelt, so können sie zudem noch

einer sekundären Nutzung zugeführt werden. Dies würde einen zeitlichen Versatz der Rücklaufmengen zum Recycling um weitere 5 Jahre bedeuten (s. Abschnitt 5.3.1).

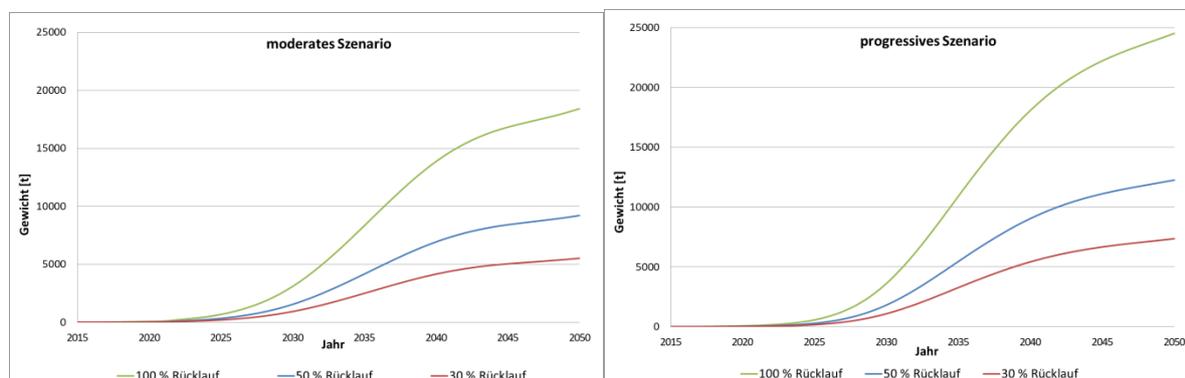


Abbildung 32: Potenzielle Rücklaufmenge an Li-Ionen Batterien aus den Fahrzeugmarkt

7.3 Nutzfahrzeuge

Analog zum Pkw-Bereich wird im Nfz-Sektor ein Wandel der Antriebstechnologien in Richtung Elektrifizierung des Antriebsstrangs erwartet. Wesentliche Treiber sind auch hier Klimaschutzziele, für deren Einhaltung Deutschland sich im Rahmen internationaler Klimaabkommen verpflichtet hat. Weiterhin wird eine Zunahme des globalen Absatzmarkts für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben, vor allem in China, prognostiziert. Deshalb ist zu erwarten, dass in Zukunft vermehrt alternativ betriebene Nfz eingeführt werden. Nebenbatterie- oder wasserstoffbetriebene, Fahrzeugen sind ebenfalls Konzepte für den Oberleitungsbetrieb von Lkw auf Autobahnen oder für eine Übergangszeit gasbetriebene Fahrzeuge denkbar [203].

Beim KBA waren am 1. Januar 2020 763.096 Nfz Baden-Württemberg gemeldet und stellen damit nach Pkw zahlenmäßig die zweitgrößte Kategorie zulassungspflichtiger Fahrzeuge dar. Darunter fallen Lkw (388.734 Fahrzeuge), Zugmaschinen (382.868 Fahrzeuge) und Kraftomnibusse (9.225 Fahrzeuge) [204].

Von den insgesamt knapp 390.000 Lkw in Baden-Württemberg sind rund 2.100 vollelektrisch, sowie 51 Hybridfahrzeuge. Lediglich 262 der 9.225 Kraftomnibusse und 136 der 382.868 Zugmaschinen verfügten über einen elektrischen Antriebsstrang [204]. Insgesamt verfügten demnach lediglich insgesamt 0,3 % aller gemeldeten Nfz in Baden-Württemberg über einen elektrischen Antriebsstrang.

7.3.1 Methode

Analog zur Schätzung des Batterieaufkommens von Pkw, erfolgt für den Nutzfahrzeugsektor im ersten Schritt eine Szenario-basierte Prognose der Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebsstrang. Dies wird kombiniert mit Annahmen zu Batteriekapazitäten im Fahrzeug, sowie Lebensdauer der Batterie. Die folgende Tabelle zeigt die wichtigsten Annahmen und Quellen, die zugrunde gelegt wurden.

Tabelle 16: Methode Schätzung Batterieaufkommen: Nfz

	2018	2040	Kommentar / Datenquellen / Annahmen
Anzahl Neuzulassungen: Deutschland	360.693	360.693	- Berücksichtigt Lkw mit zulässiger Gesamtmasse bis 3,5 t; 7,5 t; 12 t; 18 t; 26 t; 40 t, sowie Sattelzugmaschinen - Quelle 2018 Werte: [204, 205] - Annahme für 2020-2040 Werte: Zahl der im Jahre 2018 neu zugelassenen Fahrzeuge wird in der Zukunft konstant fortgeschrieben
Anzahl Neuzulassungen: Baden-Württemberg	39.702	39.702	- Annahme, dass 11% aller in Deutschland neu zugelassenen Nfz in Baden-Württemberg zugelassen werden, basierend auf historischer Entwicklung der Zulassungszahlen von KBA
Anzahl Neuzulassungen mit elektrifiziertem Antriebsstrang: Deutschland	6.326	312.360	- Quelle 2018 Werte: [205] - Simulation der 2020-2040 Werte mit DLR-Software VECTOR21
Anzahl Neuzulassungen mit elektrifiziertem Antriebsstrang: Baden-Württemberg	472	34.382	- Die Studie legt die Annahme zugrunde, dass, unabhängig vom Antriebsstrang, 11% aller in Deutschland neu zugelassenen Nfz in Baden-Württemberg zugelassen werden
Durchschnittliche Batteriekapazität / Fahrzeug	z. B. Range Extender 26 t: 240 kWh		- VECTOR21 Annahmen für verschiedene Fahrzeugklassen und Elektrifizierungsvarianten
Durchschnittliche Nutzungsdauer Batterie im Fahrzeug	11,7 Jahre		- Dies entspricht der Lebensdauer von Nfz. Dafür wurde das Durchschnittsalter bei Außerbetriebsetzungen im Zeitraum 1999-2006 zugrunde gelegt ([206])

Der Markthochlauf elektrifizierter Nfz wurde erneut mit dem Simulationsmodell VECTOR21 (siehe zum Beispiel [207]) des DLR Instituts für Fahrzeugkonzepte erstellt.

Das Modell berücksichtigt die wichtigsten Faktoren für die Elektrifizierung der Flotte, unter anderem die Einführung von CO₂-Flottengrenzwerten für leichte und schwere Nfz und Kostendegressionen für Schlüsselkomponenten der Elektromobilität (Elektromotor; Leistungselektronik; Batterien). Das dieser Studie zugrunde gelegte Szenario geht dabei von einer moderaten Entwicklung der für die Elektrifizierung relevanten Rahmenbedingungen und Kosten aus.

Das Modell bildet Lkw und Sattelzugmaschinen ab und deckt demnach 84 % des Nfz-Sektors ab. Es unterscheidet dabei 108 Fahrzeugkategorien, die nach Antriebsstrang und zulässiger Gesamtmasse segmentiert sind:

- Antriebsstrang:
 - Verbrennungsmotor; Diesel
 - Mild Hybrid; Diesel
 - Full Hybrid; Diesel
 - PHEV; Diesel
 - REEV Diesel
 - Verbrennungsmotor; CNG
 - Mild Hybrid; Erdgas (CNG)
 - Full Hybrid; Erdgas (CNG)
 - PHEV; Erdgas (CNG)
 - REEV; Erdgas (CNG)
 - BEV
 - FCEV
 - REEV; Wasserstoff
 - Verbrennungsmotor; Flüssigerdgas (Liquified Natural Gas - LNG)
 - Mild Hybrid; LNG
 - Full Hybrid; LNG
 - PHEV; LNG
 - REEV; LNG
- Zulässige Gesamtmasse:
 - <3,5 Tonnen
 - 3,5 - 7,5 Tonnen
 - 7,5 - 12 Tonnen
 - 12 - 18 Tonnen
 - 18 - 26 Tonnen
 - 26 - 40 Tonnen

VECTOR21 projiziert auf Basis festgelegter politischer Rahmenannahmen (z. B. CO₂-Flottenregulierungen), Energiepreisentwicklungen und Technologiekosten die Anteile der oben aufgeführten 108 Fahrzeugkategorien an den Neuzulassungen in Deutschland. Um im nächsten Schritt die absolute Anzahl der Fahrzeuge zu berechnen wurde angenommen, dass die Zahl der Neuzulassungen über den Betrachtungszeitraum konstant bleibt. Hierfür wurden die jährlichen Fahrzeugneuzulassungen in Baden-Württemberg abgeschätzt. Dies erfolgte basierend auf der Annahme, dass der Anteil der Zulassungen 11 % aller in Deutschland zugelassenen Nutzfahrzeuge ist, basierend auf historischen Daten für 2016 [208], 2017 [205] und 2018 [178], als jeweils 11 % aller Nutzfahrzeuge in Baden-Württemberg neu zugelassen wurden.

Die in Fahrzeugen installierte Batteriekapazität hängt vor allem davon ab, wieviel Energie die Batterie für den Vortrieb bereitstellen soll. Die Fahrzeugmarktmodellierung für diese Studie berücksichtigt außerdem spezifische Batteriekapazitäten entsprechend der zulässigen Gesamtmasse der Fahrzeuge. Tabelle 17 zeigt beispielhaft die durchschnittliche Batteriekapazität für BEV und REEV.

Tabelle 17: Durchschnittliche Batteriekapazität (kWh) von BEV und REEV (Nfz) [Quelle: VECTOR21]

Fahrzeugkategorie	Durchschnittliche Batterieleistung
REEV; Diesel	179 kWh
REEV; CNG	179 kWh
BEV 150 Km Reichweite	179 kWh
BEV 300 Km Reichweite	350 kWh
REEV; Wasserstoff	179 kWh
REEV; LNG	257 kWh

Batteriesysteme in Full Hybrid Fahrzeugen und PHEV ermöglichen elektrisches Fahren über kurze Distanzen und sind dementsprechend kleiner ausgelegt (Tabelle 18).

Tabelle 18: Durchschnittliche Batteriekapazität (kWh) von Full und Plug-In Hybriden (Nfz) [Quelle: VECTOR21]

Fahrzeugkategorie	Durchschnittliche Batterieleistung
Full Hybrid; Diesel	7 kWh
PHEV; Diesel	20 kWh
Full Hybrid; CNG	7 kWh
PHEV; CNG	20 kWh
Full Hybrid; LNG	10 kWh
PHEV; LNG	23 kWh

Bei Wasserstofffahrzeugen wird die Energie für den Vortrieb durch ein mit Wasserstoffbetriebenes Brennstoffzellensystem bereitgestellt; die Batterie dient nur als Puffer zur Speicherung der überschüssigen elektrischen Energie aus der Brennstoffzelle und ist dementsprechend klein ausgelegt. Batterien in Mild Hybriden ermöglichen eine automatische Start-Stopp-Funktion, Rekuperation, Schub und Boost-Funktion, jedoch in der Regel ohne externe Aufladung. Durchschnittliche Batteriekapazitäten dieser Fahrzeuge sind in Tabelle 19 enthalten.

Tabelle 19: Durchschnittliche Batteriekapazität (kWh) konventioneller Fahrzeuge (Nfz)

Fahrzeugkategorie	Durchschnittliche Batterieleistung
Verbrennungsmotor; Diesel	-
Mild Hybrid; Diesel	4 kWh
Verbrennungsmotor; CNG	-
Mild Hybrid; CNG	4 kWh
Wasserstofffahrzeug	5 kWh
Verbrennungsmotor; LNG	-
Mild Hybrid; (LNG	5 kWh

Quelle: VECTOR21

Um das Batterieaufkommen für Recycling oder Zweitverwendung abzuschätzen, ist die Lebensdauer der Batterie ein bestimmender Faktor. In dieser Studie wird angenommen, dass diese mit der Lebensdauer des Fahrzeugs übereinstimmt. Laut KBA [209] schwankte zwischen 1999 und 2006 das Durchschnittsalter der Nutzfahrzeuge bei Außerbetriebssetzungen zwischen 10,3 Jahre (2006) und 10,9 Jahre (2004 und 2005). Basierend auf dem über diesen Zeitraum gemittelten Durchschnitt wird an dieser Stelle also angenommen, dass eine Batterie nach 10,7 Jahren recycelt werden muss bzw. für Zweitverwendung bereit steht.

7.3.2 Ergebnisse

Anfang der 2020er Jahre bleibt der Anteil an elektrifizierten Nutzfahrzeugen noch relativ gering. Dementsprechend fällt 2030 ein geringeres Aufkommen an recycelbaren Batterien aus batterieelektrischen Nutzfahrzeugen an. Diese stammen vor allem von klein dimensionierten Batterien der Mild- und Full Hybrid Fahrzeuge. Bis 2050 erhöht sich das Aufkommen auf 126 MWh (Tabelle 20).

Tabelle 20: Batterieaufkommen für Recycling/Zweitverwendung in Baden-Württemberg (MWh): Nfz

Fahrzeug	2030	2050
Konventionell	35 MWh	6 MWh
Elektro	4 MWh	120 MWh
Gesamt	39 MWh	126 MWh

7.4 Busse

Analog zu den bereits betrachteten Straßenfahrzeugtechnologien, wird der Markthochlauf von Bussen mit elektrifiziertem Antriebsstrang auf nationaler und europäischer Ebene gefördert. So unterstützt beispielsweise das BMU den Kauf von batterieelektrischen Bussen mit einer Förderquote von bis zu 80 % der Investitionsmehrkosten [210].

Am 1. Januar 2020 waren 9.225 Busse in Baden-Württemberg gemeldet, davon 74 vollelektrische und 188 Hybrid-Fahrzeuge [204]. Dies ist ein geringer Anteil; allerdings hat sich der Bestand elektrisch betriebener Busse im Vergleich zum Vorjahr (130 Fahrzeuge) verdoppelt.

7.4.1 Methode

Für die Prognose der zukünftigen Anzahl von Bussen mit elektrischem Antriebsstrang nimmt diese Studie Bezug auf Angaben der NPM. Im nächsten Schritt werden diese Daten mit Annahmen zu fahrzeugseitig installierten Batteriekapazitäten, sowie der Batterielebensdauer kombiniert. Die folgende Tabelle 21 illustriert die wichtigsten Annahmen und Quellen, die dabei zugrunde gelegt wurden.

Tabelle 21: Methode Prognose Batterieaufkommen: Busse

	2018	2040	Kommentar / Datenquellen / Annahmen
Anzahl Neuzulassungen: Deutschland	6.687	6.687	- Quelle 2018 Werte: [205] - Annahme für 2020-2040 Werte: die Zahl der im Jahre 2018 neu zugelassenen Fahrzeuge in der Zukunft konstant fortgeschrieben
Anzahl Neuzulassungen: Baden-Württemberg	979	979	- 2012-2018 wurden jedes Jahr 14% der Busse in Baden-Württemberg zugelassen. Annahme, dass dieser Trend bis 2040 fortgeschrieben wird
Anzahl Neuzulassungen mit elektrifiziertem Antriebsstrang: Baden-Württemberg	47	636	- Quelle 2018 Werte: [205] - Ableitung der 2040 Werte auf Basis des oberen Wert des Zielkorridors, das für elektrifizierte Busse in Deutschland in der NPM für 2030 definiert wurde [203]
Durchschnittliche Batteriekapazität (kWh)	FCEV 20 kWh BEV: 150 kWh	FCEV: 20 kWh BEV: 300 kWh	- Quelle: [52]
Durchschnittliche Nutzungsdauer Batterie im Fahrzeug	13,4 Jahre	13,4 Jahre	- Dies entspricht der durchschnittlichen Lebensdauer von Bussen. Dafür wurde das Durchschnittsalter bei Außerbetriebsetzungen im Zeitraum 1999-2006 zugrunde gelegt (Quelle: [209])

Für die Prognose elektrifizierter Busse wird für diese Studie die in NPM (2019) bestimmte Anzahl elektrifizierter Busse zu Grunde gelegt, die sich bis 2030 im Bestand befinden sollten [203]. Die Datenquelle berücksichtigt sowohl rein batterieelektrische Busse und Hybridsysteme als auch wasserstoffelektrische Busse. Die NPM richtet sich an mit realitätsnahen Empfehlungen und Maßnahmen an die Bundesregierung, um die für 2030 definierten Klimaziele zu erreichen. Unter anderem werden quantitative Ziele hinsichtlich des Markthochlaufs von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssträngen formuliert. Wegen der hohen Unsicherheit bezüglich des Markthochlaufs

elektrifizierter Busse, gibt die NPM für 2030 eine Bandbreite der installierten Fahrzeugbasis von 5.000 bis 16.000 Bussen an.

Für diesen Zielkorridor leitet die vorliegende Studie konsistente Zahlen für einen Markthochlauf von Elektrobussen in Baden-Württemberg ab. Es wird außerdem die Annahme zugrunde gelegt, dass der Busbestand insgesamt über den Betrachtungszeitraum bis 2050 konstant bleibt. Angesichts der Entwicklung zwischen 2013 und 2019 ist diese Annahme plausibel, da die jährlichen Wachstumsraten relativ gering waren (zwischen 0,05 % und 1,36 %).

Basierend auf diesen Annahmen werden die jährlichen Neuzulassungen elektrifizierter Busse berechnet. Es wird dabei weiterhin die Annahme getroffen, dass sich der Bestand alle 13 Jahre erneuert. Dies entspricht dem Durchschnittsalter von Bussen, die laut KBA [209] zwischen 1999 und 2006 außer Betrieb genommen wurden.

Annahmen zur Batteriekapazität von Bussen mit elektrifiziertem Antriebsstrang basieren auf einer Studie des Ökoinstituts [52]. Werte für die Zwischenjahre wurden durch Interpolation ermittelt. Diese sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 22: Batteriekapazität von Bussen [52]

Fahrzeugkategorie	2015	2030	2050
BEV	150 MWh	250 MWh	300 MWh
HEV	30 MWh	30 MWh	30 MWh
PHEV	50 MWh	50 MWh	50 MWh
FCEV	20 MWh	20 MWh	20 MWh

Darüber hinaus wurde für diese Studie die Annahme getroffen, dass die Lebensdauer der Batterie mit der Lebensdauer des Fahrzeugs übereinstimmt. Laut KBA [209] schwankte zwischen 1999 und 2006 das Durchschnittsalter der Busse bei Außerbetriebssetzungen zwischen 12,8 und 14,2 Jahre. Basierend auf dem über diesen Zeitraum gemittelten Durchschnitt, trifft diese Studie die Annahme, dass eine Batterie im Durchschnitt nach 13,4 Jahren für Recycling, bzw. Zweitverwendung bereit steht.

7.4.2 Ergebnisse

2030 steht eine geringe Menge an Batterien zur Verfügung. Dieses geringe Aufkommen ist erneut, analog zu den Ergebnissen im NFZ Sektor, mit der geringen Anzahl elektrifizierter Fahrzeuge zu begründen, die in den vergangenen Jahren in Baden-Württemberg zugelassen wurden (vergl. Tabelle 23). Unter den hier getroffenen Annahmen erhöht sich bis diese Zahl zukünftig um ein Vielfaches, was signifikante Änderungen hinsichtlich der perspektivisch vorhandenen Menge an recycelbaren Batterien bedingt. Die Menge der Batterien die 2050 dem Recycling oder anderen Zweitnutzungskonzepten zugeführt werden kann erhöht sich um den Faktor 5 (Minimalszenario) bzw. den Faktor 19 (Maximalszenario).

Tabelle 23: Batterieaufkommen für Recycling/Zweitverwendung in Baden-Württemberg (MWh): Busse

Fahrzeug	2030	2050
Minimalszenario	3 MWh	16 MWh
Maximalszenario	3 MWh	56 MWh

7.5 Krafträder

Januar 2020 befanden sich 698.756 Krafträder im Bestand [204], wobei der überwiegende Anteil auf zweirädrige Kfz entfällt. Von allen Krafträdern waren im Oktober 2019 lediglich 2.234 Fahrzeuge elektrifiziert, fast ausschließlich rein batterieelektrisch.

In der Literatur werden elektrifizierte Krafträder inzwischen oft als elektrische Klein- und Leichtfahrzeuge definiert. Obwohl sie zahlenmäßig nach wie vor eine Randerscheinung darstellen, finden diese wegen ihrer großen Sichtbarkeit in Städten (zum Beispiel in Form von E-Tretrollern) zunehmend Beachtung [177].

7.5.1 Methode

Die folgende Tabelle fasst die Vorgehensweise, Eingangswerte und Quellen zur Schätzung des zukünftigen Batterieaufkommens von Elektro-Krafträdern zusammen.

Tabelle 24: Methode Schätzung Batterieaufkommen: Krafträder

	2018	2040	Kommentar / Datenquellen / Annahmen
Anzahl Neuzulassungen: Baden-Württemberg	24.858	37.803	- Quelle 2018 Werte: [205] - Quelle Werte 2020-2030: basiert auf Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, [211]. Annahme, dass historische Wachstumsrate 2012-2018 linear fortgeschrieben wird (Compound Annual Growth Rate, CAGR: 2,7 %); - Quelle Werte 2030-2040: eigene Annahme (1 % CAGR)
Anzahl Neuzulassungen mit elektrifiziertem Antriebsstrang: Baden-Württemberg	178	22.964	- Quelle 2018 Werte: [205, 206] - Quelle 2012-2030 Werte: [69]. Elektro-Anteil der Krafträder könnte europaweit bis 2030 auf 41 % zunehmen. Eigene Annahme für diese Studie über analog Entwicklung in Baden-Württemberg. - Quelle 2030-2050 Werte: Für 2050 wird angenommen, dass der Anteil an elektrifizierten Krafträdern auf 90 % liegt.
Durchschnittliche Batteriekapazität / Fahrzeug	1,6 kWh	1,6 kWh	Quelle: [52]
Durchschnittliche Nutzungsdauer Batterie im Fahrzeug	13,2 Jahre	13,2 Jahre	Dies entspricht der durchschnittlichen Lebensdauer von Krafträdern. Dafür wurde das Durchschnittsalter bei Außerbetriebsetzungen im Zeitraum 1999-2006 zugrunde gelegt (Quelle: [209]).

Im ersten Schritt wurde die absolute Anzahl neuer Krafträder für Baden-Württemberg prognostiziert. Annahmen dafür basieren auf der BMVi Verkehrsverflechtungsprognose [211], die davon ausgeht, dass historische Wachstumsraten bis 2030 linear fortgeschrieben werden. Für diese Studie wurde deshalb die historische Wachstumsrate (Compound Annual Growth Rate, CAGR: 2,7 %), basierend auf dem Zeitraum 2012-2018 in Baden-Württemberg, zu Grunde gelegt. Für die Jahre ab 2030 unterstellt diese Studie ein langsames Wachstum von 1 % (CAGR).

Im zweiten Schritt wurde der Anteil elektrifizierter Krafträder am Gesamtmarkt abgeschätzt. Dafür bezieht sich diese Studie auf [69]; demnach steigt der Anteil bis 2030 europaweit auf 41 %. Für diese Studie wurde eine analoge Entwicklung für Baden-Württemberg unterstellt. Für den Zeitraum 2030-2050 wurde die Annahme getroffen, dass bis 2050 90 % aller Krafträder elektrifiziert sind. Diese

Annahme korreliert mit Aussagen der e-mobil 2050 Studie [212], die für die elektrisch erbrachte Fahrleistung von Krafträdern im Jahr 2050 von einem Anteil von 95 % ausgeht.

Annahmen zur spezifischen Batteriekapazität von elektrifizierten Krafträdern basieren auf [52] und entsprechen 1,6 kWh. In dieser Studie wird angenommen, dass die Lebensdauer der Batterien mit der durchschnittlichen Lebensdauer von Krafträdern übereinstimmen. Nach KBA [189] schwankte zwischen 1999 und 2006 das Durchschnittsalter der Fahrzeuge bei Außerbetriebsetzungen zwischen 11,4 und 14,0 Jahre. Basierend auf dem über diesen Zeitraum gemittelten Durchschnitt, trifft diese Studie die Annahme, dass Batterien von Krafträdern im Durchschnitt nach 13,2 Jahren für Recycling, bzw. Zweitverwendung bereit stehen.

7.5.2 Ergebnisse

Folgende Tabelle fasst zusammen, welche Batteriemengen von Krafträdern, unter den diskutierten Annahmen, in den Jahren 2020 und 2050 in Baden-Württemberg für Recycling oder Zweitverwendung zur Verfügung stehen.

Tabelle 25: Batterieaufkommen für Recycling/Zweitverwendung in Baden-Württemberg (MWh): Krafträder

	2020	2050
Batteriekapazität – Krafträder	0,3 MWh	32 MWh

7.6 Elektrofahrräder

Deutschland ist einer der größten globalen Absatzmärkte für Elektrofahrräder – 2019 wurden 1,4 Millionen Stück verkauft [179]. Damit ist die zukünftige Entwicklung des Absatzes von Elektrofahrrädern zahlenmäßig relevant für die Abschätzung des Batterie-Recycling Aufkommens in Baden-Württemberg – trotz der geringen Batteriekapazität, die im Fahrrad verbaut ist.

Ein Elektrofahrrad wird gemäß der Norm EN 15194 als „elektromotorisch unterstütztes Fahrrad“ bezeichnet. Zu Elektrofahrrädern gehören Pedelecs 25², Pedelecs 45² bzw. S-Pedelecs, E-Bikes und einspurige E-Lastenräder.² 99,5 % aller verkauften Elektrofahrräder [213] sind Pedelecs 25³, also Fahrzeuge mit einer Maximalgeschwindigkeit bis zu 25 km/h und einer Nenndauerleistung des Motors bis maximal 250 Watt.

7.6.1 Methode

Die folgende Tabelle fasst die Vorgehensweise, Eingangswerte und Quellen zur Schätzung des zukünftigen Batterieaufkommens von Elektrofahrrädern zusammen.

Tabelle 26: Methode Schätzung Batterieaufkommen: Elektrofahrräder

	2019	2040	Kommentar / Datenquellen / Annahmen
Anzahl Verkäufe: Deutschland	1,36 Mio.	1,90 Mio.	- Tatsächliche Verkäufe 2019 [179] ZIV Prognose, dass Elektrofahrräder langfristig 35 % des Fahrradmarkts ausmachen; Annahme über Wachstum des Gesamt-Fahrradmarkts 2020-2050 von 1 %; in den letzten 5 Jahren betrug das durchschnittliche Wachstum 1,8 %
Anzahl Verkäufe: Baden-Württemberg	181.000	248.000	Annahme, dass Anzahl der verkauften Fahrräder (inkl. Pedelecs) pro Einwohner in Baden-Württemberg dem Bundesdurchschnitt entsprechen. Basierend auf Bevölkerungsprojektionen wird davon ausgegangen, dass es in der Zukunft keine nennenswerte Änderung der zukünftigen Bevölkerungszusammensetzung Deutschlands / Baden-Württembergs zu erwarten ist
Durchschnittliche Batteriekapazität pro Fahrrad	0,35 kWh	0,35 kWh	Eigene Annahme
Durchschnittliche Nutzungsdauer Batterie	7 Jahre	7 Jahre	Basierend auf der Abschreibungstabelle für allgemein verwendbare Anlagegüter des Bundesministerium der Finanzen [214]

Seit 2013 haben sich die jährlichen Verkaufszahlen von Elektrofahrrädern verdreifacht, von rund

² Es gibt unterschiedliche Begriffsbezeichnungen von Elektrofahrzeugkategorien bzw. deren Definitionen. Die Begriffe, die in dieser Studie verwendet werden, basieren auf Definitionen in Blauer Engel (2015).

³ Pedelecs 25 sind gemäß EN 15194 „elektromotorisch unterstützte Rädertypen mit einer maximalen Nenndauerleistung von 0,25 kW, wobei die Leistungsabgabe schrittweise reduziert und schließlich abgeschaltet wird, sobald das Fahrzeug eine Geschwindigkeit von 25 km/h erreicht oder vorher, wenn der Fahrer den Pedalantrieb einstellt.“ Pedelecs 25 sind nach Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung zulassungsfrei. Bei Pedelecs 45 regelt der Antrieb erst ab 45 km/h ab. Diese Fahrräder zählen zu den Leichtkrafträdern und benötigen ein Versicherungskennzeichen.

0,4 Millionen auf knapp 1,4 Millionen Stück im Jahre 2019 [179]. Insgesamt wurden 2019 4,3 Millionen Fahrräder verkauft. Damit wurde fast der vorläufige Höhepunkt im Jahre 2015 erreicht, als 4,4 Millionen Stück abgesetzt wurden [179, 215]. Laut einer Schätzung des ZIV [216] von Anfang 2019 wird der Marktanteil der Elektrofahrräder in Zukunft weiterhin zunehmen und langfristig 35 % des Fahrradmarkts ausmachen. Für diese Studie wird deshalb angenommen, dass dieser Marktanteil im Jahre 2035 erreicht wird und danach nicht mehr weiter zunimmt. Dies ist eine konservative Annahme, da der Markt rapide wächst und bis Ende 2019 schon auf 32 % angestiegen ist – eine Zunahme von 8 Prozentpunkten im Vergleich zum Vorjahr. Um im ersten Schritt die Anzahl der in Deutschland verkauften Elektrofahrräder von 2020 bis 2050 abzuschätzen, wird angenommen, dass das zukünftige jährliche Wachstum des Gesamtfahrradmarkts bei 1,0 % liegt. Auch hierbei handelt es sich um eine eher moderate Annahme, da diese Wachstumsrate niedriger ist als das jährliche Wachstum den vergangenen 7 Jahre (1,8 %).

Im zweiten Schritt werden die Verkaufszahlen für Fahrräder bzw. Elektrofahrräder für Baden-Württemberg abgeschätzt. Dabei wird angenommen, dass die Verkaufsrate pro Einwohner dem Bundesdurchschnitt von 0,02 Elektrofahrrädern je Einwohner entspricht. Mit dieser Rate wären bei einer Bevölkerung von knapp 11,1 Millionen am 31.12.2018 [217] 2019 rund 181.000 Elektrofahrräder in Baden-Württemberg abgesetzt worden. Da sich die Bevölkerungsgröße Baden-Württembergs im Vergleich mit Gesamtdeutschland laut aktueller Prognosen nicht substantiell ändern wird, wird diese bis 2050 konstant gehalten. Momentan leben 13 % der deutschen Bevölkerung in Baden-Württemberg, bis 2050 könnte dieser Anteil gemäß Bevölkerungsprognosen um einen Punkt auf 14 % wachsen [218].

In dieser Studie wird von einer durchschnittlichen Batteriekapazität von 0,35 kWh ausgegangen. Diese entspricht dem Energiegehalt tatsächlich verbauter Akkus in einem Leistungsbereich von 300-400 Watt. Den größten Einfluss auf die Lebensdauer von Li-Ionen-Akkus haben im Allgemeinen das Laden und Entladen. Alle in Deutschland verkauften Elektrofahrräder unterliegen einer Herstellergarantie, nach der die Restkapazität der Akkus nach 24 Monaten oder 500 Ladezyklen mindestens 70 % der Bemessungskapazität beträgt. Die Dauer bis Erreichen der 500 Ladezyklen hängt allein vom Nutzerverhalten ab (z. B. gewählte Unterstützungsstufe; Jahresfahrleistung). Belastbare empirische Daten zum Nutzungsverhalten fehlen jedoch. Diese Studie geht deshalb von einer durchschnittlichen Lebensdauer von 7 Jahren aus, entsprechend der Abschreibungstabelle für allgemein verwendbare Anlagegüter [214].

7.6.2 Ergebnisse

Diese Studie kommt zu dem Ergebnis, dass 2030 knapp 217.000 Batterien von Pedelects in Baden-Württemberg recycelt oder anderweitig weitergenutzt werden müssen. Trotz dieser hohen Anzahl beläuft sich die Gesamtkapazität, geschuldet durch den geringen individuellen Energiegehalt der Akkumulatoren, auf lediglich 68 MWh (siehe Tabelle 27).

Tabelle 27: Batterieaufkommen für Recycling/Zweitverwendung in Baden-Württemberg (MWh): Krafträder

	2030	2050
Elektrofahrräder	68 MWh	89 MWh

7.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Nach dem Erreichen der zuvor angesetzten Lebensdauer werden die eingesetzten Traktionsbatterien dem Batterierecycling oder einem Zweitnutzungskonzept zugeführt. Tabelle 28 stellt den jährlich in Baden-Württemberg anfallenden Energiegehalt dieser Traktionsbatterien, unterteilt in die diskutierten Fahrzeugkategorien, exemplarisch für die Jahre 2030 und 2050 dar. Während 2030 noch moderate 1.000 MWh zu bearbeiten sind, versiebenfacht sich dieser Wert bis zum Jahr 2050 in etwa.

Tabelle 28: Batterieaufkommen für Recycling/Zweitverwendung in Baden-Württemberg (MWh) nach Fahrzeugkategorien

Fahrzeugkategorie	2030	2050
Pkw	916 MWh	7.000 MWh
Nfz	39 MWh	126 MWh
Busse	3 MWh	56 MWh
Krafträder	0 MWh	32 MWh
Elektrofahrräder	68 MWh	89 MWh
Gesamt	1.026 MWh	7.303 MWh

8 Vergleichende Ökobilanz zwischen zwei Herangehensweise zur Prozessierung von EoL-Li-Ionen Batteriesystemen

Die Ökobilanzierung dient je nach Festlegung der Systemgrenzen zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen eines Prozesses, eines Produktes oder weiteren Betrachtungsgegenständen. Zweck ist durch das Einbeziehen möglichst vollständiger Datensätze bezüglich der In- und Outputströme in das betrachtete System eine nachvollziehbare und quantifizierbare Abschätzung der Umweltauswirkungen zu generieren. Dabei werden sämtliche dieser Ströme mit den jeweiligen Umweltwirkungen belegt, welche sich wiederum im Laufe der Analyse zur ökologischen Gesamtwirkung des Systems aufaddieren. Die Nutzung anerkannter Datenbanken wie bspw. ecoinvent ist dabei obligatorisch. Auf dieser Basis sollen Schwachstellen identifiziert werden, was wiederum eine entsprechende Optimierung und die nachhaltigere Gestaltung des betrachteten Systems ermöglicht. Das Ziel der vorliegenden Untersuchung ist die vergleichende ökologische Bilanzierung zweier unterschiedlicher Prozesse zur stofflichen Verwertung von EoL-Li-Ionen Batteriesystemen. Dieser Bezugsrahmen wird auf Basis der Analyse der künftigen Entwicklung des EoL-Sektors gewählt (Abschnitt 6). Entsprechend der Ergebnisse der Evaluation hinsichtlich priorisierter Kreislaufstrategien wird in der ökologischen Bilanzierung auf das Recycling fokussiert. So sollen die Vor- und Nachteile der ausgewählten Recyclingprozesse aufgezeigt werden. Zielgruppe für die Verwertung der entsprechenden Ergebnisse sind Entscheidungsträger*innen in Politik und Wirtschaft, die sich einen Überblick über die ökologische Bilanz des Batterierecyclings und mögliche Optimierungspotentiale verschaffen wollen. Zudem die Forschung, die an den aufgeworfenen Fragestellungen anknüpft und entworfene Modelle und Berechnungsgrundlagen detailliert.

Die Bereitstellung einer fundierten Diskussionsgrundlage durch die Ökobilanzierung wird durch größtmögliche Transparenz hinsichtlich der Datenherkunft und -verarbeitung garantiert. Methodisch bieten die internationalen Standards ISO 14040:2006 und ISO 14044:2006 einen anerkannten Rahmen und beschreiben die Anforderungen an Ökobilanzen. Diese Untersuchung lehnt sich stark an die davon abgeleiteten deutschen Normen DIN ISO 14040 und -14044 an [219, 220], vernachlässigt auf Grund des beschränkten Zeit- und Ressourcenrahmens der Untersuchung jedoch gewisse Aspekte wie beispielsweise das detaillierte externe Review durch eine unabhängige prüfende Person. Stattdessen wurde während zweier Beratungsgespräche mit der ifu Hamburg die gewählte methodische Vorgehensweise, insbesondere hinsichtlich der Verteilung von Gutschriften validiert. Die Gliederung des nachfolgenden Berichts orientiert sich an den Vorgaben der genannten Normen. So werden nach dem definierten Untersuchungsrahmen zunächst die Sachbilanz und danach die Wirkungsbilanz des betrachteten Systems beschrieben. Abschließend werden die quantitativen Ergebnisse in der Auswertung qualitativ interpretiert.

Ein Vergleich mit weiteren Arbeiten ist nur bei konformen Annahmen und einer gleichwertigen Datenbasis sinnvoll. Zudem müssen die kleineren Abweichungen von der empfohlenen Vorgehensweise der DIN ISO 14044:2006 (vgl. Kapitel 8.1.5) berücksichtigt werden.

8.1 Festlegung des Untersuchungsrahmens

Um Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Bilanzierung zu ermöglichen, werden nachfolgend die Grenzen des bilanzierten Systems sowie sämtliche Annahmen und Ungenauigkeiten adressiert.

8.1.1 Funktionelle Einheit & Systemgrenzen

Das betrachtete System entspricht einem abgeschlossenen Teil des Lebenszyklus einer Lithium-Ionen-Traktionsbatterie. Die Bilanzierung fokussiert auf die End-of-Life Handhabung dieser Batterien in Form zweier verschiedener Prozessrouten zur stofflichen Verwertung im Bundesland Baden-Württemberg. Sämtliche vorgeschalteten Produktphasen (bspw. Herstellung, Nutzung) sind nicht Bestandteil dieser Untersuchung. Die Bilanzierung beginnt dabei ab den Werkstoren des Recyclingunternehmens mit der Entladung der Batteriesysteme mit Hilfe eines Radladers (Dieselbetrieben). Die funktionelle Einheit, die als Referenz für sämtliche In- und Outputströme herangezogen wird, ist dabei das stoffliche Recycling von 1.000 kg Lithium-Ionen-Traktionsbatterien. Während verschiedener Prozessschritte werden dabei Materialien zurückgewonnen, die als Gutschrift in die Bilanzierung des Gesamtsystems einfließen (vgl. Kapitel 8.1.4). Teilweise ist eine Aufbereitung der Stoffe notwendig. Diese ist per se nicht Bestandteil der analysierten Prozesse. Um dennoch eine korrekte Zuschreibung der ökologischen Gutschrift durch die rückgewonnenen Stoffe zu ermöglichen, wird der notwendige ökologische Aufwand der jeweiligen Aufbereitung mit Hilfe von definierten Standardprozessen aus der ecoinvent Datenbank berücksichtigt und in das zu bilanzierende System einbezogen [221]. Ähnlich werden Deponierungs- und energetische Verwertungsprozesse von anfallenden Reststoffen integriert. Unter der Annahme, dass wiedergewonnene Materialien primärgeförderte Rohstoffe am Markt ersetzen, wird die Nettogutschrift errechnet durch die Subtraktion der Umweltwirkungen der Primärförderung von den summierten Lasten des Recyclingprozesses sowie der jeweiligen nachgeschalteten Aufbereitungs- und Deponierungsverfahren.

Für die vergleichende Analyse werden generische Prozessrouten herangezogen, die im weiteren Sinne industriell angewendeten Prozessen entsprechen. Eine Verbindung mit, bzw. Rückschluss auf konkrete Unternehmen und deren Prozessierung von Batteriesystemen ist jedoch unter den vorherrschenden Annahmen ausdrücklich nicht angestrebt und nicht möglich. Beiden Prozessen geht eine manuelle Demontage der Batteriesysteme auf Modulebene vorweg. Der State-of-the-Art des Batterierecyclings wird dabei als pyrometallurgische Prozessroute definiert. Diese schließt nach der thermischen Behandlung die Aufbereitung der anfallenden Legierung in hydrometallurgischen Prozessschritten ein (im Folgenden: „Pyrometallurgische Prozessroute“ oder „Route 1“).

Als neuartige Alternative wird ein Prozess basierend auf zunächst mechanischer Zerkleinerung der Module und anschließender hydrometallurgischer Aufbereitung Materialfraktionen zum Vergleich herangezogen (im Folgenden: „Hydrometallurgische Prozessroute“, bzw. „Route 2“). Beide Prozesse mit den jeweiligen Systemgrenzen sind in Abbildung 33 dargestellt. Die notwendige Aufbereitung der rückgewonnenen Materialien sowie die Substitution von Primärmaterialien am Markt werden als Erweiterung der Systeme in Form von Gutschriften bzw. zusätzlicher Lasten abgebildet. Abschnitt 8.1.4 geht hierauf näher ein.

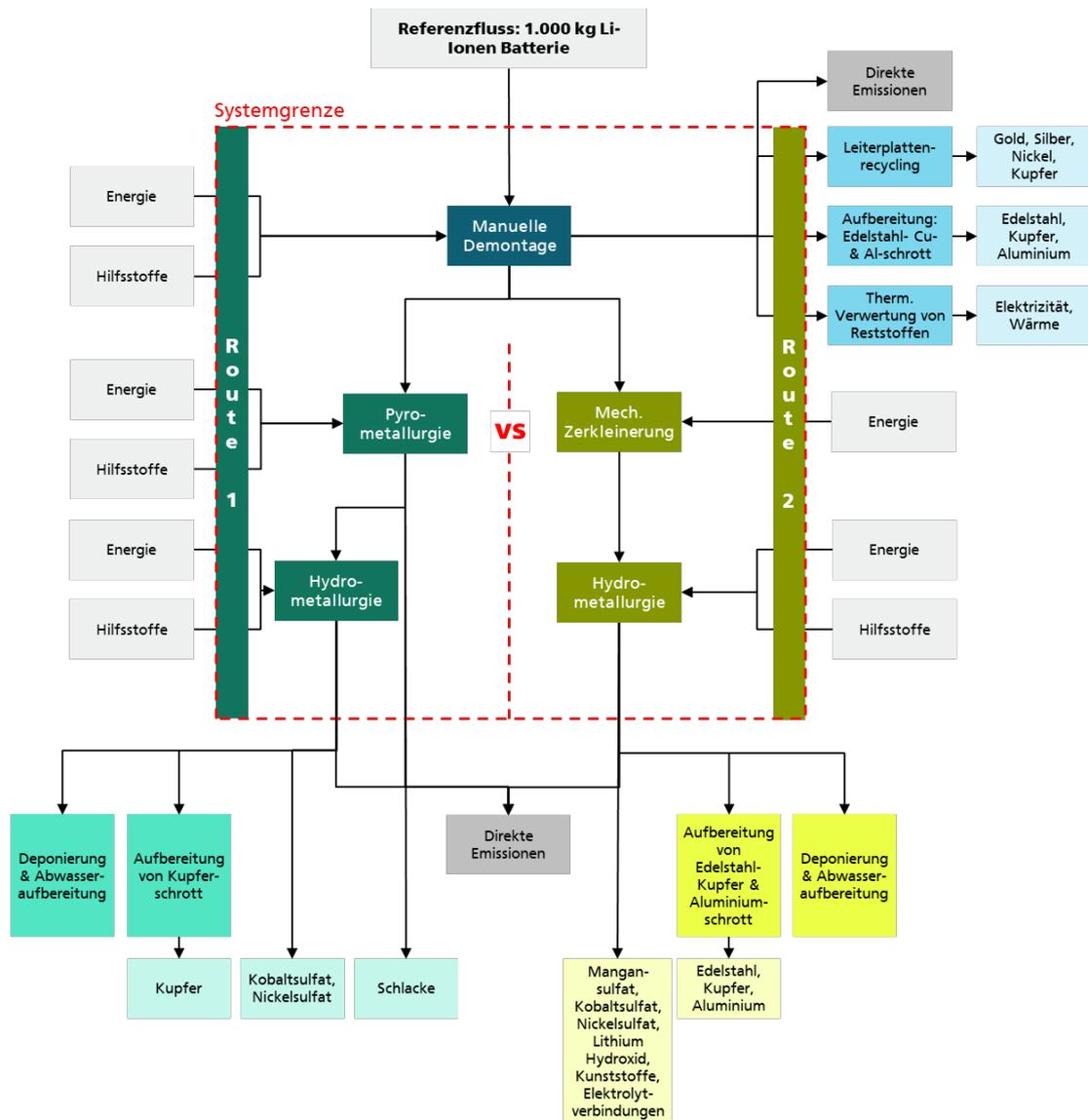


Abbildung 33: Systemgrenze der Bilanzierung

Der Referenzfluss von 1.000 kg Lithium-Ionen-Traktionsbatterien, die in das zu bilanzierende System eingebracht werden, entsprechen ebenfalls einer generischen Zusammensetzung. Diese wurde von Buchert et al. (2011) übernommen [13]. Entsprechend der zu erwartenden Marktdurchdringung von Batterien mit NMC-Kathoden (vgl. Abschnitt 4), wird in der Bilanzierung auf solche Batterien fokussiert – die funktionelle Einheit entspricht somit also dem Recycling von 1.000 kg Lithium-Ionen Traktionsbatterien mit NMC-Kathoden. Anders als bei Buchert et al. wird dadurch auf eine Mischung der Rückläufermengen aus Batterien mit NCA-, LFP-, und NMC-Zelltypen verzichtet. Die vorliegende Untersuchung befindet sich somit in Übereinstimmung mit aktuelleren Arbeiten der Projektgruppe um Buchert [14]. Bei der generischen Batterie handelt es sich um eine NMC 111 Kathodenzusammensetzung. Diese fand als Teil der Generation 2a insbesondere in den ersten Modellen der Elektromobilität Anwendung [222]. Angesichts des Zeitpunkts der großtechnischen Markteinführung der E-Mobilität sowie der erwarteten Lebensdauer der Batteriesysteme (vgl. Abschnitt 5.3.1) ist in den kommenden Jahren mit einer steigenden Anzahl von EoL-Batterien mit

dieser Kathodenzusammensetzung zu rechnen. Somit kann durch die Nutzung dieses Batteriesystems als Referenz für die Bilanzierung die derzeitige sowie kurz- bis mittelfristige ökologische Performance der betrachteten Recyclingprozesse bewertet werden.

Da die vorliegende Untersuchung auf Literaturdaten basiert, wird kein eigenes Abschneidekriterium definiert. Sämtliche verfügbaren In- und Outputdaten werden einbezogen. Erwähnt werden muss an dieser Stelle jedoch, dass Buchert et al. Materialflüsse/-inhalte vernachlässigen, die weniger als ein Prozent der Gesamtmasse betragen (mit Ausnahme der im BMS beinhalteten Materialien) [13]. Auf Grund der Nutzung der entsprechenden Daten geht dieses Abschneidekriterium auf diese Arbeit über.

8.1.2 Berücksichtigte Wirkkategorien & Methodenwahl

Für die Auswahl der zu berücksichtigenden Wirkkategorien existieren keine Vorgaben. Die Kategorien können somit bedarfsgerecht gewählt werden [223]. Auf Grund dem ähnlichen Betrachtungsrahmen orientiert sich diese Untersuchung an der Auswahl von Buchert et al. [13]. Allerdings wird auf Grund aktuellerer Daten in der verfügbaren Datenbank auf die ReCiPe-Methode anstatt auf die CML-Methode zurückgegriffen. Nach Möglichkeit wurden entsprechend äquivalente Wirkkategorien gewählt. Sämtliche Midpoint-Wirkkategorien wurden nach der „Hierarchist“ Perspektive in der Version 1.13 ausgewählt. Diese ist der am weitesten verbreitete Standard mit einem zeitlichen Betrachtungsrahmen von 100 Jahren und unter Berücksichtigung anerkannter politischer Prinzipien [224]. Statt des Treibhauspotentials nach IPCC 2007 wurde der aktualisierte Datensatz von 2013 genutzt. Tabelle 29 stellt die Auswahl der Kategorien und die Gegenüberstellung Arbeit von Buchert et a. und der vorliegenden Untersuchung dar. Von einer Aggregation einzelner Wirkkategorien auf Endpoint-Indikatoren wird abgesehen.

Tabelle 29: Berücksichtigte Wirkkategorien

Buchert et al. (2011) [13]	KSBS BW
Global Warming Potential (GWP) – IPCC 2007	Global Warming Potential 100a (GWP) – IPCC 2013
Cumulative Energy Demand (CED)	Cumulative Energy Demand, fossil, non-renewable energy sources (CED)
Depletion of Abiotic Resources – CML	Metal Depletion (MED) – ReCiPe (H) V1.13
Eutrophication Potential (EP) – CML	Marine Eutrophication (MEP) – ReCiPe (H) V1.13
	Freshwater Eutrophication (FEP) – ReCiPe (H) V1.13
Acidification Potential (AP) - CML	Terrestrial Acidification (TEA) – ReCiPe (H) V1.13
Photochemical Ozone Creation Potential – CML 2010	Photochemical Oxidant Formation (POF) – ReCiPe (H) V1.13

Das Treibhauspotential (Global Warming Potential (GWP)) nutzt CO₂-Äquivalente zur Darstellung der Umweltwirkungen des zu bilanzierenden Systems. Die Kategorie stellt den Effekt der unterschiedlichen Verweilzeit der ausgestoßenen Gase in der Atmosphäre dar. Um Konsistenz zu den

anderen Wirkkategorien zu gewährleisten wird ein Zeithorizont von 100 Jahren gewählt. Dieser findet unter anderem auch im Kyoto Protokoll von 1997 Berücksichtigung [225].

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) wird in der vorliegenden Untersuchung durch fossile, nicht erneuerbare Energieressourcen abgedeckt. Der KEA quantifiziert den anfallenden Energiebedarf während des gesamten betrachteten Prozesses/ Produktlebenszyklus o.ä. [226]. Der zugrundeliegende Energiewert ist charakterisiert durch den oberen Heizwert der extrahierten fossilen Energieträger [227].

Der Indikator Metal Depletion (MED) stellt den Verbrauch an metallischen Ressourcen in Form von Eisen-Äquivalenten dar [224]. Durch die Rückgewinnung metallischer Materialien während der Recyclingvorgänge, ist diese Wirkkategorie von besonderem Interesse.

Das Eutrophierungspotential wird in vorliegender Untersuchung durch die beiden Wirkkategorien Frischwasser- (FEP) und Meerwasser Eutrophierung (MEP) dargestellt. Beide Indikatoren stellen die Nährstoffanreicherung in Gewässern durch menschliche Aktivität dar. Diese Art der Verschmutzung wird für Gewässer oftmals gar als schwerwiegender als die Einleitung von Giftstoffen angesehen. Während die maritime Eutrophierung in Form von Stickstoff-Äquivalenten angegeben wird, wird die Frischwasser Eutrophierung durch Phosphor-Äquivalente dargestellt [224].

Die Versauerung der Erde entsteht durch Ablagerung von anorganischen Substanzen. Eine Veränderung des Ph-Werts der Erde hat schwerwiegende Auswirkungen auf nahezu alle Pflanzenarten. Die Wirkung des betrachteten Systems wird dabei durch den Indikator Terrestrial Acidification (TEA) in Form von Schwefeldioxid-Äquivalenten dargestellt [224].

Der Ausstoß von Oxidationsmitteln führt unter Zufuhr von Sonnenlicht zur Bildung von Photooxidantien. Prominenter Vertreter dieser Gruppe ist Ozon, dessen übermäßige Verfügbarkeit in der Luft unter anderem zu Atemwegserkrankungen führen kann. Die Wirkkategorie wird in Form von NMVOC-Äquivalenten (flüchtige organische Verbindungen) quantifiziert [224].

8.1.3 Datenerhebung & Datenqualität

Im Zuge der Untersuchung wurden keine Primärdaten aufgenommen. Die Bilanzierung erfolgte durch die Definition zweier generischer Recyclingprozesse auf Basis vorhandener Literaturdaten. So stammt der Großteil der Daten zu den Materialflüssen des Demontageprozesses aus der ökologischen Bilanzierung des LiBRi-Projekts [13]. Ebenso stammt die materielle Zusammensetzung der Standardbatterie, die in das System eingebracht wird von Buchert et al. (2011). Diese wird wiederum mit den Recyclingeffizienzen der im EverBatt-Modell definierten generischen Recyclingprozessrouten verrechnet [228]. Direkte Emissionen durch die Verbrennung von Energieträgern wurden durch im EverBatt-Modell angegebene Emissionsfaktoren errechnet. Ebenfalls wurden Emissionen durch die Verbrennung und Dekomposition von Materialien berechnet (Verbrennung: Graphit, Ruß, Kunststoffe, Lösungsmittel, PVDF; Dekomposition: Lithiumcarbonat, Kalkstein, Natriumcarbonat). Generische Materialbezeichnungen (bspw. Kunststoffe) aus den Datenquellen wurden nach Möglichkeit auf Basis von Literaturrecherchen (Materialien in Batteriesystemen) spezifiziert. Sämtliche genutzten Material- und Prozessdatensätze stammen aus der ecoinvent Datenbank Version 3.6 [221].

Die manuelle Demontage ist der derzeitige State-of-the-Art im industriellen Batterierecycling. Abgesehen von Optimierungen im Ablauf hat sich an der generellen Vorgehensweise bisher kaum etwas geändert. Entsprechend konnten die inputseitigen Materialflüsse ebenso wie die Recyclingeffizienzen von Buchert et al. übernommen werden [13]. Eine Stromgutschrift während der

Zerlegung durch Einspeisung der Restladung der Batteriesysteme in das Energienetz wird in dieser Untersuchung vernachlässigt, da im realen Umfeld nicht durchgeführt. Die nachfolgenden Prozessschritte, namentlich, das pyro- und hydrometallurgische Recycling basieren auf den Datensätzen des Everbatt-Modells [228]. Dieses bildet Recyclingunternehmen mit einer Kapazität von 50.000 Tonnen Batteriezellen pro Jahr ab. Das aus dem Jahr 2019 stammende Modell fasst Erkenntnisse über derzeit industriell angewendete Prozesse in Form von generischen Materialflüssen zusammen. Entsprechend unterscheiden sich die Daten von tatsächlich angewendeten Prozessen von Recyclingunternehmen. Ein Rückschluss auf spezifische Unternehmen ist somit also nicht möglich und nicht gewünscht. Da keine Primärdaten aufgenommen wurden, bzw. kein expliziter Prozess bilanziert wurde, kann keine Aussage über die Vollständigkeit der Daten getroffen werden. Sämtliche verfügbaren Daten wurden einbezogen – die Granularität ist dementsprechend von den verwendeten Quellen abhängig.

Der geographische Fokus der vorliegenden Ökobilanz liegt im Bundesland Baden-Württemberg. Entsprechend werden sämtliche herangezogenen Datensätze aus der ecoinvent Datenbank mit dem räumlichen Bezug Deutschland herangezogen. Sofern dies nicht möglich ist, werden kaskadenartig zunächst Daten mit europäischem und zuletzt weltweitem Bezug genutzt.

Die Vergleichbarkeit zwischen den definierten Prozessen ist durch die gleiche Datenbasis und den gleichen technologischen, zeitlichen und geographischen Fokus gegeben. Ein Vergleich zu anderen Projektarbeiten kann nur unter dem Einbezug gleicher Annahmen getroffen werden.

8.1.4 Gutschriften & Aufwände

Innerhalb des Systems wird nach Möglichkeit anstatt auf Allokationen auf Systemerweiterungen zurückgegriffen. Einbezogene Datensätze aus der ecoinvent Datenbank werden nach der Methode „Allocation at the point of substitutability“ allokiert [221]. Gutschriften innerhalb des Systems nehmen hingegen eine zentrale Rolle in der vorliegenden Bilanzierung ein. Um die Umweltwirkungen eines Recyclingprozesses zu bilanzieren, müssen die wiedergewonnenen Materialien als Gutschriften in die Bilanz einfließen. Diese Untersuchung unterliegt der Annahme, dass rückgewonnene Stoffe bei Verlassen des Systems solche aus Primärquellen am Markt ersetzen. So werden die anfallenden Aufwände während der Aufbereitung mit denen der Primärherstellung der jeweiligen Materialien in den entsprechenden Mengen verrechnet. So wird bei Recyclingprozessen prinzipiell bspw. ein negatives GWP möglich. Gutschriften für Materialien wurden sämtlich mit Hilfe von Systemerweiterungen abgebildet. Entsprechend wurden alle Multi-Output Prozesse aufgeteilt. Jedem rückgewonnenen Stoff wurde ein eigener Unterprozess zugeteilt. Dieser wird in einem weiteren Schritt mit dem gewählten Äquivalenzprodukt (Primärherstellung des entsprechenden Rohstoffs) verrechnet.

Die in den generischen Recyclingprozessen rückgewonnenen Materialien benötigen oftmals weitere Aufbereitungsschritte um als gleichwertig zu am Markt gehandelten Stoffen bewertet zu werden. Die damit einhergehende Prozessierung ist zwar nicht Bestandteil des betrachteten Recyclingprozesses, wird aber in das System einbezogen um eine sinnvolle Verrechnung zu ermöglichen. Eine Gegenüberstellung der anfallenden Materialien mitsamt den zugehörigen Aufbereitungsprozessen (ecoinvent Datenbank [221]) und dem substituierten Material am Markt (ecoinvent Datenbank [221]) findet sich in Anhang 11.3.

8.1.5 Einschränkungen und entsprechender Umgang

Generell ist zu sagen, dass es sich bei den bilanzierten Prozessen um generische Datensätze handelt. Diese bilden eine abstrahierte Form der Realität auf Basis von verschiedenen Unternehmens- und Literaturdaten ab. Weiterhin führt das Einbeziehen unterschiedlicher Quellen zu einer Abweichung von realen Prozessen. Die Referenz auf dieselbe funktionelle Einheit des Recyclings von 1.000 kg definierter Standardbatterie verhilft jedoch zu ausreichender Konsistenz. Die vorliegende Arbeit ermöglicht entsprechend jedoch keinen Vergleich zu in spezifischen Unternehmen angewendeten Prozessen.

Weiterhin ist anzumerken, dass neuartige Entwicklungen der Recyclingtechnologie nicht im Modell abgebildet wurden. So wird beispielsweise die zum Teil mögliche Rückgewinnung von Lithium aus der Schlacke in der pyrometallurgischen Prozessroute vernachlässigt. Die Rückgewinnung des Elektrolyts erfolgt nur teilweise. So berücksichtigt das EverBatt-Modell zwar die der Lösungsmittel, nicht jedoch der elektrolytischen Salze. Dies ist durch eine verringerte Recyclingeffizienz des Elektrolyten in diesem Prozessschritt sowie die entsprechende Gutschrift ausschließlich der Lösungsmittel in der Bilanzierung abgebildet. Es geht nicht eindeutig hervor, ob eine Abwasserbehandlung in den dargestellten Aufwänden inkludiert ist (insbesondere bei den hydrometallurgischen Prozessschritten) –entsprechend wurde ein Standardprozess aus der ecoinvent Datenbank nachgeschaltet (siehe Anhang 11.4). Gasreinigungsprozesse wurden nicht explizit als separater Prozess modelliert, sondern wurden implizit im Gesamtenergiebedarf des pyrometallurgischen Prozesses berücksichtigt, da in der Dokumentation des EverBatt Modells beschrieben.

Ebenso führt die Nutzung einer generischen Standardbatterie als Inputfaktor zu Ungenauigkeiten. Auf Grund der Heterogenität der Rückläufer ist diese Verallgemeinerung jedoch notwendig um die Handhabbarkeit der Bilanzierung zu ermöglichen. Die Zusammensetzung der Standardbatterie entspricht keiner real am Markt verfügbaren Batterie, bildet jedoch einen Durchschnittsdatsatz ab, der von der Projektgruppe um Buchert definiert wurde [13]. Dabei bezieht diese Untersuchung nicht die ursprüngliche Mischung aus LFP-, NCA- und NMC-Kathoden ab, sondern konzentriert sich rein auf Batterierückläufer mit NMC-Kathoden.

Nach Möglichkeit wurden Datensätze mit dem räumlichen Bezug zum gewählten Standort des generischen Recyclingunternehmens gewählt. An einigen Stellen war dies jedoch auf Grund mangelnder Datenbasis nicht möglich. Einen Überblick über gewählte Datensätze hinsichtlich der einbezogenen Inputfaktoren sowie der verrechneten Äquivalenzprodukte ist in den Anhängen 11.3 & 11.4 zu finden.

Die in der Norm DIN EN ISO 14044:2006 verlangte kritische Prüfung wurde auf Grund des eingeschränkten Umfangs der Untersuchung in verminderter Form durchgeführt. In zwei Webmeetings mit der ifu Hamburg GmbH wurden Annahmen und Vorgehensweisen in der Bilanzierung diskutiert, reflektiert und angepasst. Als Institution verantwortlich für die Entwicklung der genutzten Bilanzierungssoftware umberto LCA+ ist die Qualifikation für die externe Prüfung gegeben.

Aus gleichen Gründen wurde auf eine Sensitivitätsanalyse verzichtet. Sofern auf den generierten Ergebnissen aufgebaut werden soll, wird die Durchführung einer solchen empfohlen.

8.2 Sachbilanz

8.2.1 Prozessbeschreibung

Wie bereits in Abschnitt 8.1 erwähnt, fokussiert die Bilanzierung auf zwei Prozessrouten zur stofflichen Verwertung von Li-Ionen Traktionsbatterien. Die Demontage auf Modulebene wird dabei für beide Herangehensweisen vorausgesetzt. Unterschiede entstehen durch die weitere Aufbereitung in einem rein hydrometallurgischen Prozess (Route 2) und in einem Mischprozess aus Pyro- und Hydrometallurgie (Route 1).

Die Demontage der Batteriesysteme auf Modulebene findet dabei, wie derzeit üblich, rein manuell statt. Die Systeme werden mit einem Radlader entladen und anschließend einzeln demontiert. Dabei findet der innerbetriebliche Transport mit Krananlagen und Gabelstaplern statt. Die Zerlegung findet unter Anwendung konventioneller Handwerkzeuge statt. Zusammengefasst sind die dabei entstehenden Fraktionen die Folgenden: Batteriemanagementsystem, Kabel, Gehäuse, Batteriemodule/-zellen. Diverse Quellen beschreiben diesen Prozessschritt als fachüblichen Stand der Technik in unterschiedlichen Recyclingunternehmen [13, 14, 63, 229]. Während BMS, Kabel und Gehäuse etablierten Recyclingwegen zugeführt werden, werden die Batteriezellen in Folgeschritten weiter aufbereitet.

Der als Stand der Technik analysierte Folgeprozess beinhaltet eine pyrometallurgische Behandlung der Batteriezellen mit anschließender Verarbeitung der anfallenden Legierung in einem hydrometallurgischen Prozess. Das Argonne National Laboratory definierte hierzu im Zuge ihres EverBatt-Projekts einen generischen Prozess, basierend auf Literaturdaten und Rückmeldungen aus der Industrie [228]. Die vorliegende Untersuchung greift auf diese Informationen zurück. Zunächst werden die Zellen in einen Schmelzofen eingebracht. Dort verbrennen die enthaltenen Kunststoffe und der Elektrolyt und verringern so den notwendigen Energieeinsatz, während das Graphit der Anoden und das Aluminium der Zellgehäuse als Reduktionsmittel dienen. Produkte aus diesem Schritt sind eine wertmetallhaltige Legierung sowie Schlacke. Während die Schlacke als Füllstoff in die Zementindustrie abgegeben wird, wird die Legierung in hydrometallurgischen Prozessen weiter in ihre Bestandteile aufgespalten. Durch Auslaugung und anschließender Ausfällung werden zunächst die Eisen- und Kupferbestandteile zurückgewonnen. Nach einer Abspaltung des Lösungsmittels werden bei erneuter Ausfällung Kobalt und Nickel wiedergewonnen [228]. Das im Folgenden als „pyrometallurgische Prozessroute“ oder vereinfacht als „Route 1“ referenzierte Verfahren beinhaltet somit die Teilprozesse Demontage, pyrometallurgische Aufbereitung und hydrometallurgische Aufbereitung.

Als vielversprechende Alternative zum beschriebenen pyrometallurgischen Prozess wird eine hydrometallurgische Aufbereitung bilanziert. Auch diese basiert auf einem generischen Prozess, definiert durch das Argonne National Laboratory [228]. Die Module/Zellen werden zunächst entladen und anschließend mechanisch zerkleinert. Durch Kalzinieren werden Bindemittel und Teile des Elektrolyts verbrannt. Das gewonnene Granulat wird durch verschiedene mechanische Trennverfahren geführt (Siebe, Wirbelstromfilter etc.) wodurch Aluminium-, Kupfer-, Stahl und Kunststoffbestandteile abgespalten werden. Zurück bleibt ein feines Pulver, das nacheinander in einen Auslaugungs- und einen Ausfällungsprozess eingebracht wird. Zwischen den beiden Prozessschritten findet ebenfalls eine Abspaltung des Lösungsmittels statt. Mit Ausnahme der während der letzten Schritte zurückgewonnenen Kobalt-, Mangan- und Nickel-, Lithium- und

Graphitmengen werden sämtliche Stoffe zur weiteren Aufbereitung konventionellen Recyclingpfaden zugeführt. Diese fallen nach der hydrometallurgischen Prozessierung als direkt wieder-/ weiterverwendbare Stoffe an [228]. Das im Folgenden als „hydrometallurgische Prozessroute“ oder vereinfacht als „Route 2“ referenzierte Verfahren beinhaltet entsprechend die Teilprozesse Demontage und hydrometallurgische Aufbereitung.

8.2.2 Datengrundlage Referenzeinheit: Li-Ionen Batterie

Als funktionelle Einheit wird das Recycling von 1.000 kg Li-Ionen Batterien gewählt. Die stoffliche Zusammensetzung dieser Batterietechnologie veränderte und verändert sich im Zeitverlauf stark. Neben unterschiedlichen Kathodenarten (bspw. NMC, NFP, NCA) ist durch die Weiterentwicklung der Batterietechnologie auch eine Änderung der Materialanteile der entsprechenden Kathodenarten zu verzeichnen. So führt der Wechsel zu nickelreichen NMC-Kathoden zu weiteren Herausforderungen in der Recyclingbranche. Die Anteile kritischer, aber dementsprechend werthaltiger Rohstoffe werden verringert und die mögliche Gewinnmarge für Recyclingunternehmen sinkt ebenso wie der ökologische Nutzen der stofflichen Verwertung. Diese Analyse fokussiert auf das Recycling von Li-Ionen Batterien mit NMC 111 Kathoden. Zieht man die durchschnittliche Lebensdauer von Traktionsbatterien in Betracht, so sind diese Batterietypen diejenigen, die in kurz- bis mittelfristiger Zeit ihr Nutzungsende erreichen und End-of-Life Strategien zugeführt werden. Da die vorliegende Analyse einen Überblick über den derzeitigen ökologischen Nutzen der Rezyklierung geben soll, wird diese Vorgehensweise als sinnvoll angesehen. Die stoffliche Zusammensetzung der analysierten „Modellbatterie“ basiert auf Buchert et al. [13]. Diese definierten auf Basis zur Zeit der Veröffentlichung vorherrschenden Batterietypen eine generische Batteriezusammensetzung. Eine Batterie hat dabei die Masse von 141 kg und einen Energieinhalt von 86 Wh/kg. Das Gehäuse besteht aus Edelstahl. Die genauen Materialanteile können der genannten Quelle entnommen werden. Zu beachten ist dabei, dass die vorliegende Untersuchung bei den künftigen Batterierückläufern von homogenen Kathodezusammensetzungen ausgeht und somit nur auf Batterien mit NMC-Kathoden fokussiert. Die Rubrik „Sonstiges“ auf Zellebene wurde in vorliegender Untersuchung mit dem Bindemittel PVDF gleichgesetzt. Auf Batterie- und Modulgehäuseebene wurde die Kategorie „Sonstiges“ als das Batteriemanagementsystem (BMS) und das Kühlmittel interpretiert. Die Anteile der werthaltigen Materialien des BMS wurden aus einer Auswertungsgrafik des LiBRi-Endberichts abgelesen, da nicht explizit genannt. Die angegebenen Materialien zur Gutschrift wurden mit dem Kehrwert der Recyclingeffizienzen multipliziert um die genauen Materialanteile in der generischen Batterie zu errechnen. Die Differenz aus der errechneten Masse des BMS und der angegebenen Masse für „Sonstiges“ wurde als Kühlmittel angenommen.

8.2.3 Datengrundlage Recyclingprozesse

Die Datengrundlage der einzelnen Prozessschritte basiert hauptsächlich auf zwei Quellen [13, 228]. Eventuelle eigene Berechnungen sowie die Input- und Outputeinheiten sind in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt. Tabelle 30 stellt die Recyclingeffizienzen für die einzelnen rückgewonnenen Materialien in den betrachteten Prozessen dar. Die Demontage der Batteriesysteme ist dabei jeweils den pyro- und hydrometallurgischen Schritten der Routen 1 & 2 vorgeschaltet.

Tabelle 30: Recyclingeffizienzen für rückgewonnene Materialien

Material	Demontage [%]	Route 1 [%]	Route 2 [%]
Aluminium	90		90
Edelstahl	95	90	90
Elektrolyt			50
Gold	100		
Kobalt		98	98
Kunststoff	90		50
Kupfer	95	90	90
Lithium			90
Mangan			98
Nickel	93	98	98
Silber	100		
Quelle	[13]	[228]	[228]

Demontage

Wie bereits erwähnt, basiert der Demontageschritt rein auf manueller Handarbeit. Geringe Mengen an Strom werden durch den innerbetrieblichen Transport der Batterien oder durch elektrische Handwerkzeuge (bspw. Akkuschauber etc.) benötigt. Außerdem wird für die Entladung der Batterien aus dem anliefernden LKW ein Radlader verwendet. Dieser benötigt laut Annahmen des Ardenne National Laboratory für die Entladung von 300 kg Batterien 15 Minuten bei einem stündlichen Verbrauch von 20 Litern Diesel [228]. Der auf den Referenzfluss skalierte Dieserverbrauch wird auf Basis von im EverBatt-Modell beinhalteten Emissionsfaktoren einzelner Verbrennungstechnologien in spezifische direkte Emissionen dieses Prozessschrittes umgerechnet. Die Recyclingeffizienzen der manuellen Demontage und der anschließenden stofflichen Weiterverarbeitung der Fraktionen basieren hingegen auf Informationen von Buchert et al. [13]. Die Outputmengen zur Gutschrift basieren auf einer Multiplikation der Materialmassen mit den entsprechenden Recyclingeffizienzen. Tabelle 31 stellt die Materialflüsse des Demontageprozesses dar. Die Batteriezellen werden in die pyro-/hydrometallurgische Verwertung übergeben (Route1, bzw. Route 2), während die restlichen rückgewonnenen Materialfraktionen in konventionelle Recyclingprozesse fließen. Das entnommene BMS wird etablierten Prozessen zum Wertmetallrecycling aus Elektronikkomponenten zugeführt. Die Differenz zwischen der eingebrachten und rückgewonnenen Materialmenge wird als Stahlschrott modelliert und einer Deponierung zugeführt. Die jeweiligen weiterführenden Aufbereitungsprozesse werden in Abschnitt 8.2.4 diskutiert.

Tabelle 31: Materialfluss Demontage

Demontage	
Input	Output
Generische Batterien	Batteriezellen/-module
Strom	Aluminium
Diesel	Kupfer
	Edelstahl
	Kunststoffe
	Kühlmittel
	Stahlschrott
	Kupfer
	Nickel
BMS	Gold
	Silber
	VOC (Diesel)
	CO (Diesel)
	NO _x (Diesel)
	PM10 (Diesel)
	PM2.5 (Diesel)
	SO _x (Diesel)
	BC (Diesel)
	OC (Diesel)
	CH ₄ (Diesel)
	N ₂ O(Diesell)
	CO ₂ (Diesel)

Route 1 (exkl. Demontage)

Der pyrometallurgische Prozess basiert auf den Daten des EverBatt-Modells. Die angegebenen Inputfaktoren pro kg rezyklierter Batteriezelle in Form von Hilfs- und Betriebsstoffen sowie Energie werden mit der Outputmenge „Batteriezellen“ aus dem Demontageprozess multipliziert. Der zugegebene Kalkstein dient dabei zur Rauchgasentschwefelung und der Sand führt zur Emissionsverringerng durch Temperaturoptimierung [13]. Für den Schmelzvorgang werden große Mengen elektrischer Energie benötigt, wobei die Verbrennung des Elektrolyten und Kunststoffes den notwendigen Energieeinsatz etwas herabsetzt. Direkte Emissionen entstehen durch die Verbrennung von in den Zellen beinhaltenen Stoffen (Graphit, Kunststoffen, Elektrolyt und PVDF) sowie durch die materielle Dekomposition von Kalkstein und Lithiumcarbonat. Berechnet wurden die entsprechenden Emissionen stöchiometrisch durch die Division der jeweiligen Kohlenstoffinhalte der einzelnen Materialien durch den Anteil des Kohlenstoffs im Treibhausgas CO₂. Das Ergebnis wurde wiederum mit den eingebrachten Massen der jeweiligen Materialien multipliziert. Die Kohlenstoffinhalte wurden dem EverBatt-Modell entnommen [228]. Als Elektrolyt wurde dabei Ethylencarbonat herangezogen. Diese Annahme wird durch Fachliteratur gestützt [230]. Für die Berechnung der Emissionen durch die Verbrennung der enthaltenen Kunststoffe wurde Polypropylen herangezogen. Während die entstehende Legierung in die hydrometallurgische Aufbereitung weitergegeben wird,

wird angenommen, dass die Schlacke als Füllstoff in der Betonindustrie verwendet wird. Analog zu Buchert et al. werden daher für die Schlacke weder Gutschriften noch Aufwendungen für eine Deponierung o.ä. kalkuliert [13]. Perspektivisch ist die Rückgewinnung von Lithium aus der Schlacke möglich und wird bereits von Unternehmen durchgeführt. Die damit einhergehende Verbesserung der ökologischen Bilanz wird in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt.

Die anfallende Legierung wird unter Zugabe von Wasserstoffperoxid, Salzsäure und Schwefelsäure weiter hydrometallurgisch aufbereitet. Die jeweiligen notwendigen Bedarfe pro kg Batteriezelle (EverBatt [228]) werden mit der Masse der anfallenden Legierung (Buchert et al. [13]) multipliziert. Auf Outputseite werden die Massen aus der Materialzusammensetzung der generischen Batterie (Buchert et al. [13]) mit den jeweiligen Recyclingeffizienzen des generischen Prozesses multipliziert (EverBatt [228]). Der anfallende Abfall während der hydrometallurgischen Aufbereitung wird in zwei unterschiedlichen Materialklassen dargestellt. Verbleibende Feststoffe als Differenz zwischen den rückgewonnenen Massen und dem eingebrachten Zellmaterial werden als Stahlschrott modelliert und einer Deponierung zugeführt. Die Reste aus verwendetem Frischwasser und diversen Chemikalien werden als Abwasser definiert und in einer externen Abwasserbehandlung aufbereitet. Die resultierenden Nickelverbindungen werden durch die weitere Zugabe von Schwefelsäure und Frischwasser zu verarbeitbarem Nickelsulfat konvertiert. Es werden die entsprechenden Daten des EverBatt-Modells genutzt. Ebenso verhält es sich mit den extrahierten Kobaltverbindungen, die somit zu Kobaltsulfat verarbeitet werden. Auf Grund der Nichtverfügbarkeit eines entsprechenden Datensatzes in der ecoinvent-Datenbank wird bei der Berechnung der Gutschrift statt auf Kobaltsulfat auf den Datensatz Kobalt zurückgegriffen. An dieser Stelle wird auf die dadurch entstehende Unschärfe hingewiesen. Die beschriebenen Materialflüsse sind in Tabelle 32 zusammengefasst.

Tabelle 32: Materialfluss Pyrometallurgische Prozessroute

Pyrometallurgische Prozessroute		
	Input	Output
Pyro	Batteriezellen/-module	Schlacke
	Kalkstein	Legierung
	Sand	CO ₂ Emissionen Verbrennung
	Strom	CO ₂ Emissionen Dekomposition
Hydro	Legierung	Kupfer
	Salzsäure	Kobaltverbindungen
	Wasserstoffperoxid	Nickelverbindungen
	Schwefelsäure	Stahlschrott
Umwandlung	Nickelverbindungen	Nickelsulfat
	Schwefelsäure	Kobaltsulfat
	Wasser	Abwasser

Route 2 (exkl. Demontage)

Die hydrometallurgische Prozessroute basiert ebenfalls auf dem EverBatt-Modell. Der daraus resultierende gleiche Betrachtungsrahmen in Verbindung mit dem einheitlichen Referenzfluss von 1.000 kg generischer Batterie ermöglicht den Vergleich der beiden Prozessrouten. Ähnlich wie für die Nutzung von Diesel während des Demontageprozesses werden der Verbrennung von Erdgas in Route 2 direkte Emissionen zugeschrieben. Als entsprechende Referenztechnologie wird ein industrieller Boiler kleiner Kapazität (Input: ~265-2.650 m³/Stunde) herangezogen. Der Emissionsfaktor wird wiederum aus dem EverBatt-Modell bezogen. Ebenfalls werden analog zum pyrometallurgischen Prozess die direkten Emissionen durch die Materialdekomposition des Inputfaktors Natriumcarbonat berechnet. Die Berechnung der Abwassermenge wurde mangels Dokumentation nicht nachvollzogen und ungeprüft aus dem EverBatt-Modell übernommen [228]. Die rückgewonnen Lithiumverbindungen werden durch die Zugabe von Wasser und Kalkstein zu Lithiumhydroxid vereinheitlicht. Bezüglich den Nickel- und Kobaltverbindungen werden die gleichen Annahmen wie bei der pyrometallurgischen Prozessroute herangezogen. Für Mangan wird seitens des Ardenne National Laboratory keine notwendige Umwandlung angenommen – Produkt aus dem Standardprozess ist demzufolge ohne weitere Aufbereitung Mangansulfat. Vom Elektrolyt werden ausschließlich Lösungsmittel zurückgewonnen. Die Lithiumsalze gehen bei der hydrometallurgischen Prozessierung verloren. Da in derzeitiger Batterietechnologie verbreitet, wird der wiedergewonnene Bestandteil des Elektrolyts als Ethylencarbonat modelliert. Analog zur Pyrometallurgie, werden die anfallenden Reste als Stahlschrott und Abwasser modelliert. Tabelle 33 stellt die Materialflüsse der hydrometallurgischen Prozessroute noch einmal zusammengefasst dar.

Tabelle 33: Materialfluss Hydrometallurgische Prozessroute

Hydrometallurgische Prozessroute		
Input	Output	
Batteriezellen/-module	Kupfer	
Ammoniumhydroxid	Aluminium	
Salzsäure	Graphit	
Wasserstoffperoxid	Kunststoffe	
Natriumhydroxid	Lithiumverbindungen	
Schwefelsäure	Kobaltverbindungen	
Natriumcarbonat	Nickelverbindungen	
Erdgas	Mangan	
Strom	Elektrolytverbindungen (EC)	
Wasser	Stahlschrott	
Hydro	Abwasser	
	CO ₂ Emissionen Dekomposition	
	VOC (Erdgas)	
	CO (Erdgas)	
	NO _x (Erdgas)	
	PM10 (Erdgas)	
	PM2.5 (Erdgas)	
	SO _x (Erdgas)	
	BC (Erdgas)	
	OC (Erdgas)	
	CH ₄ (Erdgas)	
	N ₂ O (Erdgas)	
	CO ₂ (Erdgas)	
Umwandlung	Lithiumverbindungen	Lithiumhydroxid
	Nickelverbindungen	Nickelsulfat
	Kalkstein	Kobaltsulfat
	Schwefelsäure	Abwasser
	Wasser	

8.2.4 Datengrundlage generische Prozesse

Zur Bilanzierung des Gesamtsystems ist die Einbindung generischer Standardprozesse notwendig. Hierfür wurde einheitlich auf die ecoinvent 3.6 Datenbank zurückgegriffen [221]. Nach Möglichkeit wurden Datensätze mit geographischem Bezug zu Deutschland verwendet. Waren solche nicht verfügbar, wurden je nach Verfügbarkeit kaskadenartig zunächst europäische und zuletzt weltweite Datensätze genutzt. Sämtliche Prozessinputs wurden als „Markets“ definiert – beinhaltet sind somit sämtliche vorgeschalteten Emissionen bis zum Bezug des Produkts.

Gutschriften erfolgten ausnahmslos durch Systemerweiterungen. Pro gutgeschriebenem Material wurde somit ein Prozess modelliert, der inputseitig den wiedergewonnen Rohstoff vom Recyclingprozess und die gleiche Menge als negativen Wert vom generischen primären

Herstellungsprozess bezieht. Es wird somit angenommen, dass das wiedergewonnene Material, die Herstellung von Primärrohstoffen ersetzt. Die entsprechende Umweltwirkung dieser primären Herstellungsprozesse fließt als Gutschrift in das System ein.

Mit Ausnahme von Kobalt, Lithium, Nickel und Mangan wurde für sämtliche rückgewonnenen Stoffe vor den Gutschriftenprozess ein zusätzlicher generischer Aufbereitungsprozess eingefügt. Diese Aufbereitungsprozesse sind nicht per se Teil des bilanzierten Prozesses. Die Einbindung ist jedoch notwendig um Materialien in ausreichender Qualität zu erlangen und diese mit den gutgeschriebenen Materialien gleichsetzen zu können. Es wird angenommen, dass die Produkte aus den bilanzierten Recyclingprozessen zu externen Dienstleistern befördert werden um sie dort weiter aufbereiten zu lassen. Eine Gegenüberstellung von Recyclingmaterial, generischem Aufbereitungsprozess und generischem Prozess zur Materialgutschrift (Primärherstellung) findet sich in Anhang 11.3.

Reststoffe wurden entweder einer thermischen Verwertung oder einer Deponierung zugeführt. Auch hierfür wurden generische Prozesse herangezogen. Die Prozesse zur thermischen Verwertung wurden zusätzlich entsprechend der jeweiligen Prozessbeschreibung um gewonnene Wärme und Strom erweitert. Abermals wird angenommen, dass diese Faktoren die primärhergestellten Einheiten ersetzen. Entsprechend wird für die generierten Wärme- und Strommengen eine Gutschrift nach obiger Beschreibung erteilt (vgl. Anhang 11.3).

Aufwendungen für Transporte wurden für die Überführung der gewonnenen Materialien zu den externen Aufbereitungsprozessen einbezogen. Außerdem wird der Transport der Reststoffe zu den jeweiligen Deponien und Müllverwertungseinrichtungen modelliert. Sämtliche Transporte werden mit den Umweltwirkungen eines 16-32 Tonnen Lastkraftwagens mit EURO 5-Norm bilanziert. Generisch und vereinfachend wurde dabei angenommen, dass die Distanz zu Müllverbrennungsanlagen und Deponien 50 km und die Distanz zu Einrichtungen zur weiteren Materialaufbereitung 200 km beträgt.

8.3 Wirkungsabschätzung

Zur besseren Übersichtlichkeit der Analyse der einzelnen Wirkkategorien wurden Phasengrenzen der einzelnen Prozessrouten definiert. Die Balkendiagramme der folgenden Wirkungsabschätzung stellen die Beiträge der jeweiligen Phasen zum Gesamtergebnis für die einzelnen Wirkkategorien dar. Beide Prozessrouten beginnen mit den gleichen Demontage- und entsprechenden Aufbereitungsprozessen (gelb). Es folgt die Phase der Gutschriften für die einzelnen rückgewonnenen Materialien (gelb).

Die darauffolgende Phase der pyrometallurgischen Prozessroute (Route 1) generiert ausschließlich Aufwände, da in der thermischen Aufbereitung keine direkt wiederverwendbaren Materialien gewonnen werden (orange). Die hierbei extrahierte werthaltige Legierung wird in die hydrometallurgische Aufbereitung eingebracht (blau). Die dort entstehenden Materialien werden in der letzten Phase mit einer entsprechenden Gutschrift belegt (blau). Die aggregierten Umweltwirkungen über alle Phasen hinweg werden in den folgenden Schaubildern mit einem grünen Balken dargestellt.

Die Visualisierung der hydrometallurgischen Prozessroute (Route 2) lässt analog zur Prozessbeschreibung in 8.2.1 die Aufwände für eine pyrometallurgische Aufbereitung außen vor. Der entsprechende Balken fehlt somit in der jeweiligen Auswertung. Für die mechanische Zerkleinerung anfallende Aufwände sind in der hydrometallurgischen Aufbereitung inkludiert.

Die Auswertung nach prozentualen Anteilen der In- und Outputfaktoren an den Gutschriften/Aufwänden, erfolgt getrennt zunächst für den Demontageprozess und nachfolgend für die pyrometallurgische und hydrometallurgische Prozessroute abzüglich der Aufwände und Gutschriften des Demontageprozesses. Entsprechend beziehen sich die Prozentangaben bei der pyrometallurgischen Prozessroute auf die Summe der Aufwände von pyrometallurgischem und hydrometallurgischem Teilprozess. Diejenigen der Route 2 allein auf die Summe der Aufwände des hydrometallurgischen Teilprozesses.

Aus ökologischer Sicht ist das Ziel eines jeden Prozesses je Wirkkategorie möglichst geringe Werte zu erzielen. Durch die Annahme, dass rückgewonnene Materialien Primärmaterialien Markt ersetzen, entstehen Gutschriften. Dies führt dazu, dass Prozesse in den analysierten Wirkkategorien negative Werte erzielen können. Diese sind als positive Umweltwirkung zu interpretieren. Durch den angewendeten Recyclingprozess werden in einem solchen Fall höhere Umweltwirkungen der Prozesse zur Primärförderung und –aufbereitung verhindert.

8.3.1 Treibhauspotential (GWP)

Bezüglich des Treibhauspotentials der analysierten Prozessrouten ist zu erkennen, dass insbesondere die Demontage eine verhältnismäßig hohe Gutschrift bei geringen Aufwänden generiert (vgl. Abbildung 34). Den größten Beitrag hierzu liefert mit ca. 75 % der wiedergewonnene Stahl des Batteriegehäuses. Dies liegt vor allem im großen Materialanteil begründet. Interessanterweise trägt die notwendige Aufbereitung des zunächst anfallenden Stahlschrotts nur in geringem Maße zu den Aufwänden des Demontageprozesses bei (ca. 2 %). Weitaus größeren Anteil an den 626 kg CO₂e haben die thermische Verwertung des PP-Kunststoffs (44 %) und des abgelassenen Kühlmittels (24 %) sowie die Dieselverbrennung vor Ort bei der Entladung der Batteriesysteme (24 %) (vgl. Abbildung 36).

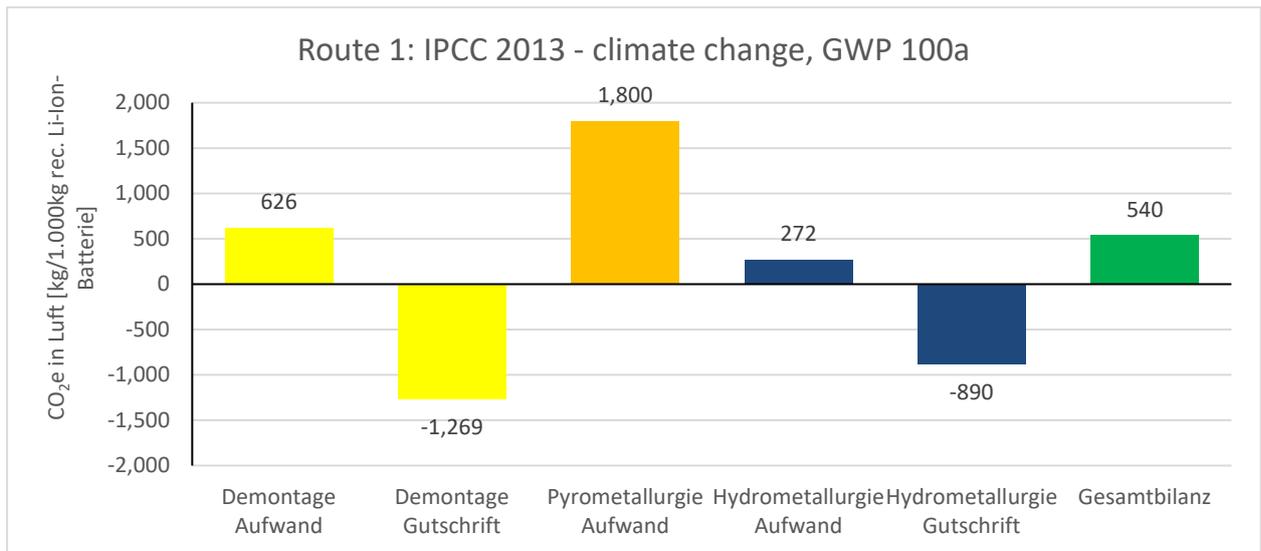


Abbildung 34: Treibhausgaspotential nach IPCC 2013 – Route 1

Die nachfolgende pyrometallurgische Aufbereitung der Batteriezellen/-module generiert enorme ökologische Auswirkungen in der Wirkkategorie GWP (vgl. Abbildung 34). Insbesondere sind hierbei die Beiträge der direkten Emissionen durch Verbrennung und Dekomposition von eingebrachten Materialien (vgl. Abschnitt 8.2.1) mit 42 % und der externe Strombezug mit 38 % zu nennen (vgl. Abbildung 37). Der Anteil der durch die anschließende hydrometallurgische Bearbeitung der Legierung anfallenden Treibhauspotentiale ist hingegen vergleichsweise gering. Größten Anteil trägt dabei die eingebrachte Salzsäure (5 %). Die entstehenden Gutschriften verteilen sich zur Gänze auf die rückgewonnenen Materialien Kobaltsulfat (42 %), Kupfer (32 %) und Nickelsulfat (26 %). In Summe ergibt sich ein positiver Wert für das Treibhauspotential der pyrometallurgischen Prozessroute und somit negative Umweltwirkungen in dieser Wirkkategorie für das Recycling des Referenzflusses von 1.000 kg Li-Ionen Batterien.

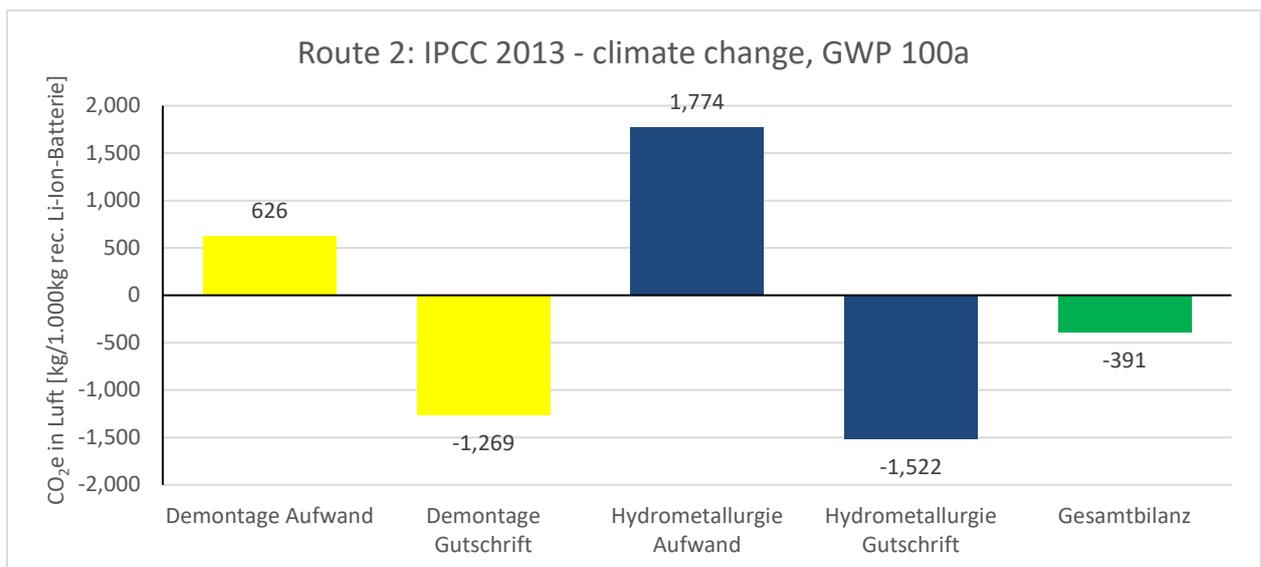


Abbildung 35: Treibhausgaspotential nach IPCC 2013 – Route 2

Wie bereits erwähnt, entsprechen die Umweltwirkungen der Demontage in der Route 2 denjenigen der Route 1. Daher wird an dieser Stelle nicht noch einmal auf die dargestellten Werte eingegangen. Auffallend sind die signifikant höheren Aufwände der hydrometallurgischen Prozessierung verglichen mit Route 1. Dies liegt zu großen Teilen an dem verstärkten Einsatz diverser Chemikalien, der durch den fehlenden thermischen Vorprozess notwendig wird. Insbesondere die großen Mengen Natriumhydroxid (41 %) und Wasserstoffperoxid (24 %) tragen zur Bilanz bei. Zudem ist in diesem Zuge die Nutzung und Verbrennung von Erdgas zu nennen (8 %). Hohe Bedarfe an Schwefelsäure wirken sich vergleichsweise geringfügig aus (7 %). Die hohe Gutschrift im hydrometallurgischen Teilprozess entsteht neben der Rückgewinnung von Kobaltsulfat, Kupfer und Nickelsulfat (analog zur pyrometallurgischen Prozessroute) in abnehmender Größenordnung durch die zusätzliche Rückgewinnung von Aluminium, Ethylencarbonat Lithiumhydroxid, Kunststoffen, Mangansulfat und Graphit (vgl. Abbildung 38).

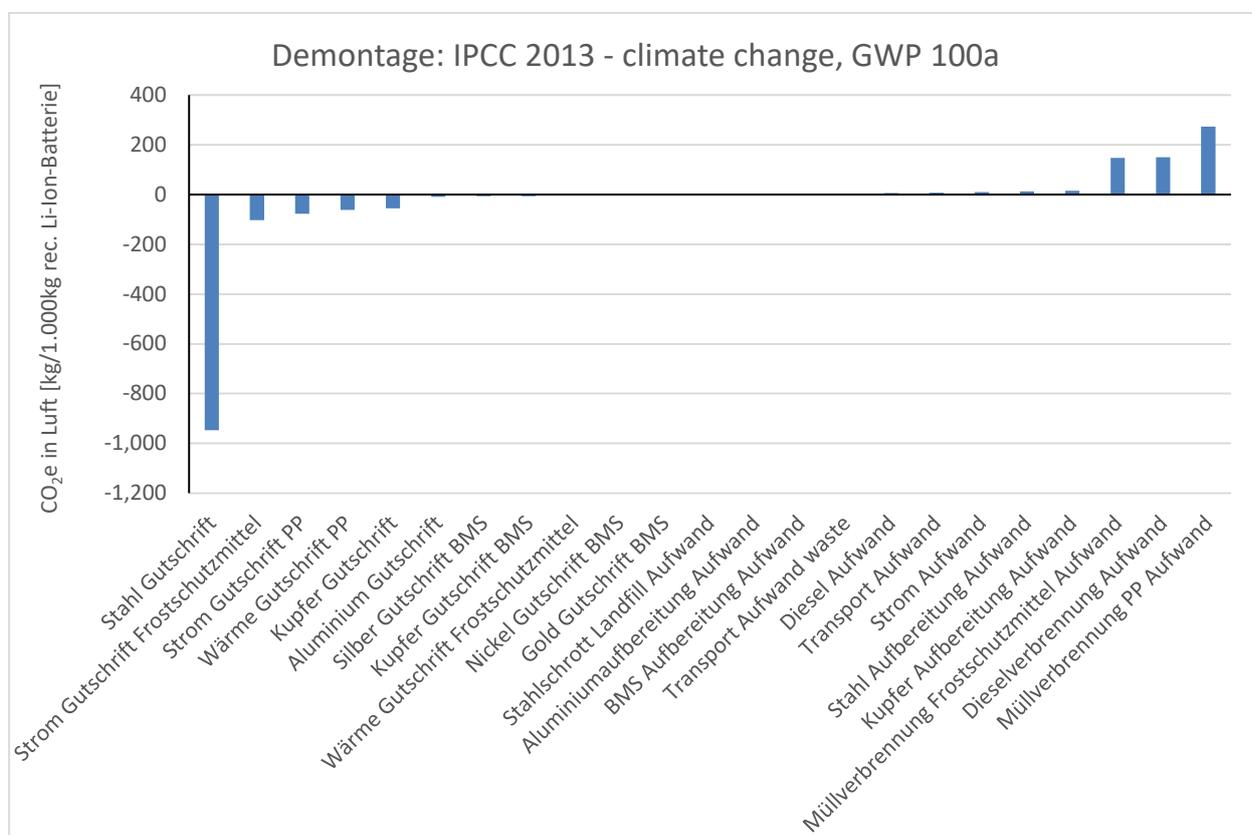


Abbildung 36: Treibhausgaspotential nach IPCC 2013 - Demontage Input/Output

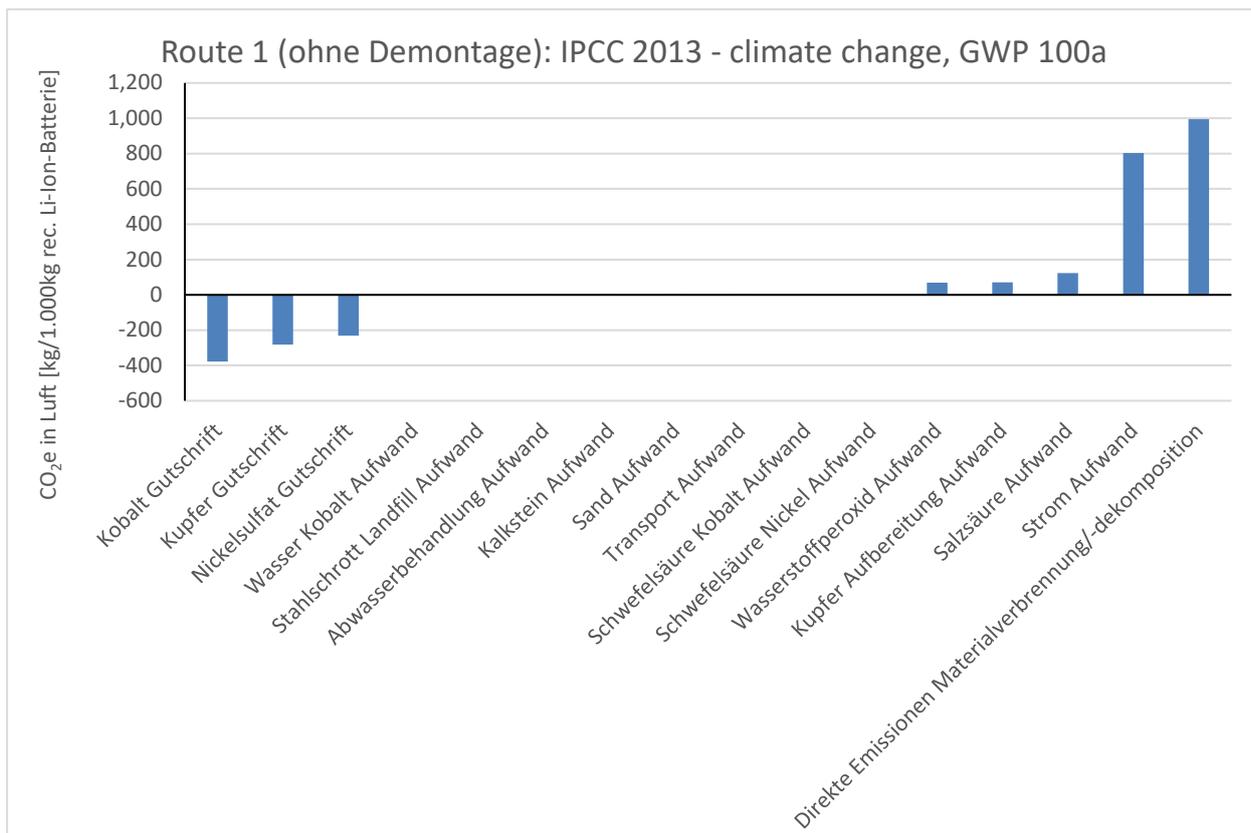


Abbildung 37: Treibhausgaspotential nach IPCC 2013 – Route 1 Input/Output

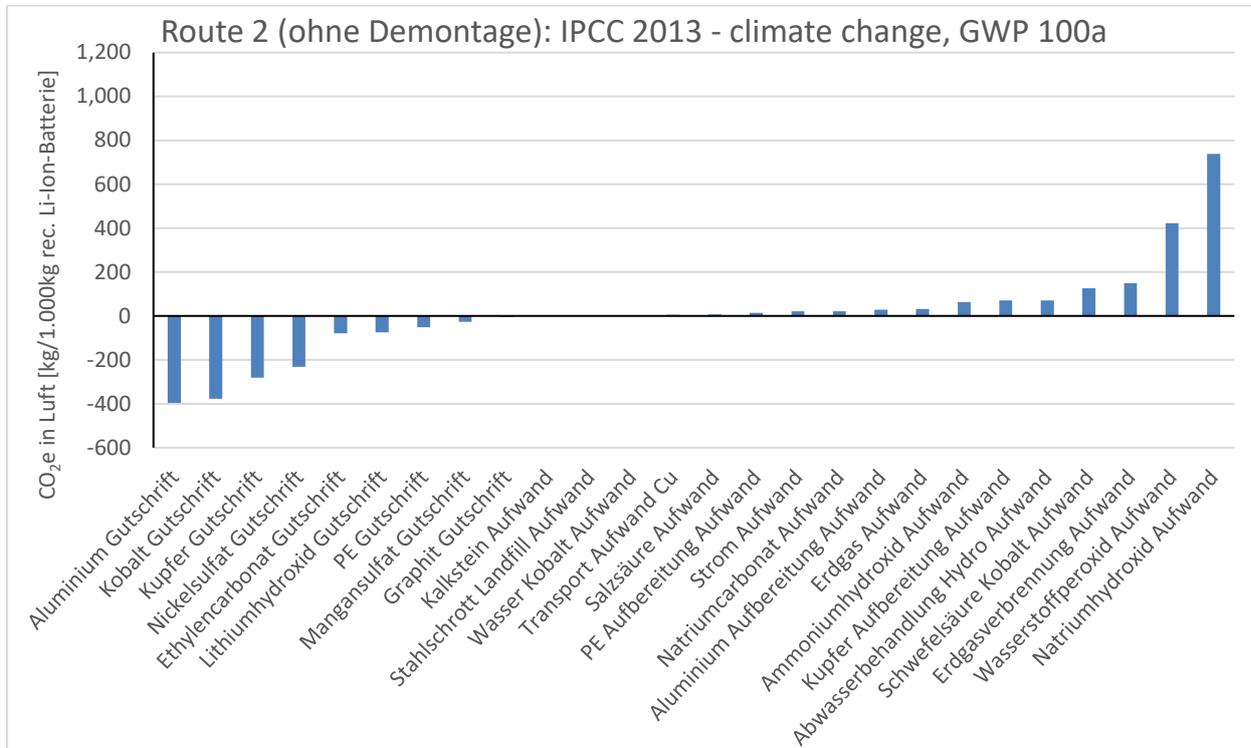


Abbildung 38: Treibhausgaspotential nach IPCC 2013 – Route 2 Input/Output

8.3.2 Kumulierter Energieverbrauch

Der äußerst geringe Energieeinsatz während der Batteriedemontage, schlägt sich im kumulierten Energieverbrauch nieder. Der Strombedarf wirkt sich mit 5 % Anteil an der Gesamtbilanz nur sehr gering aus. Größere Beiträge leisten der Prozess der Verbrennung der Kühlflüssigkeit (37 %) und die Nutzung des Diesels während der Entladung der Batteriesystems (34 %). Die enorme Gutschrift im Demontageprozess kommt vor allem durch die Rückgewinnung der großen Mengen Stahl zustande. Diese trägt mit 72 % signifikant zum guten Ergebnis in dieser Wirkkategorie bei.

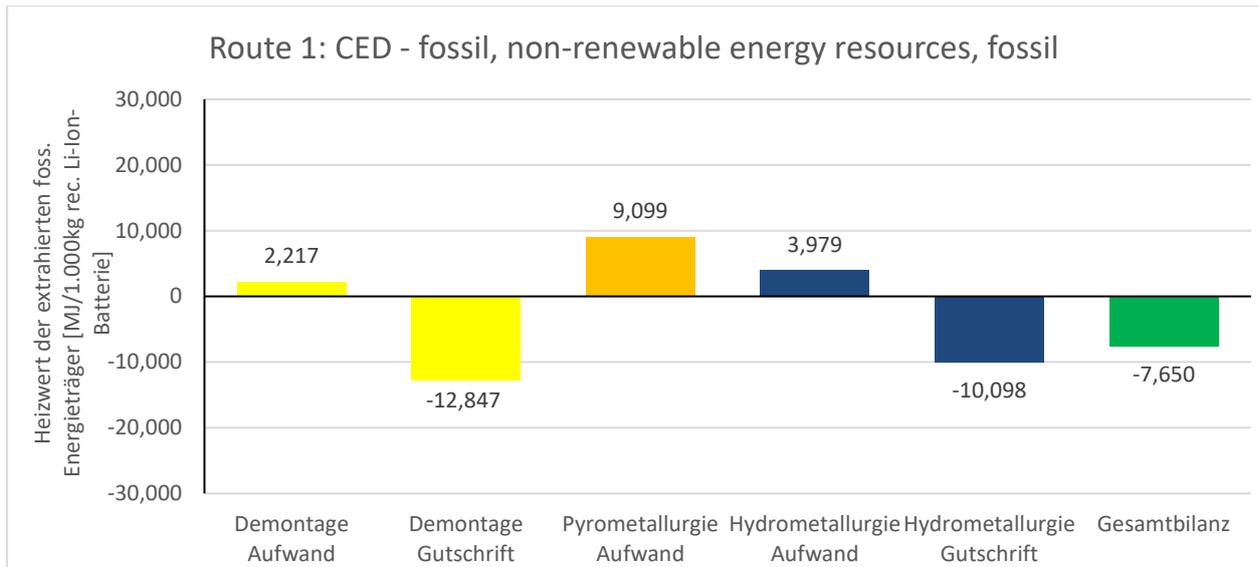


Abbildung 39: Kumulierter Energieverbrauch – Route 1

Abermals wirkt sich der große Strombedarf für den Schachtofen im pyrometallurgischen Teilprozess stark negativ aus. Mit einem Beitrag von rund 69 % zum Gesamtaufwand ist der bezogene Strom der mit Abstand dominierendste Faktor. Es folgen die Aufwände der in der hydrometallurgischen Aufbereitung genutzten Salzsäure (14 %) und des Wasserstoffperoxids (9 %). Da unter den vorliegenden Annahmen die einzig rückgewonnenen Materialien, verteilt sich die Gutschrift der Route 1 auf Kobaltsulfat (41 %), Kupfer (33 %) und Nickelsulfat (26 %). Die hohen Gutschriften der Demontage- und hydrometallurgischen Teilprozesse können in Summe die Aufwände (insbesondere den des pyrometallurgischen Teilprozesses) decken und es ergibt sich eine negative Gesamtbilanz und somit positive Umweltwirkungen in der Wirkkategorie Kumulierter Energiebedarf.

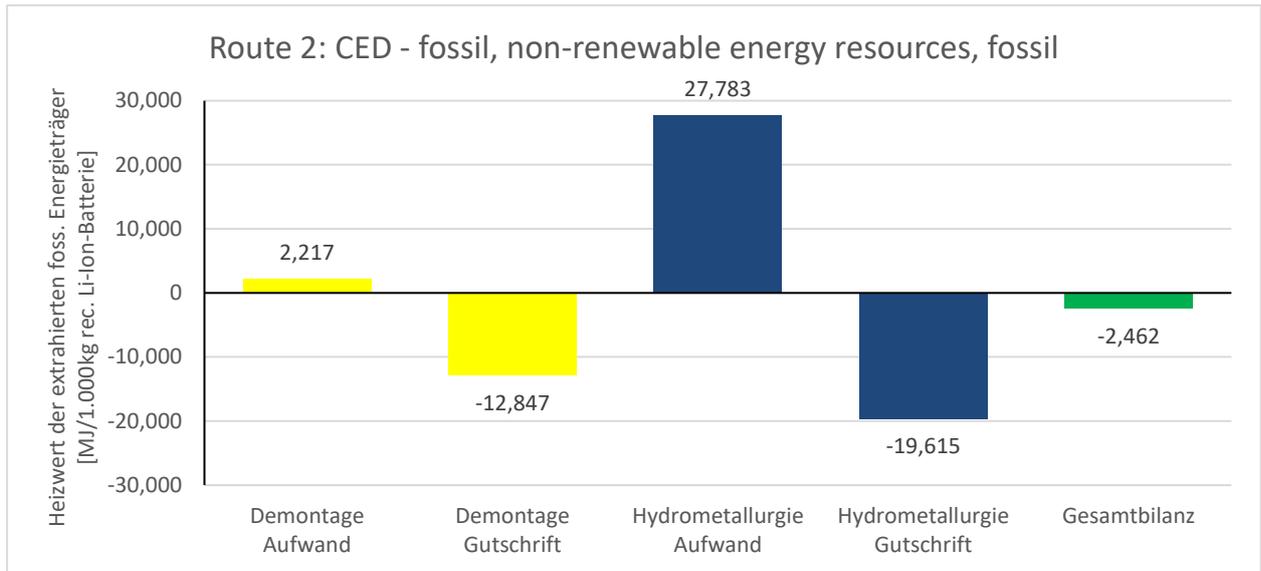


Abbildung 40: Kumulierter Energieverbrauch – Route 2

Zwar ist der Strombedarf bei der Route 2 bedeutend geringer, allerdings resultiert der große Bedarf an stofflichen Inputfaktoren in einer vergleichsweise schlechten Bilanz des hydrometallurgischen Teilprozesses (Natriumhydroxid: 31 %, Wasserstoffperoxid: 25 %, Schwefelsäure: 18 %). So kann die positive Umweltwirkung der gesamten Prozessroute nur durch die hohen Gutschriften der Demontage erzielt werden. Negativ und somit positiv hinsichtlich der Umweltwirkungen fallen im hydrometallurgischen Teilprozess in abnehmender Reihenfolge hauptsächlich die rückgewonnenen Stoffe Aluminium (22 %), Kobaltsulfat (21 %), Kupfer (17 %) und Nickelsulfat (13 %) ins Gewicht.

8.3.3 Eutrophierungspotential

Das nachfolgende Kapitel fasst die beiden Wirkkategorien der Eutrophierung von Frisch- und Meereswasser zusammen. Die Farbtöne entsprechen den bisherigen Darstellungen, jedoch wird zur Erhöhung der Übersichtlichkeit die Farbhelligkeit der Datenbalken der Meerwassereutrophierung erhöht. Die Aufbereitung der während der Demontage rückgewonnenen Kupferbestandteile trägt in beiden betrachteten Wirkkategorien beträchtlich zu den Aufwänden bei (Frischwasser: 60 %, Meerwasser: 22 %). Während hinsichtlich der Eutrophierung von Frischwasser vernachlässigbar, ist die Auswirkung der Dieselverbrennung auf Meerwasser signifikant (60 %). Gutschriften erfolgen hauptsächlich durch die Rückgewinnung von Kupfer (Frischwasser: 48 %, Meerwasser: 22 %) und Stahl (Frischwasser: 25 %, Meerwasser: 53 %), jedoch je Wirkkategorie in unterschiedlichem Ausmaß. Ebenso spielt die Stromgewinnung durch die thermische Verwertung des Kühlmittels und des Kunststoffes eine messbare Rolle.

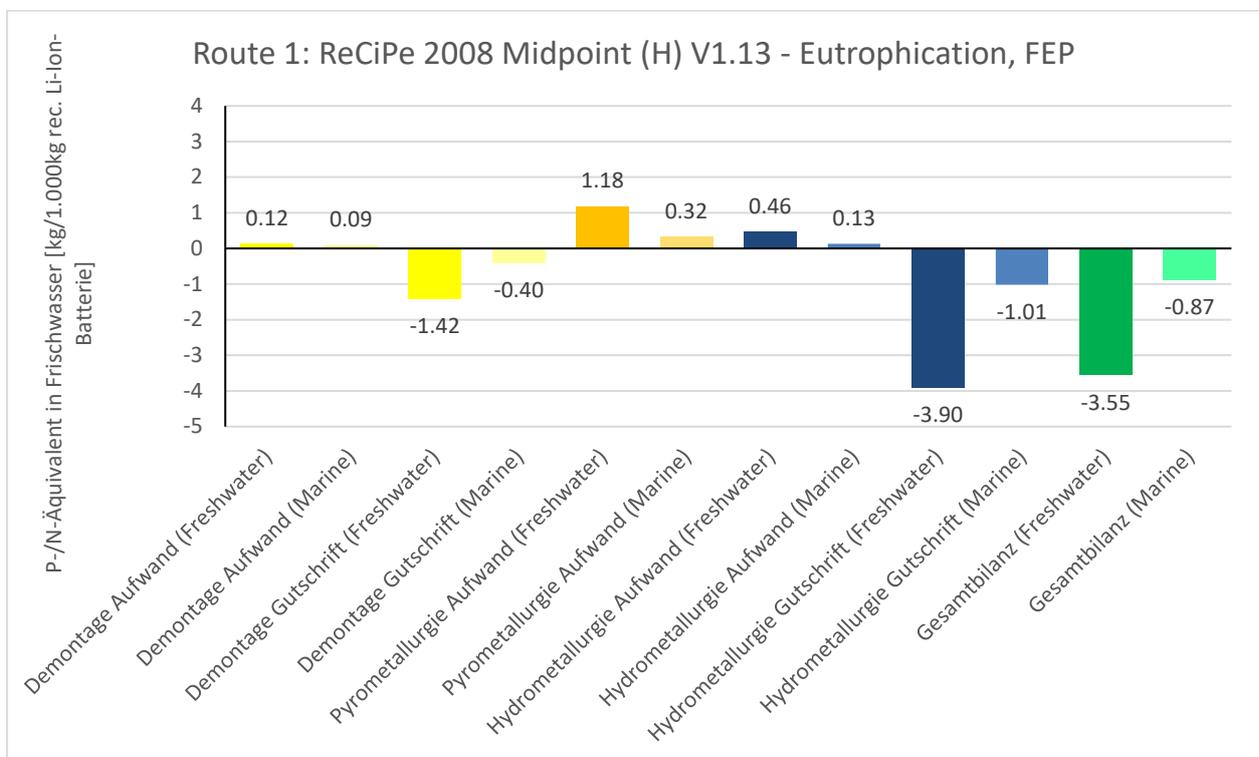


Abbildung 41: Frischwasser- & Meerwassereutrophierung nach ReCiPe 2008 V1.13 – Route 1

Die größten Aufwände der Route 1 entstehen abermals durch den pyrometallurgischen Teilprozess. Dabei trägt der Strombedarf in beiden Kategorien in ähnlichem Maße bei (~70 %). Ebenso verhält es sich mit dem Prozess der Kupferaufbereitung (Frischwasser: 20 %, Meerwasser: 12 %) und der eingesetzten Menge an Salzsäure (Frischwasser: 6 %, Meerwasser: 10 %). Auffallend ist der Anteil des rückgewonnenen Kupfers an der Gutschrift der Wirkkategorie Frischwassereutrophierung (88 %). Hingegen teilt sich die Gutschrift der Wirkkategorie Meerwassereutrophierung auf die Materialien Kupfer (12 %), Kobaltsulfat (41 %) und Nickelsulfat (15 %) auf. In Summe ergeben sich positive Umweltwirkungen in beiden Wirkkategorien für die pyrometallurgische Prozessroute.

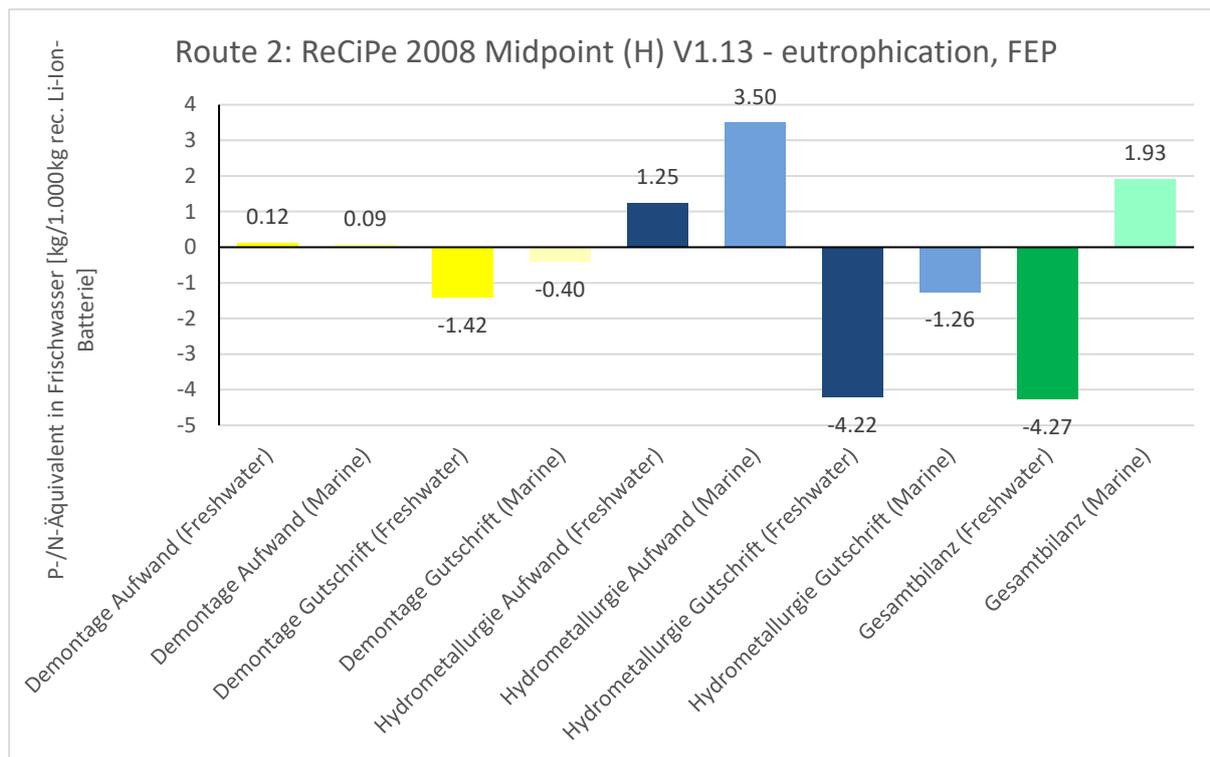


Abbildung 42: Frischwasser- & Meerwassereutrophierung nach ReCiPe 2008 V1.13 – Route 2

Hinsichtlich der Meerwassereutrophierung werden während der Route 2 positive Werte und somit negative Umweltwirkungen generiert. Dies liegt hauptsächlich an der notwendigen Behandlung der großen Mengen anfallenden Abwassers in einem nachgeschalteten generischen Prozess (Beitrag zu den Gesamtaufwänden: 83 %). Die Gutschriften für Kupfer (35 %), Kobaltsulfat (35 %), Nickelsulfat (12 %) und die anderen rückgewonnenen Stoffe können diese Aufwände nicht kompensieren und der Prozess resultiert in erheblichen negativen Umweltwirkungen.

Hingegen werden in der Wirkkategorie Frischwassereutrophierung gar bessere Werte als bei Route 1 erzielt. Allem voran trägt die Kupfergutschrift (82 %) zu diesem positiven Ergebnis bei. Die vergleichsweise hohen Aufwände durch die Einbringung von Natriumhydroxid (31 %), Wasserstoffperoxid (13 %) und Schwefelsäure (6 %) sowie die Aufbereitung des Kupfers (27 %) werden kompensiert.

8.3.4 Ressourcenschwund – Metall

Die Wirkkategorie Ressourcenschwund von Metallen spielt bei Recyclingprozessen eine zentrale Rolle, da durch die Rückgewinnung die Förderung von Primärmetallen verringert werden kann – die statische Reichweite der bekannten Lagerstätten als entsprechend verlängert wird. Messbare Aufwände während der Demontage fallen nahezu ausschließlich durch die Aufbereitung des Kupfers an (96 %). Die Gutschriften verteilen sich hauptsächlich auf die Materialien Kupfer (57 %) und Stahl (41 %). Auffallend ist hierbei der große Beitrag des Kupfers obwohl die rückgewonnene Masse nur ca. 6,5 % der Masse des rückgewonnenen Stahls entspricht.

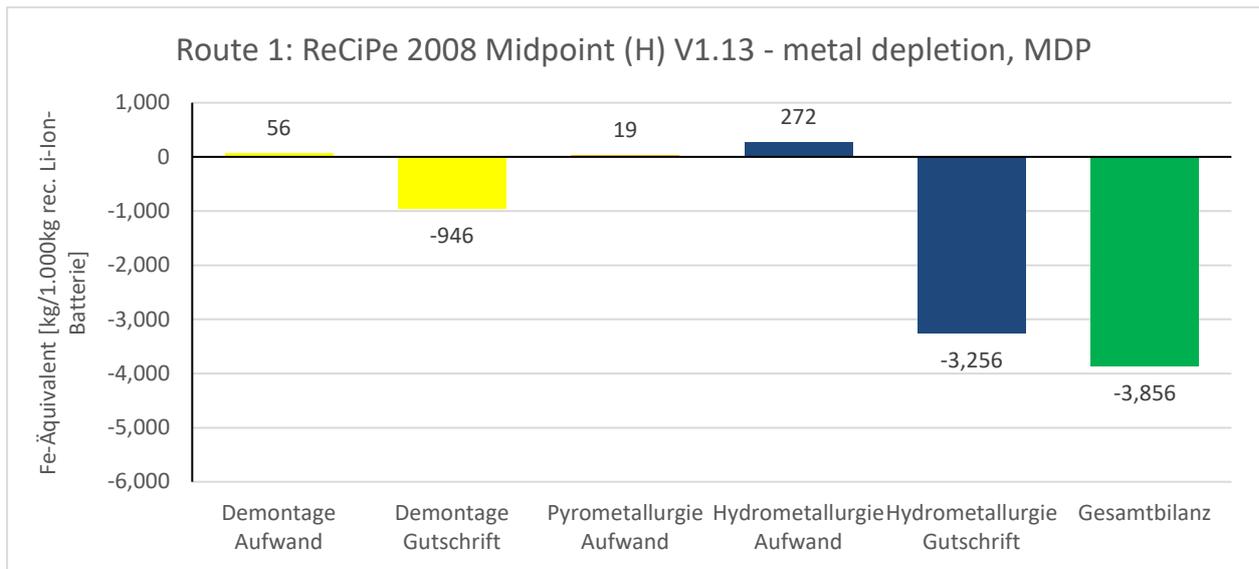


Abbildung 43: Ressourcenschwund Metall nach ReCiPe 2008 V1.13 – Route 1

Wie bei der Demontage nimmt die Aufbereitung des Kupfers bei den vergleichsweise geringen Aufwänden der Route 1 eine zentrale Rolle ein (83 %). Anders als in den ansonsten betrachteten Wirkkategorien fällt der Strombedarf hier mit 6 % nahezu nicht ins Gewicht. Die hohen Gutschriften verteilen sich ungleichmäßig auf die gewonnene Mengen an Kupfer (76 %), Nickelsulfat (21 %) und Kobaltsulfat (3 %).

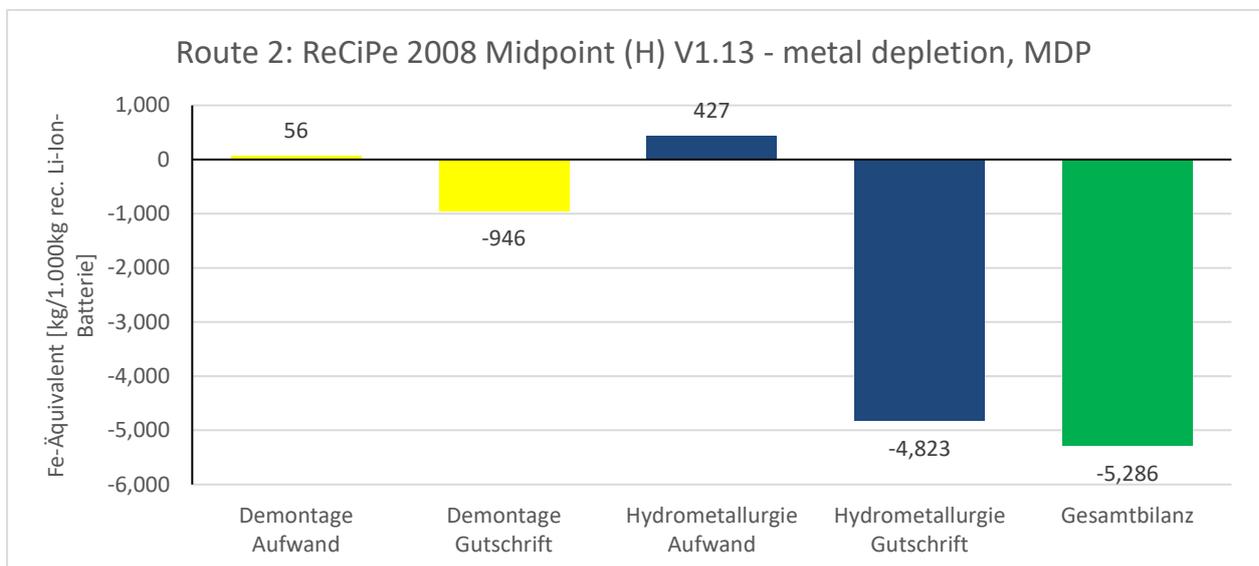


Abbildung 44: Ressourcenschwund Metall nach ReCiPe 2008 V1.13 – Route 2

Die hohen positiven Umweltwirkungen der pyrometallurgischen- werden von der hydrometallurgischen Prozessroute noch bei weitem übertroffen. Abermals liegt dies in den zusätzlich wiedergewonnenen Materialien begründet. So trägt Mangansulfat mit 32 % zu den Gutschriften des hydrometallurgischen Teilprozesses bei. Die höheren Aufwände verglichen zur Route 1 entstehen hauptsächlich durch die Nutzung von Natriumhydroxid (13 %) und Schwefelsäure (11 %).

8.3.5 Photochemisches Oxidantienpotential

Bezüglich des photochemischen Oxidantienpotentials trägt der Demontageschritt erstmals in ähnlichem Maße wie die Summe der pyro- und hydrometallurgischen Teilprozesse der Route 1 bei. Hauptsächlich zeichnen sich hierfür die Verbrennung des Diesels (58 %) durch den eingesetzten Radlader und die Verbrennung des Frostschutzmittels (22 %) verantwortlich. Insbesondere der Stahl generiert hingegen hohe Gutschriften (66 %).

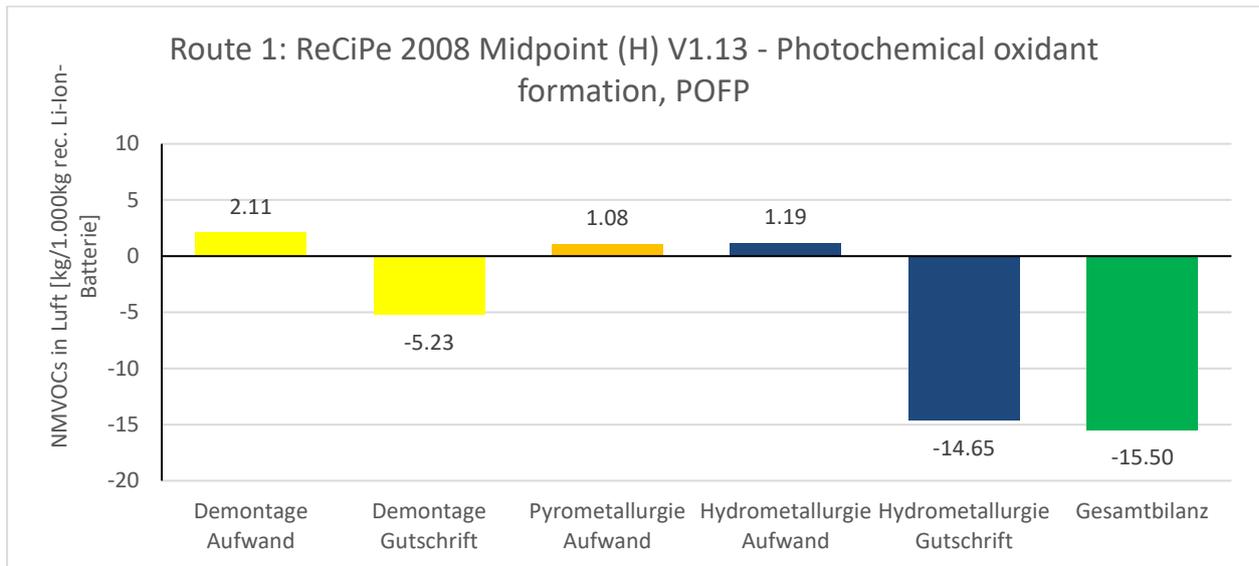


Abbildung 45: Photochemisches Oxidantienpotential nach ReCiPe 2008 V1.13 – Route 1

Der Strombedarf ist ein relevanter Faktor in der Zusammensetzung der Aufwände der pyro- und hydrometallurgischen Teilprozesse der Route 1 (47 %). Durch die Nutzung von Salzsäure (18 %) und Wasserstoffperoxid (8 %) kommen weitere Aufwände hinzu. Insgesamt wird jedoch nur eine geringe Masse an NMVOCs in die Luft abgegeben. Diese werden bei weitem durch die Gutschriften der Materialien Kupfer (37 %), Nickelsulfat (35 %) und Kobaltsulfat (28 %) gedeckt.

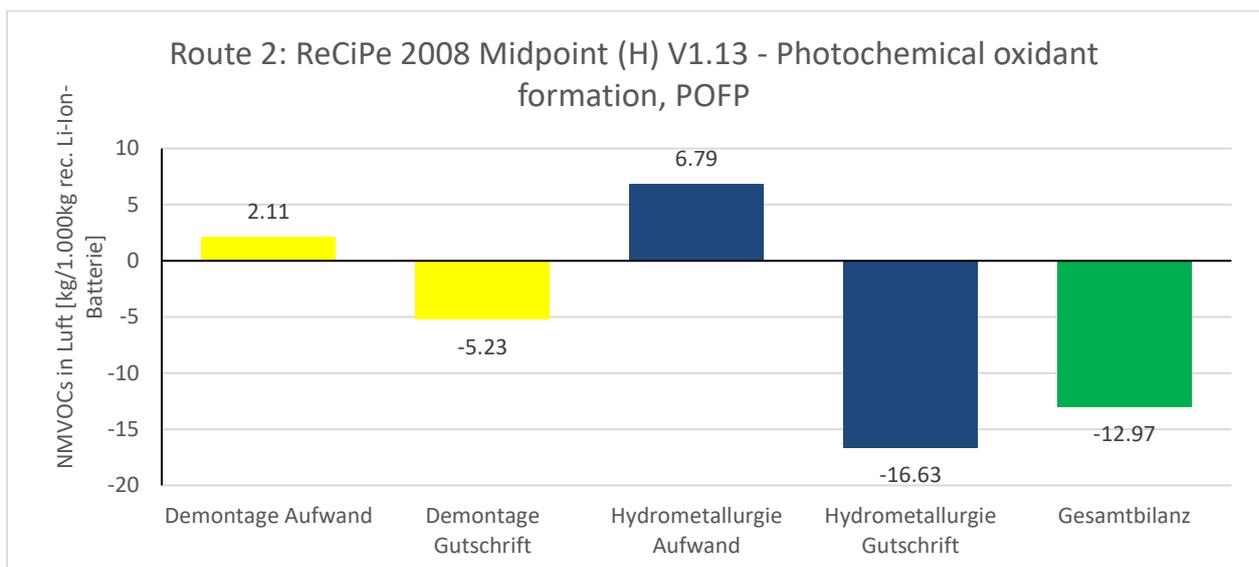


Abbildung 46: Photochemisches Oxidantienpotential nach ReCiPe 2008 V1.13 – Route 2

In Summe ergibt sich bei der hydrometallurgischen Prozessroute ein ähnliches Ergebnis wie bei der Pyrometallurgischen. Allerdings fallen die hohen Aufwände durch Natriumhydroxid (34 %), Schwefelsäure (27 %) und Wasserstoffperoxid (17 %) höher ins Gewicht als die zusätzlichen Materialgutschriften. Entsprechend entstehen in der Gesamtbilanz zwar positive Umweltwirkungen. Diese fallen jedoch geringer aus als die der Route 1.

8.3.6 Versauerungspotential

Wie in den meisten betrachteten Wirkkategorien werden die positiven Umweltwirkungen des Demontageprozesses im Bereich des Versauerungspotentials hauptsächlich durch die Rückgewinnung von Stahl (53 %) und Kupfer (22 %) ausgelöst. Ebenfalls trägt die Nutzung des Diesels zu Beginn des Prozesses in ähnlichem Maße zu den Aufwänden der Demontage bei (55 %).

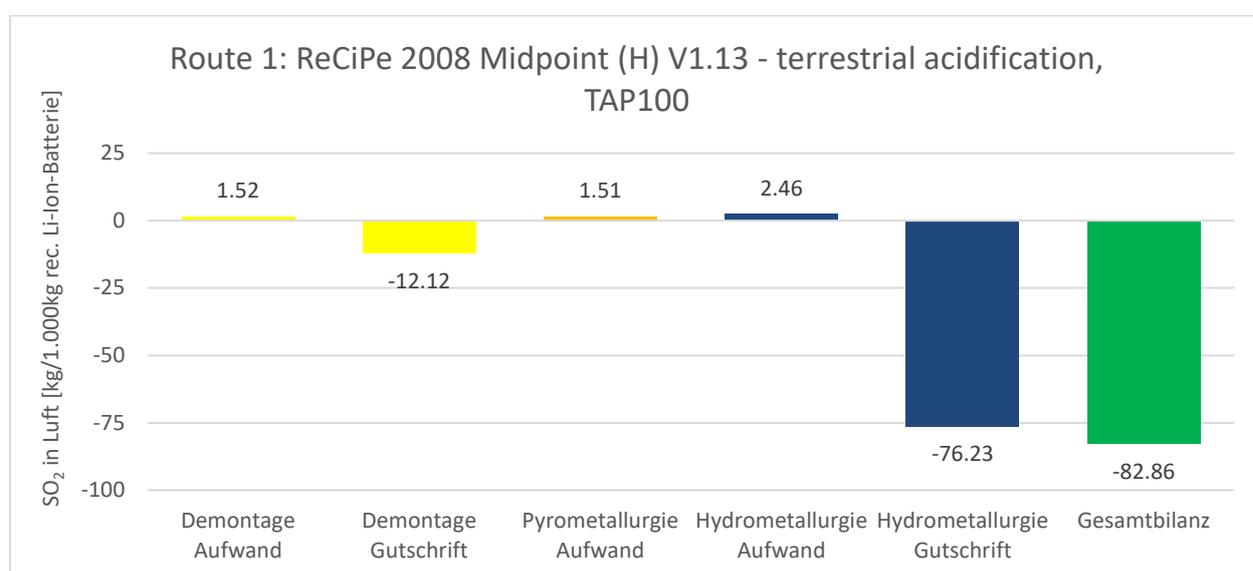


Abbildung 47: Versauerungspotential nach ReCiPe 2008 V1.13 – Route 1

Das äußerst geringe Versauerungspotential der pyro- und hydrometallurgischen Teilprozesse der Route 1 steht enormen Gutschriften durch Kupfer (44 %), Kobaltsulfat (41 %) und Nickelsulfat (15 %) gegenüber. Es entsteht eine signifikant hohe positive Umweltwirkung der Route 1.

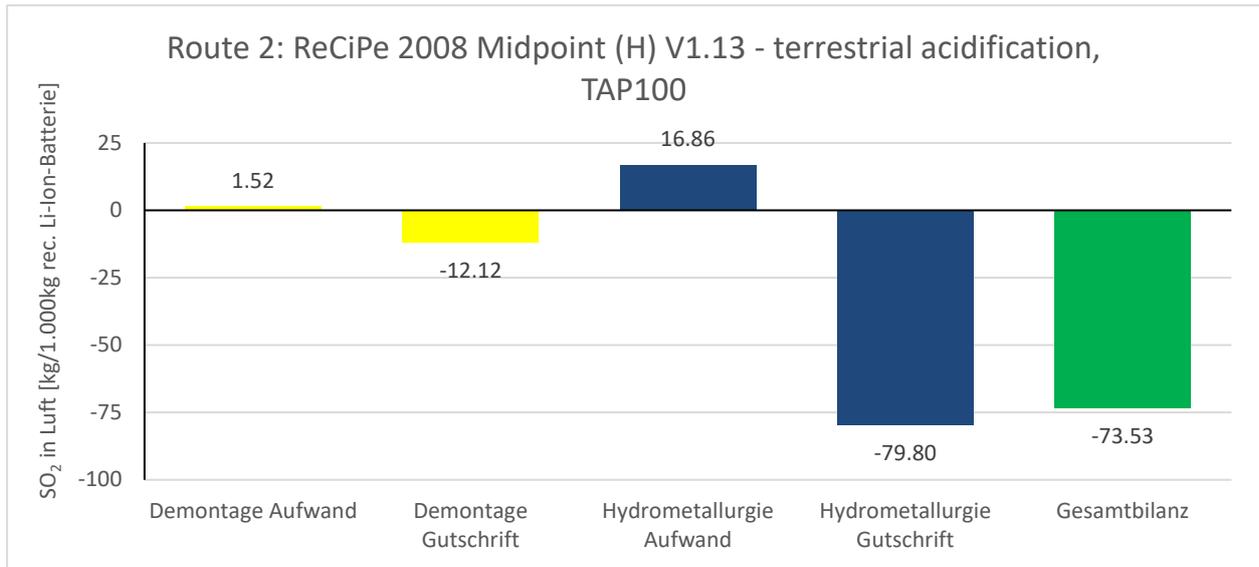


Abbildung 48: Versauerungspotential nach ReCiPe 2008 V1.13 – Route 2

Durch die Nutzung großer Mengen diverser Chemikalien entstehen bei Route 2 zunächst höhere Aufwände als bei Route 1. Insbesondere die eingebrachte Schwefelsäure (56 %), das Natriumhydroxid (20 %) und das Wasserstoffperoxid (8 %) tragen hierzu bei. Wiederum können die höheren Gutschriften durch die bessere Recyclingeffizienz der Route 2 diese höheren Aufwände nicht zur Gänze kompensieren und es entstehen geringer positiv ausfallende Umweltwirkungen verglichen mit Route 1.

8.4 Auswertung

Tabelle 34 fasst die gewonnenen Erkenntnisse über die beiden analysierten Prozessrouten in den betrachteten Wirkkategorien noch einmal zusammen. Grün hinterlegt sind sämtliche Wirkkategorien in denen positive Umweltwirkungen erzielt werden ($\hat{=}$ negativer Wert). Rot hinterlegte Zellen markieren negative Umweltwirkungen. Jeweils fett markiert ist die Prozessroute, die in der jeweiligen Wirkkategorie besser abschneidet.

Da der Demontageprozess für beide Routen die gleichen Umweltwirkungen erzielt, wird dieser wie in den vorangegangenen Abschnitten gesondert von den nachfolgenden Teilprozessen der zwei Routen diskutiert. Die Nutzung von Diesel für den Radlader zum Abladen der Batteriesysteme bewirkt in drei von sieben Wirkkategorien den größten Teil der negativen Umweltwirkungen des Demontageprozesses (MEP, POF & TEA). Weiterhin sind signifikante Beiträge in den Kategorien GWP und CED zu messen. Die Verbrennung der extrahierten Reststoffe Frostschutzmittel und Kunststoffe (PP) hat mit Ausnahme der Kategorie MED ebenfalls signifikanten Einfluss auf die negativen Umweltwirkungen dieses Prozessschrittes. Die Kupferaufbereitung dominiert die ökologischen Aufwände der Kategorien FEP und MED.

Tabelle 34: Zusammenfassung der Umweltwirkungen in den betrachteten Wirkkategorien

Wirkkategorie	Kürzel	Methode	Pyro- metallurgische Prozessroute	Hydro- metallurgische Prozessroute	Einheit
			Route 1	Route 2	
Treibhaus-potential	GWP	IPCC 2013: Climate Change	540	-391	kg CO ₂ e
Kumulierter Energieverbrauch	CED	Cumulative Energy Demand	-7.650	-2.462	MJ Heizwert
Eutrophierungs- potential	FEP	ReCiPe 2008 (H) V1.13: Freshwater Eutrophication	-3,55	-4.27	kg P Äquivalent
	MEP	ReCiPe 2008 (H) V1.13: Marine Eutrophication	-0.87	1.93	kg N Äquivalent
Ressourcen- schwund Metall	MED	ReCiPe 2008 (H) V1.13: Metal Depletion	-3.856	-5.286	kg Fe Äquivalent
Photochemisches Oxidantien-potential	POF	ReCiPe 2008 (H) V1.13: Photochemical Oxidant Formation	-15,5	-12,97	kg NMVOCs
Versauerungs- potential	TEA	ReCiPe 2008 (H) V1.13: Terrestrial Acidification	-82,86	-73,53	kg SO ₂ e

In Tabelle 34 ist zu erkennen, dass die pyrometallurgische Prozessroute in 4 der 7 betrachteten Wirkkategorien besser abschneidet als die hydrometallurgische Prozessroute. Jede der analysierten Routen schließt in einer Wirkkategorie mit negativen Umweltwirkungen ab. Bei Route 1 wird dieser Wert in der Wirkkategorie Treibhauspotential (CO₂e) erreicht. Wie bereits in 8.3.1 diskutiert, ist dies vor allem auf die direkten Emissionen und den Strombedarf im pyrometallurgischen Teilprozess zurückzuführen. Generell zeichnet sich für Route 1 der Strombedarf in 5 der 7 betrachteten Wirkkategorien durch den größten Anteil an den Gesamtaufwänden verantwortlich. In der Kategorie Treibhauspotential hat Strom den zweitgrößten Anteil, während er in der Kategorie metallischem Ressourcenschwund nahezu keine Rolle spielt. Weiterer signifikanter Parameter ist die Aufbereitung des rückgewonnenen Kupfers in einem generischen Standardprozess (größter Anteil in MED, zweitgrößter Anteil in fünf weiteren Wirkkategorien). Außerdem ist die eingebrachte Salzsäure zu nennen, die in 6 von 7 Wirkkategorien den drittgrößten Anteil an den gesamten Aufwänden trägt. Die Gutschriften sind verteilt auf die drei rückgewonnenen Materialien Kupfer, Kobaltsulfat und Nickelsulfat (GWP, CED, POF). Dabei spielt Kupfer in den Kategorien FEP und MED eine dominierende Rolle.

Die hydrometallurgische Prozessroute erzielt in den Kategorien GWP, FEP und MED bessere Ergebnisse als die pyrometallurgische Prozessroute. Die negativen Umweltwirkungen in der Kategorie Meerwassereutrophierung (MEP) resultieren zum größten Teil aus der notwendigen nachgeschalteten Abwasserbehandlung durch einen generischen Prozess. Insbesondere durch die Unklarheit des EverBatt-Datensatzes hinsichtlich einer potentiell berücksichtigten Abwasserbehandlung sollte dieser Aspekt auf Grund der signifikanten Auswirkung noch einmal separat betrachtet werden. Diese spielt zwar in der Frischwassereutrophierung ebenfalls eine messbare, in den weiteren Kategorien jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Die Nutzung des Natriumhydroxids in der hydrometallurgischen Aufbereitung zeichnet sich hingegen durchgehend

durch eine hohe negative Umweltwirkung aus (größter Beitrag zur Gesamtsumme in den Kategorien GWP, CED, FEP und POF; zweitgrößter Beitrag in den Kategorien MEP, MED und TEA. Ebenso findet sich das eingebrachte Wasserstoffperoxid unter den größten drei Beiträgen in fast allen Wirkkategorien (GWP, CED, FEP, POF und TEA). Trotz des massenmäßigen größten Anteils der stofflichen Inputs in Route 2, wirkt sich die genutzte Schwefelsäure nur in den Kategorien POF und TEA signifikant aus. Die Aufbereitung der anfallenden Kupfermaterialien sowie die Nutzung von Erdgas sind ebenfalls zu nennende Größen in einigen Wirkkategorien, wenn auch in deutlich geringerem Ausmaß als die zuvor genannten Faktoren. Hinsichtlich der Gutschriften ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei Route 1. Jedoch trägt insbesondere das zusätzlich rückgewonnene Aluminium in den Kategorien GWP, CED und FEP in großem Maße positiv bei. Mangansulfat liefert ausschließlich in der Wirkkategorie metallischer Ressourcenschwund einen relevanten Beitrag. Lithiumhydroxid hingegen wirkt sich in den Kategorien GWP und MEP in messbarer Größenordnung aus.

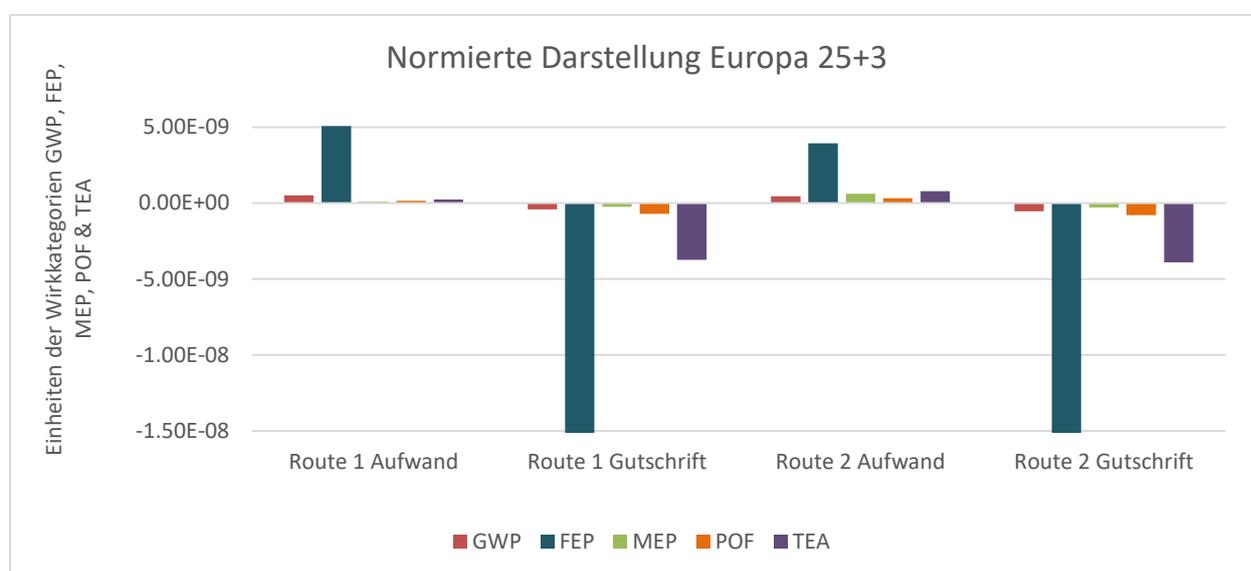


Abbildung 49: Auf die Auswirkungen der EU25+3 Staaten normierte Darstellung ausgewählter Wirkkategorien

Abbildung 49 visualisiert die Umweltwirkungen der beiden analysierten Prozessrouten normiert auf die Umweltwirkungen der EU25+3 Staaten des Jahres 2000. Entsprechende Datensätze fehlen für die Wirkkategorien CED und MED, weshalb selbige an dieser Stelle vernachlässigt werden [231]. Diese Darstellung soll einen Überblick über solche Wirkkategorien geben, in denen verglichen mit den Anderen große Umweltwirkungen generiert werden. Abzulesen ist dabei, dass durch das Recycling von 1.000 kg Li-Ionen Batterien unter den getroffenen Annahmen insbesondere große Umweltwirkungen in den Kategorien Frischwassereutrophierung und Versauerung entstehen. In beiden Kategorien sind für beide Routen positive Umweltwirkungen abzulesen. Die Bewertung wurde nach Möglichkeit mit Datensätzen mit räumlichem Bezug zu Deutschland durchgeführt. Dies soll eine Annäherung an die Auswirkungen einer entsprechenden Recyclinganlage im Bundesland Baden-Württemberg abbilden.

8.5 Kritische Diskussion

Wie bereits eingangs erwähnt verzichtet diese ökologische Bilanzierung auf die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse. Allerdings gibt Abschnitt 8.5.3 einen Überblick über etwaige Einschränkungen der Evaluierung und gibt Aufschluss über mögliche weiterführende Arbeiten an vorliegendem Modell um ein detaillierteres Abbild der Realität zu schaffen.

8.5.1 Vollständigkeitsprüfung

Die vorliegende Untersuchung bilanziert auf Basis von generischen Prozessen und unter Einbringung einer generischen Batterie. Somit wird ein Überblick über die Größenordnung einhergehender Umweltwirkungen geschaffen, allerdings erfolgt keine Detailanalyse eines realen Prozesses. Sämtliche Daten basieren auf Literaturquellen – im Zuge dieser Untersuchung wurden keine eigenen Primärdaten erhoben. Bezüglich der Abschätzung der Vollständigkeit muss daher auf die referenzierte Literatur, insbesondere das EverBatt-Modell und das LiBRi-Projekt verwiesen werden.

Anteile, die in der Literatur nicht klar beschrieben wurden, wurden mit Annahmen belegt. So wurde die Kategorie „Sonstiges“ in der Materialzusammensetzung auf Zellebene mit dem Bindemittel PVDF gleichgesetzt. Auf Ebene des Batterie- und Modulgehäuses wurde selbige Kategorie als Kühlflüssigkeit (abzüglich der Masse der im BMS enthaltenen Wertmetalle) modelliert. Hierdurch entstehen vernachlässigbare Unschärfen.

Auf Prozessebene wurden gewisse Annahmen bezüglich der rückgewonnenen Materialien getroffen. So werden Mangananteile als Mangansulfat modelliert, Kunststoffe auf Modulebene als Polypropylen und auf Zellebene als Polyethylen. Entstehendes Kupfer und Stahl wird zunächst als Kupfer-, bzw. Stahlschrott modelliert. Graphit und Lösungsmittel der Elektrolytverbindungen (in vorliegender Untersuchung Ethylencarbonat) werden in wiederverwendbarer Form extrahiert.

8.5.2 Konsistenzprüfung

Die Daten der beiden Prozessrouten basieren auf den gleichen Annahmen hinsichtlich Anlagenkapazität und Rahmenbedingungen (Standort etc.). Der zusätzlich vorgeschaltete Prozess der manuellen Demontage ist zunächst beliebig skalierbar. Es wird nicht erwartet, dass mit steigenden Rücklaufmengen notwendig werdende Automatisierungslösungen relevante Auswirkungen auf die Recyclingeffizienz dieses Teilprozesses haben. Entsprechend ist eine Konsistenz der Daten aus der genutzten Literatur gegeben.

Generell wurden die beiden verglichenen Prozessrouten unter der gleichen Methodik hinsichtlich Modellierung von Gutschriften und Aufwänden bilanziert. Generische Datensätze aus derecoinvent 3.6 Datenbank wurden unter konsistenten Kriterien ausgewählt. Eine Aussage zur Qualität und Konsistenz dieser Daten wird an dieser Stelle nicht getroffen. Weiterführende Untersuchungen sollten diesen Aspekt insbesondere für solche Materialien bzw. Prozesse mit großer Auswirkung auf die einzelnen Wirkkategorien (vgl. Abschnitte 8.3 & 8.4) überprüfen.

8.5.3 Einschränkungen

Während die meisten In- und Outputfaktoren als vordefinierte Datensätze aus der ecoinvent 3.6 Datenbank entnommen werden und somit als gegeben angenommen werden, geben einige Annahmen Anlass zur Diskussion. Änderungen in der Masse der Inputfaktoren der jeweiligen Prozessrouten sowie der Materialzusammensetzung der generischen Batterie haben direkten und z. T. signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse dieser Bilanzierung. Insbesondere ist dabei die sich ändernde Kathodenzusammensetzung neuerer Batteriegenerationen zu nennen. Außerdem nutzen aktuelle Batterietypen z. T. Gehäuse aus Aluminium. Da das Edelstahlgehäuse einen signifikanten Anteil an den positiven Umweltwirkungen des Demontageprozesses bewirkt, sollte die Auswirkung einer Materialsubstitution im Bereich der Komponente Batteriegehäuse analysiert werden (einige aktuelle Batteriesysteme nutzen Aluminiumgehäuse). Zwar hat die Herstellung von primärem Aluminium bspw. einen erheblich größeren CO₂-Fußabdruck als die von Edelstahl, doch ist gleichzeitig mit einer Verringerung der Masse des Gehäuses zu rechnen. Hinzu kommen die notwendigen Aufbereitungsprozesse für den rückgewonnenen Metallschrott. So generiert die Aufbereitung von Aluminium höhere Umweltwirkungen als die von Stahl (zumindest in der Wirkkategorie GWP). Daher bedarf eine solche Variation ganzheitliche Änderung in den Annahmen einer Ökobilanz hinsichtlich sämtlicher vor- und nachgeschalteter Auswirkungen. Allgemein wurde im Bereich der Aufarbeitungsprozesse für die rückgewonnenen Materialien sowie der Prozesse zur Primärförderung (zur Modellierung der Gutschriften) auf Grund der z. T. mangelnden Verfügbarkeit exakt zutreffender Datensätze auf Annäherung durch nach Ansicht der Autorenschaft ähnlicher Prozesse zurückgegriffen. Die entsprechende Aufstellung findet sich in Abschnitt 8.2.4.

Weiterhin wurde die Materialkategorie „Sonstiges“ als Kühlmittel modelliert. Hierfür wurde der Datensatz Frostschutzmittel herangezogen. Hierdurch ergibt sich in zweierlei Hinsicht eine gewisse Unschärfe. Zum einen ist nicht bekannt, welche Materialien durch Buchert et al. unter „Sonstiges“ in der generischen Batteriezusammensetzung verortet wurden und zum anderen besteht höchstwahrscheinlich nicht der gesamte Anteil des Kühlmittels aus Frostschutzmittel. Dies hat wiederum Einfluss auf eine weitere Annahme. Die Verbrennung der Reststoffe Frostschutzmittel und Kunststoffe (Polypropylen) wurde mit den zusätzlichen Outputs Strom und Wärme belegt. Entsprechend wurden hierfür Gutschriften verteilt. Eine erneute Analyse sollte die Auswirkung eines Verzichts auf diese Annahme prüfen. Vergleichsweise große Auswirkungen hat die Nutzung von Diesel während des Ausladens der Batteriesysteme unter Zuhilfenahme eines Radladers. Diese Annahme basiert auf den Angaben des EverBatt-Modells. Allerdings ist den Autoren bekannt, dass im realen Umfeld hierfür hauptsächlich gas- oder strombetriebene Gabelstapler herangezogen werden. Die Umweltwirkungen, der Kategorien GWP, CED, MEP, POF und TEA würden sich durch diese Veränderung z. T. erheblich verbessern. Ebenso basieren die Mengen an eingebrachten Chemikalien auf den Angaben des EverBatt-Modells. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass durch diese Inputfaktoren enorme negative Umweltwirkungen generiert werden. Geringe Einsparungen (insbesondere von Natriumhydroxid, aber auch Wasserstoffperoxid, Schwefel- und Salzsäure können bereits zu einem messbaren Rückgang der Umweltwirkungen der hydrometallurgischen Teilprozesse führen.

Da die Auswirkungen des generischen Prozesses zur Kupferaufbereitung in jeder Wirkkategorie und in jeder der analysierten Prozessroute eine bedeutende Rolle spielen, sollte auch dieser Aspekt näher beleuchtet werden.

9 Handlungsempfehlungen

Auf Basis der Expert*innenbefragungen sowie der mehrjährigen Erfahrung der einzelnen Projektpartner im Kontext E-Mobilität, Batterietechnologie und Batterierecycling, wurden im Laufe der Projektarbeit Hemmnisse identifiziert, die derzeit einer ganzheitlichen Kreislaufführung von Traktionsbatterien beeinträchtigen, bzw. eine optimale Umsetzung verhindern. Abgeleitet von diesen Hemmnissen wurden Handlungsempfehlungen an diverse Adressaten formuliert. Neben den Stakeholdern einer Kreislaufführung von Batteriesystemen aus der freien Wirtschaft (Batteriehersteller, Fahrzeughersteller, Second-Use-Anwender, Recycler) wurden weitere Stakeholder inkludiert, denen aus Sicht der Autorenschaft Potential zugesprochen wird, die Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien maßgeblich zu unterstützen und zu fördern. Dazu gehören Forschungseinrichtungen, Verbände oder NGOs und die öffentliche Hand. Der intensive Austausch dieser peripheren- mit den industriellen Adressaten wird als wesentliche und problemübergreifende Handlungsempfehlung angesehen und ausgesprochen. Im Folgenden sind neun Hemmnisse beschrieben, denen jeweils Handlungsempfehlungen zu deren Überwindung zugeordnet sind. Neben den angesprochenen Adressaten ist zudem markiert, welche Ebene durch die einzelnen Handlungsempfehlungen adressiert wird. Dabei wird zwischen technologischer, organisatorischer, regulatorischer, ökonomischer und ökologischer Ebene unterschieden. Zu beachten ist, dass je Handlungsempfehlung sowohl mehrere Adressaten als auch mehrere Ebenen angesprochen werden können.

9.1 Design for Recycling

Handlungsempfehlungen	Adressat						Ebene			
	Batteriehersteller	Fahrzeughersteller	2nd-Use-Anwender	Recycler	Forschung	Verbände/NGOs	Öffentliche Hand	Technisch	Organisatorisch	Regulatorisch
Design for Recycling (Anwendung)	x	x	x					x	x	
Design for Remanufacturing - Modulare Batteriesysteme	x	x			x					
Normen/Standards/gesetzl. Vorgaben (Design for Recycling/Remanufacturing)					x	x	x		x	x

Derzeitige Batteriesysteme, sowie frühere Generationen zeichnen sich meist durch nicht-demontagegerechtes Produktdesign aus. Dies betrifft unter anderem Klebeverbindungen, die z. T. eine zerstörende Demontage notwendig machen aber auch eine Vielzahl von unterschiedlichen Schraubverbindungen und anderen Verbindungselementen. Dadurch erforderliche häufige Werkzeugwechsel resultieren in einer vermeidbaren Verlängerung der Demontagezeit. Ebenfalls ist bei diversen Batteriesystemen die Zugänglichkeit erschwert – zum Teil müssen die schweren Batteriesysteme mehrfach gewendet werden. Um die ergonomische Arbeit der Mitarbeitenden zu

ermöglichen erfordert dies wiederum die Nutzung von Hebe-, Greif- und Haltehilfen. Je nach Ausführung dieser Hilfen ist deren Kapazität begrenzt und Mitarbeitende müssen evtl. warten, bis das Gerät verfügbar ist.

Um eine zielgerichtete Demontage zu garantieren, wird daher empfohlen, Ansätze des **Design for Recycling** in das Produktdesign künftiger Batteriegenerationen einfließen zu lassen. Dies erhöht die Wirtschaftlichkeit von Demontagevorgängen und resultiert in einer Senkung der Entsorgungskosten von EoL-Batteriesystemen. Produktentwickler sollten dazu mit Recyclingunternehmen in Kontakt treten, um von deren weitreichenden Erfahrungen profitieren zu können. Diese hatten trotz derzeit geringer Rückläufermengen Gelegenheit verschiedenste Systeme von unterschiedlichen Herstellern zu demontieren und können so einen umfassenden Überblick über mögliche Hemmnisse und Enabler geben.

Design for Remanufacturing erleichtert die Aufarbeitung von Produkten. Es entsteht ein Markt, der neben der Wieder- oder Weiterverwendung von Produkten das selbige auch für einzelne Komponenten ermöglicht. Für Batteriehersteller bietet sich das Potential weitreichende After-Sales-Geschäftsfelder zu erschließen. Die Gesamtabfallmenge wird durch die Aufarbeitung und anschließende kaskadenartige Nutzung der Produkte signifikant reduziert.

Gleichzeitig sollte geprüft werden, inwiefern die Ausarbeitung von **Normen/Standards oder gesetzlichen Vorgaben** diese Entwicklung unterstützen kann. Das Inverkehrbringen von glaubhaften und transparenten Zertifikaten hinsichtlich der Kreislaufführbarkeit von Batteriesystemen kann in Anbetracht der stark steigenden Anzahl umweltbewusster Konsumenten ein wichtiges Kommunikationsmedium sein.

9.2 Standardisierung & Digitalisierung

Handlungsempfehlungen	Adressat						Ebene			
	Batteriehersteller	Fahrzeughersteller	2nd-Use-Anwender	Recycler	Forschung	Verbände/NGOs	Öffentliche Hand	Technisch	Organisatorisch	Regulatorisch
Normen/Standards (einheitl. Produktdesign)	x				x	x	x	x		x
Demontageanleitungen (Standardisierung des jeweiligen Zerlegevorgangs)	x	x						x	x	
Digitalisierung des Demontageprozesses				x	x			x	x	
Traceability Konzepte (Informationsabruf)	x	x			x				x	

Die hohe Vielfalt der im Umlauf befindlichen hersteller- und modellspezifischen Batterietypen erschwert den standardisierten Umgang mit EoL-Batterie im Rahmen einer automatisierten Demontage. Der Einsatz unterschiedlicher Produktgenerationen von Batterietypen für ein und dasselbe Fahrzeugmodell erhöht die Variantenvielfalt bei EoL-Batterien zusätzlich. Neben verschiedenen Batterietypen für verschiedene Fahrzeugmodelle wird die Variantenvielfalt durch

unterschiedliche Generationen ein und desselben Batterietyps weiter erhöht. Änderungen im strukturellen Aufbau bzw. der Anordnung der Komponenten erschweren den Übertrag entwickelter Prozesse für die Demontage und die Etablierung standardisierter oder (teil-)automatisierter Abläufe. Durch „Ausprobieren“ wird vielmehr bei jedem bis dato unbekanntem Batterietyp ein spezifischer Demontageprozess definiert. Die Identifikation eines Best-Practices durch diese Herangehensweise wird oftmals erst nach der Zerlegung mehrerer Batterien des gleichen Typs möglich. Angenommen der ideale Demontagevorgang ist identifiziert, muss dieser den Mitarbeitenden direkt bei Annahme des jeweiligen Batteriesystems geläufig sein. Bei bereits heute großer und in Zukunft stark ansteigender Heterogenität der erwarteten Rückläufer ist dies durchaus als kritisch anzusehen.

Es wird daher, wie ebenfalls bereits in Abschnitt 9.1 empfohlen, vorgeschlagen herstellerunabhängige **Normen/Standards** zum einheitlicheren Produktdesign von Batteriesystemen einzuführen. Dies umfasst neben der Zugänglichkeit und Entnahmefähigkeit der Komponenten einheitliche Verbindungstechnik etc. Diese Standards erleichtern die Definition von allgemeingültigen Demontageprozessen. Aufgabe von Forschung und Industrie ist dabei trotz struktureller Vereinheitlichung die Integration von Unique Selling Points zu ermöglichen und die technische Weiterentwicklung der Systeme nicht zu behindern.

Eine weitere Möglichkeit ist zunächst die Erarbeitung und schließlich die Weitergabe von **Demontageanleitungen** an Recyclingunternehmen bzw. Second-Use-Anwender für die jeweils anfallenden Batterietypen. Durch die **Digitalisierung des Demontageprozesses** könnten diese bspw. Schritt für Schritt auf Tablets oder anderen digitalen Endgeräten angezeigt werden und so eine optimale Demontagerihenfolge garantieren. Denkbar ist in diesem Zuge auch die Einbindung von Augmented-Reality-Technologien um Abläufe weiter zu vereinfachen und intuitiver zu gestalten, und somit Durchlaufzeiten zu verringern. Entsprechende Konzepte, beispielsweise mit Markierung der jeweils notwendigen Werkzeuge, existieren bereits in anderen Branchen. Möglich wäre hierbei der Abruf der entsprechenden Demontageanleitung (oder anderer produktspezifischer Informationen) durch diverse **Traceability Konzepte** - bspw. den Scan eines auf dem Batteriesystem angebrachten QR-Codes. Beispielsweise könnte die dort hinterlegte Materialzusammensetzung bereits im Voraus Aufschluss über die Rentabilität des Recyclings geben. Weiterhin kann auf spezielle potentielle Gefahrenstellen hingewiesen werden. Generell sollten zumindest die Informationen über Hersteller, Batterietyp, Nennleistung und -spannung, Herstellungsdatum sowie Zelltechnologie bereitgestellt werden. In China entspricht eine entsprechende Informationsweitergabe über die Wertschöpfungskette hiwnege bereits dem gesetzlichen Standard (vgl. Abschnitt 4.3). Weiterhin muss durch Siegel o.ä. gewährleistet werden, dass auf den ersten Blick erkennbar ist, ob an einer Batterie vom Hersteller nicht autorisierte Reparaturen durchgeführt wurden. Diese stellen wiederum ein potentiellles Sicherheitsrisiko für die demontierenden Mitarbeitenden dar.

9.3 Detaillierte SoH-Bewertung und strategische Weiternutzung

Handlungsempfehlungen	Adressat							Ebene	
	Batteriehersteller	Fahrzeughersteller	2nd-Use-Anwender	Recycler	Forschung	Verbände/NGOs	Öffentliche Hand	Technisch	Organisatorisch Regulatorisch
Weitergabe von Nutzungsdaten (Ermöglichung Auslesung BMS für Partnerunternehmen)	x	x						x	x
Interdisziplinäre Zusammenarbeit der beteiligten Industrie	x	x	x	x					x

Insbesondere für Second-Use-Anwender ist eine detaillierte Analyse des State of Health der einzelnen Batteriesysteme und gegebenenfalls einzelner Zellen elementar wichtig. Je detaillierter diese Analyse stattfindet, desto feingranularer können Komponenten in die Kategorien „wieder-/weiterverwendbar“ und „recyclbar“ eingeteilt werden. So wird bspw. ein Austausch defekter Komponenten auf Modulebene (und in künftigen Batterieregenerationen sogar auf Zellebene) stark vereinfacht, sofern eine aufwandsarme Identifikation ebendieser ermöglicht wird.

Zahlreiche für diese Analyse erforderliche Informationen liegen bereits im Batteriemanagementsystem vor. Die **Weitergabe dieser Nutzungsdaten** ist derzeit jedoch vom Großteil der Batterie-/Fahrzeughersteller nicht vorgesehen. Ein eingeschränkter aber standardisierter Zugriff Dritter auf selektive, im Batteriemanagementsystem gespeicherte, Kennwerte bietet daher die Möglichkeiten Analysen und Bewertungen zu beschleunigen. Die dadurch entstehenden Vorteile beim Umgang mit EoL-Batteriesystemen sind gegen die Interessen der Hersteller zum Schutz von geistigem Eigentum sowie potentiellen entstehenden Sicherheitsrisiken durch Manipulation abzuwägen. Entsprechende Zertifizierung der aufarbeitenden Unternehmen sowie Zugangsbeschränkungen auf die standardisierte Schnittstelle sind Möglichkeiten solche Sicherheitsbedenken auszuräumen. Um das Auslesen digitaler Informationen praktikabel zu machen, wird eine standardisierte Hardware-Schnittstelle empfohlen. Ebenso sollten standardisierte Prüfkonzepte zur Bewertung des State of Health entwickelt und angewendet werden.

Die **interdisziplinäre Zusammenarbeit der beteiligten Industrie** sollte hierbei angestrebt werden um Art und Umfang des notwendigen selektiven Zugriffs zu definieren. Auch für Recyclingunternehmen bietet diese Art der Informationsweitergabe Vorteile, da bereits vor Beginn des Zerlegeprozesses Rückschlüsse auf mögliche Beschädigungen durch unsachgemäße Behandlung getroffen werden können. Somit wird die Sicherheit des Personals erhöht.

9.4 Definition von Reuse-/Remanufacturing-Anwendungsfällen

Handlungsempfehlungen	Adressat						Ebene			
	Batteriehersteller	Fahrzeughersteller	2nd-Use-Anwender	Recycler	Forschung	Verbände/NGOs	Öffentliche Hand	Technisch	Organisatorisch	Regulatorisch
Klärung der Garantieübernahme/Produkthaftung	x	x	x	x			x		x	x
Prüfung/Anpassung Regulatorik um Second-Use zu fördern							x			x

Neben technologischen Schwierigkeiten verhindern derzeit insbesondere unklare regulatorische Anforderungen an wieder- und weiterverwendete Batteriespeicher eine breite Anwendung von Reuse-/Remanufacturing-Anwendungsfällen.

Entsprechende Fragestellungen betreffen insbesondere die **Garantieübernahme/ Produkthaftung bei recycelten Materialien und Reuse-Systemen**. So müssen bspw. die Zuständigkeiten bei, durch das wiederaufgearbeitete Batteriesystem ausgelöste, Schäden geklärt werden. Dies schließt versicherungsrechtliche Aspekte mit ein. Hinzu kommen Unklarheiten hinsichtlich Leistungs- und Sicherheitsstandards. Die Verantwortlichkeiten müssen hier eindeutig zugeordnet werden, während wirtschaftliche Geschäftsmodelle sowohl für Batteriehersteller, -aufbereiter und Second-Use-Anwender realisierbar bleiben bzw. ermöglicht werden müssen. Durch das Schaffen klarer Rahmenbedingungen können sowohl Risikoabschätzung als auch Wirtschaftlichkeitsbewertung von Second-Use Anwendungen stark vereinfacht werden. Die Ausarbeitung und Detaillierung von rechtlichen Vorgaben wird dabei in enger Zusammenarbeit mit der Industrie empfohlen.

Neben dem Beschluss neuer Regularien sollten in diesem Zuge auch vorhandene, auf die Themenstellung Einfluss nehmende **Regularien überprüft und eventuell angepasst** werden. So ist derzeit bspw. unklar, ob laut Kreislaufwirtschaftsgesetz zur Weiterverwendung vorgesehene Fahrzeugbatterien zwischenzeitlich als Abfall deklariert werden müssen oder nicht. Eine entsprechende Klassifizierung würde die Notwendigkeit einer Zertifizierung der Remanufacturer als Entsorgungsfachbetrieb nach sich ziehen [19]. Im selben Zuge sind außerdem den Transport der gebrauchten Batteriesysteme betreffende Aspekte zu nennen. Die notwendige Prüfung solcher Systeme um die Transportfähigkeit zu bestimmen ist derzeit nicht eindeutig geregelt. Eine entsprechende Regulierung ist jedoch anzustreben, da auch von (teilweise) entladenen Batteriesystemen ein Gefahrenpotential ausgeht. Klare rechtliche Vorgaben werden als wirksames Instrument zur Befähigung der Industrie zur Kreislaufführung von Produkten angesehen. Die derzeit herrschende Unklarheit stellt ein Risiko für Anwender und Anbieter gleichermaßen dar.

9.5 Höhere ökologische Gutschriften durch effizientere Recyclingprozesse

Handlungsempfehlungen	Adressat						Ebene			
	Batteriehersteller	Fahrzeughersteller	2nd-Use-Anwender	Recycler	Forschung	Verbände/NGOs	Öffentliche Hand	Technisch	Organisatorisch	Regulatorisch
Verringerung des notwendigen Energieeinsatzes (Pyro)				x	x			x		
Verringerung der direkten Emissionen (Pyro)				x	x			x		
Verringerung des Hilfs- & Betriebsstoffeinsatzes (Hydro)				x	x			x		
Erhöhung der Energie-/ Materialeffizienz der Recyclingverfahren				x	x			x		

Die in dieser Untersuchung durchgeführte ökologische Bilanzierung zweier verschiedener Recyclingpfade für EoL-Batteriesysteme verdeutlicht, dass unter den getroffenen Annahmen derzeit ein Batterierecycling bei Betrachtung ökologischer Aspekte nur bedingt wirkungsvoll ist. Dabei muss angemerkt werden, dass es sich dabei um generische Prozesse handelt, die auf Basis von verfügbaren Literaturwerten definiert wurden. Zwar sind beide Prozesse potentiell durchführbar und mit nachvollziehbaren Daten hinterlegt, doch entspricht keiner der beiden im Detail einem derzeit im industriellen Maßstab angewendeten Prozess. Lediglich die generellen Prozessrouten einer hydrometallurgischen und einer pyrometallurgischen stofflichen Verwertung von EoL-Batteriesystemen finden Anwendung. Es wird somit zwar ein Überblick generiert und eine Ersteinschätzung ermöglicht – die Autor*innen distanzieren sich jedoch von Rückschlüssen auf etwaige konkrete Industrieunternehmen und deren spezifische Prozesse.

Die Analyse der ökologischen Bilanzierung des pyrometallurgischen Prozesses zeigt den enormen Beitrag der großen extern bezogenen Strommenge sowie der im Verbrennungsprozess entstehenden direkten Emissionen zur Gesamtsumme der Treibhausgasäquivalente auf. Um eine CO₂e-Gutschrift im pyrometallurgischen Batterierecycling zu erreichen, wird daher dringend die Erhöhung der Energieeffizienz des pyrometallurgischen Ofens empfohlen. Neben der **Verringerung des notwendigen Energieeinsatzes** ist auch die Erhöhung der derzeit vergleichsweise geringen Materialausbeute pro eingesetzter Energie denkbar. Weiter bietet der Bezug von Ökostrom oder die Nutzung von vor Ort umgewandelter erneuerbarer Energie großes Potential, die ökologische Bilanz des Prozesses zu verbessern. Ebenfalls ist die **Verringerung der direkten Emissionen** des Ofenprozesses wünschenswert. Direkte Emissionen können u.a. durch nachgeschaltete end-of pipe Gasreinigungsprozesse verringert werden. Im industriellen Umfeld finden solche Technologien im Batterierecycling z. T. bereits Anwendung.

Während der Energieeinsatz bei der hydrometallurgischen Verwertung vergleichsweise geringer ist, entstehen signifikante Umweltwirkungen durch den Einsatz großer Mengen an Hilfs- und Betriebsstoffen. Eine **Verringerung des Hilfs- und Betriebsstoffeinsatzes** wird entsprechend empfohlen. So tragen unter den im Modell getroffenen Annahmen vor allem die vorgeschalteten

Lieferketten der folgenden Stoffe in abnehmender Größenordnung zur Klimabilanz des hydrometallurgischen Prozesses bei: Natriumhydroxid, Wasserstoffperoxid und Ammoniak.

Letztlich bietet die generelle **Erhöhung der Energie-/ Materialeffizienz** wirksame Möglichkeiten die Klimabilanz der analysierten Prozesse zu verbessern. Die Einbringung an Hilfsstoffen und Energie je rezyklierter Mengeneinheit erhöht bei der ökologischen Bilanzierung durch die jeweils vorgeschaltete Lieferkette die sich im Laufe des Prozesses summierenden Treibhausgasemissionen. Die ökologische Bilanzierung in Abschnitt 8 identifiziert große Hebel im Bereich Energieeffizienz (Fokus Pyrometallurgische Prozessierung) und Materialeffizienz (Fokus Hydrometallurgische Prozessierung). Durch eine Steigerung der Rückgewinnungsquoten der einzelnen Batterierohstoffe erhöhen sich unter den in dieser Untersuchung angewendeten Bilanzierungsregeln gleichermaßen die jeweiligen Gutschriften für die wiedergewonnen Materialien.

9.6 Steigerung der Rentabilität derzeitiger Recyclingprozesse

Handlungsempfehlungen	Adressat						Ebene			
	Batteriehersteller	Fahrzeughersteller	2nd-Use-Anwender	Recycler	Forschung	Verbände/NGOs	Öffentliche Hand	Technisch	Organisatorisch	Regulatorisch
Erhöhung der Recyclingeffizienz durch Weiterentwicklung metallurgischer Prozesse				x	x			x		
Entwicklung von Prozessen um Battery-grade Materialien aus der schwarzen Masse zu extrahieren				x	x			x		
Sicherstellung der Materialreinheit bei der Rückgewinnung				x	x			x		
Strategische Ausrichtung: Potentielle Erschwerung Rentabilität durch zu erwartende Entwicklung zu nickelreichen Kathoden				x					x	
Interdisziplinärer Austausch: Industrie und öffentliche Hand (Erarbeitung pot. notwendiger Subventionsprogramme)	x	x	x	x			x		x	

Derzeitig angewendete Recyclingprozesse rentieren sich zum Teil nicht, sofern der Wert der wiedergewonnenen Materialien als monetärer Benefit gewertet wird. Ein wirtschaftliches Recycling wird z. T. nur durch die Erhebung von Entsorgungsgebühren und/oder die Einbindung des Batterierecyclings in etablierte Recyclingprozesse für andere Wertstoffe sowie die Nutzung von Synergieeffekten mit anderen Industrien (bspw. Abwärme) möglich. Hinzu kommt der Unsicherheitsfaktor der künftigen Preisentwicklung der rückgewonnenen Batteriematerialien. Sinkende Rohstoffpreise bergen die Gefahr zuvor rentable Prozesse obsolet zu machen. Die Wirtschaftlichkeit von Recyclingprozessen muss entsprechend erhöht werden um Batterierecycling auch unter Erwartung der Änderung vorherrschender Zellchemien und somit der Materialzusammensetzung zu fördern. Ansonsten müssen recyclingbedingte Mehrkosten durch steigende Verkaufspreise oder aber Subventionen o.ä. aufgefangen werden.

Neben der Verbesserung der ökologischen Bilanz geht eine **Erhöhung der Recyclingeffizienzen durch eine Weiterentwicklung der metallurgischen Prozesse** ebenfalls mit einer Erhöhung der

Rentabilität der Prozesse einher. So entstehen bspw. durch die Nutzung der im pyrometallurgischen Prozess entstehenden Schlacke im Straßenbau keine weitreichenden Kosten, doch gehen z. T. wertvolle Stoffe nahezu unwiederbringlich verloren. Die große Menge von knapp 370 kg Schlacke bei Einbringung von 1.000 kg EoL-Batteriesystemen (+ Hilfsstoffe) verdeutlicht dieses Potential. Weiteres Beispiel sind niedrige bis nicht vorhandene Rückgewinnungsquoten für Lithium und Elektrolyte.

In den Expert*inneninterviews explizit benannt wurde die Notwendigkeit zur **Entwicklung von Prozessen um Battery-grade Materialien aus der schwarzen Masse zu extrahieren**. Diese gehen in den meisten derzeit angewandten Recyclingprozessen verloren bzw. können nicht extrahiert werden.

Während die Materialreinheit der wiedergewonnenen Materialien in dieser Untersuchung nicht im Detail betrachtet wurde, wird hierin ein großes Potential gesehen um die Rentabilität der Recyclingprozesse weiter zu steigern. Eine Weiterentwicklung einzelner Prozesse sollte entsprechend neben der Erhöhung der Wiedergewinnungsquoten ebenfalls eine **hohe Materialreinheit sicherstellen**. Eine Weiterentwicklung der bestehenden Prozesse ist unabdingbar um eine wirtschaftliche Perspektive im Bereich des Recyclings von Traktionsbatterien zu bieten.

Die Notwendigkeit der zuvor benannten Handlungsempfehlungen wird insbesondere deutlich, sofern die zu erwartende **Entwicklung hin zu nickelreichen Kathodenzusammensetzungen** berücksichtigt wird. Trotz enormer Preisvolatilität lag der Kobaltpreis innerhalb der vergangenen drei Jahre stetig signifikant über dem Nickelpreis [232, 233]. Geschäftsmodelle von Recyclern müssen die Verringerung des Kobaltanteils in Batteriesystemen frühzeitig in der **strategischen Ausrichtung** ihrer Geschäftstätigkeit einbeziehen.

Gleichzeitig muss ein verstärkter **interdisziplinärer Austausch** zwischen den einzelnen industriellen Stakeholdern stattfinden um wirksame Geschäftsmodelle zu identifizieren. Durch die Verstrickung der einzelnen Parteien insbesondere in Sachen Rückführung der Systeme, Herstellerverantwortung aber auch Rohstoffbedarf für neue Batteriesysteme, ist eine Zusammenarbeit unabdingbar und zielführend. Auch mit Blick auf potentiell aufkommende bzw. sich verschärfende Regularien sind Strategien zur Realisierung ökologisch notwendiger und wirtschaftlich sinnvoller Kreislaufstrategien zu entwickeln. Ebenfalls basierend auf einem interdisziplinären Austausch muss die Notwendigkeit von Subventionsprogrammen zur Förderung der Kreislaufführung von Batteriesystemen geprüft werden. Dies ist insbesondere als zusätzlicher Schritt zu sehen, sollten bei der Identifikation rentabler Geschäftsmodelle keine Fortschritte erzielt werden oder seitens der Politik ein schneller Markthochlauf gewünscht sein.

9.7 Steigerung der Recyclingkapazitäten

Handlungsempfehlungen	Adressat						Ebene			
	Batteriehersteller	Fahrzeughersteller	2nd-Use-Anwender	Recycler	Forschung	Verbände/NGOs	Öffentliche Hand	Technisch	Organisatorisch	Regulatorisch
Erarbeitung von Automatisierungskonzepten der Demontageprozesse				x	x			x		
Erarbeitung von Logistikkonzepten zur regelkonformen und aufwandsarmen Rückführung von EoL-Batteriesystemen	x	x	x	x	x			x	x	
Prüfung: Aufbau & Betrieb dezentrale vs. zentrale Sammelnetzwerke	x	x	x	x	x				x	
Gezielte Befähigung von Facharbeiter*innen im Bereich Batteriedemontage/-recycling	x	x	x	x		x	x		x	

Insbesondere die bei beiden analysierten Recyclingprozessen notwendige Demontage des Batteriesystems stellt ein mögliches Bottleneck bei stark ansteigenden Rücklaufmengen dar. Diese wird derzeit händisch durchgeführt. Eine Automatisierung bzw. Teilautomatisierung dieses Teilprozesses ist daher notwendig um geringere Durchlaufzeiten zu ermöglichen. Die derzeit geringen Rücklaufmengen rechtfertigen in diesem Hinblick noch keine hohen Investitionen, doch ist ein signifikanter Anstieg absehbar. Daher sollten frühzeitig mögliche **Automatisierungskonzepte erarbeitet** werden. Zuvor genannte Hemmnisse bzgl. des Produktdesigns und heterogener Batteriesysteme stellen auch hierfür Schwierigkeiten dar, die von Forschung und Industrie adressiert werden sollten. Im selben Zuge muss auch die restliche Infrastruktur der Recyclingunternehmen skaliert werden. Um diese Entwicklung rechtzeitig anzustoßen, kann und sollte auf Prognosemodelle zurückgegriffen werden. Die vorliegende Untersuchung bietet für den Betrachtungsrahmen Baden-Württemberg eine erste Datenbasis. Die Entwicklung von flexiblen, skalierbaren und potentiell dezentral installierbaren Prozessen erleichtert Überlegungen bzgl. künftiger Recyclinginfrastruktur.

Außerdem müssen tragfähige **Logistikkonzepte zur regelkonformen und aufwandsarmen Rückführung von EoL-Batteriesystemen erarbeitet** werden. Derzeit sind nur wenige Unternehmen befähigt, insbesondere beschädigte Batteriesysteme zu transportieren. Die gesetzlichen Vorgaben hierzu sollten überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Gleichzeitig sollten Forschung und Industrie gemeinsam sichere, regelkonforme und gleichzeitig aufwandsarme Transportmechanismen entwickeln um den Markteinstieg zu vereinfachen bzw. die Rentabilität bestehender Marktteilnehmer zu erhöhen.

In diesem Zuge sollten ebenfalls verschiedene Rückführungskonzepte analysiert werden. Ebenfalls durch Anwendung zeitlich und räumlich aufgelöster Prognosemodelle sollte der **Aufbau und Betrieb dezentraler Sammelnetzwerke gegen einen zentralen Ansatz verglichen werden**.

Ansteigende Rückläufermengen erhöhen zudem den Personalbedarf im Recyclingsektor. Entsprechend wird die frühzeitige **gezielte Befähigung von Facharbeiter*innen im Bereich Batteriedemontage/-recycling** empfohlen. Neben Bedarf für Facharbeiter*innen im Bereich der nicht zu automatisierenden Prozessschritte werden im kurz- bis mittelfristigen Zeitrahmen

qualifizierte Personen zur Planung und Umsetzung von Rückführungsnetzwerken benötigt. Weiterer Personalbedarf entsteht beispielsweise im Bereich der Erarbeitung und Umsetzung neuer Geschäftsmodelle bei den Batterie- und Fahrzeugherstellern aber auch bei den Second-Use-Anwendern und Recyclingunternehmen. Neben internen Fort- und Weiterbildungsprogrammen der jeweiligen Unternehmen können hierzu auch öffentliche Projekte wie bspw. die Zukunftswerkstatt 4.0 des Strategiedialogs Automobilwirtschaft BW wertvolle Beiträge leisten. Die Einbindung von Themen der Kreislaufführung von Traktionsbatterien in solche bestehende Programme oder die Etablierung weiterer Projekte mit dem entsprechenden thematischen Fokus wird empfohlen.

9.8 Schließen des Materialkreislaufs

Handlungsempfehlungen	Adressat							Ebene		
	Batteriehersteller	Fahrzeughersteller	2nd-Use-Anwender	Recycler	Forschung	Verbände/NGOs	Öffentliche Hand	Technisch	Organisatorisch	Regulatorisch
Erarbeitung von Geschäftsmodellen zur Rückführung von EoL-Batteriesystemen	x	x	x	x					x	
Festlegung von Eigentumsfragen und Verantwortlichkeiten über gesamten Produktlebenszyklus	x	x	x				x		x	x
Klärung von praktikablen Zuständigkeiten bzgl. Rückführung beschädigter Batterien	x	x					x		x	x

Ein Schwund von EoL-Batteriesystemen aus dem nationalen/regionalen Materialkreislauf birgt die Gefahr des Abflusses von z. T. wirtschaftsstrategischen Rohstoffen aus Deutschland. Ein möglicher Mechanismus der zu diesem Schwund führen kann ist der Gebrauchtwagenmarkt. Eine Konsequenz hieraus kann zudem die unsachgemäße Entsorgung oder aber informelles Recycling in Drittländern anstelle einer Prozessierung in professionellen Recyclingunternehmen sein. Wertvolle Batterierohstoffe gehen so verloren. Weiterhin können sich hieraus negative Auswirkungen auf Mensch und Natur ergeben.

Bereits Batterie- und Fahrzeughersteller haben die Möglichkeit dieser Entwicklung entgegenzuwirken. Durch die **Erarbeitung von neuartigen Geschäftsmodellen zur Rückführung von EoL-Batteriesystemen** kann der Verbleib der Systeme und somit der Materialien im Rohstoffkreislauf gefördert werden. Pfandsysteme und Leasingmodelle fördern bzw. gewährleisten die Rückführung von EoL-Batteriesystemen zu den Herstellern bzw. zu möglichen Vertragspartnern aus dem Bereich Recycling/Remanufacturing. Die Wahl der Pfandhöhe ist hierbei als Balanceakt zu verstehen. Während sie ausreichend hoch sein muss, um eine Motivation zur Rückführung darzustellen, führt ein zu hohes Pfand möglicherweise zu einem für den/die Konsument*in inakzeptablen Preisanstieg des Batteriesystems.

Durch die **Festlegung von Eigentumsfragen und Verantwortlichkeiten über den gesamten Produktlebenszyklus** hinaus, kann eine solche Entwicklung von der öffentlichen Hand gefördert werden. Die Einführung verbindlicherer und höherer Sammelquoten (nach derzeit geltendem BattG:

45 %) und die Benennung diesbezüglicher Verantwortlichkeiten wird mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Weiterentwicklung der Geschäftsmodelle nach zuvor benannten Gesichtspunkten führen. Dies betrifft ebenfalls die **Klärung von praktikablen Zuständigkeiten bzgl. der Rückführung beschädigter Batterien**. Insbesondere Endverbraucher stehen vor organisatorischen Problemen bzgl. der Rückführungslogistik (vgl. Hemmnis #7). Eine praktikable Festlegung und Überwachung der Verantwortlichkeiten gewährleistet in diesem Hinblick Sicherheit sowohl bzgl. des Transports als auch des Verbleibs im Materialkreislauf.

9.9 Anreize für eine umfassende und effiziente Kreislaufführung

Handlungsempfehlungen	Adressat						Ebene			
	Batteriehersteller	Fahrzeughersteller	2nd-Use-Anwender	Recycler	Forschung	Verbände/NGOs	Öffentliche Hand	Technisch	Organisatorisch	Regulatorisch
Erhöhung der angesetzten Sammel- und Recyclingquoten							x			x
Ausweitung der Quotenziele auf Industriebatterien							x			x

Die derzeitige geforderte Recyclingquote von 50 % kann oft bereits mit der Verwertung des Gehäuses und der Verkabelung der Fahrzeugtraktionsbatterien erreicht werden kann [54]. Insbesondere fehlen spezifische Ziele für Industriebatterien, zu denen die Traktionsbatterien zählen, die zudem im Gegensatz zu Gerätebatterien nicht statistisch erfasst werden. Das erschwert die Beurteilung der tatsächlichen Recyclingsituation im Bereich der Fahrzeugtraktionsbatterien. Als Bauteile von Fahrzeugen unterliegen die Traktionsbatterien zudem der Altfahrzeugrichtlinie und werden im ersten Schritt der Fahrzeugentsorgung demontiert. Die weitere Entsorgung der Batterien unterliegt der Altbatterie-Verordnung. Zwar legt die Altfahrzeugrichtlinie auch Recyclingquoten fest. Allerdings wird die Recyclingeffizienz der Fahrzeugbatterien nicht der Altfahrzeug-Recyclingquote angerechnet [55].

Empfehlung an die öffentliche Hand ist daher die Überarbeitung der genannten Regularien und die Schaffung einer transparenten Rechtsgrundlage. Dies sollte nach Möglichkeit in Übereinstimmung mit entsprechenden EU-Vorgaben geschehen (eine Novelle der derzeit geltenden Europäischen Richtlinie zu Batterien und Akkumulatoren ist in Planung).

10 Literaturverzeichnis

- [1] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M.P., and Hultink, E. J. 2017. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production* 143, 757–768.
- [2] Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D., and Heinz, M. 2015. How Circular is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. *Journal of Industrial Ecology* 19, 5, 765–777.
- [3] Wilts, H. and Gries, N. von. 2017. Der schwere Weg zur Kreislaufwirtschaft. *GWP* 66, 1, 23–28.
- [4] Ellen MacArthur Foundation. 2015. *Towards the Circular Economy. Economic and business rationale for an accelerated transition*, London.
- [5] Reike, D., Vermeulen, W. J.V., and 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.
- [6] Shu, L. H. and Flowers, W. C. 1999. Application of a design-for-remanufacture framework to the selection of product life-cycle fastening and joining methods. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 15, 3, 179–190.
- [7] Sundin, E. 2004. *Product and process design for successful remanufacturing*. Zugl.: Linköping, Univ., Diss., 2004. Linköping studies in science and technology Dissertation 906. Univ, Linköping.
- [8] Umicore AG, Daimler AG, Öko-Institut, TU Clausthal. 2011. *Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge. Abschlussbericht im Rahmen des FUE-Programms "Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität" an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*, Hanau.
- [9] Bobba, S., Mathieux, F., and Blengini, G. A. 2019. How will second-use of batteries affect stocks and flows in the EU? A model for traction Li-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling* 145, 279–291.
- [10] Redelbach, M. 2016. *Entwicklung eines dynamischen nutzenbasierten Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktentwicklung für alternative PKW-Antriebskonzepte*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [11] van den Adel, B. and Klötzke, M. 2018. *Meta-analysis of new passenger car registrations scenarios*. EVS31, Kobe, Japan.
- [12] Meeus, M. 2018. *Overview of Battery Cell Technologies*. European Battery Cell R&I Workshop, Brussels.
- [13] Buchert, M., Jenseit, W., Merz, C., and Schüler, D. 2011. *Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LiBRi. Teilprojekt: LCA der Recyclingverfahren*. Öko-Institut e.V., Darmstadt.
- [14] Buchert, M. and Sutter, J. 2016. *Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien*.
- [15] Kirchherr, J., Reike, D., and Hekkert, M. 2017. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling* 127, 221–232.
- [16] 2018. *Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft. Einblicke und Aussichten*.

- [17] Verein Deutscher Ingenieure. 2002. *Recyclingorientierte Produktentwicklung* ICS 03.100.40; 21.020. Beuth Verlag GmbH, Berlin ICS 03.100.40; 21.020, 2243.
- [18] 2015. *Dienstleistungsinnovationen für Elektromobilität. Märkte, Geschäftsmodelle, Kooperationen ; [DELFIN - Dienstleistungen für Elektromobilität - Förderung von Innovation und Nutzerorientierung] ; gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung ; [Laufzeit: 01.05.2013 - 31.10.2015]*. Fraunhofer-Verl., Stuttgart.
- [19] Becker, J., Beverungen, D., Winter, M., and Menne, S., Eds. 2019. *Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien. Szenarien, Dienstleistungen und Entscheidungsunterstützung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [20] Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., and Hanemaaijer, A. 2017. *Circular economy: Measuring innovation in the product chain*.
- [21] Parker, D., Riley, K., Robinson, S., Symington, H., Tewson, J., Ramkumar, S., and Peck, D. 2015. *Remanufacturing Market Study*.
- [22] Diener, D. L. and Tillman, A.-M. 2015. Component end-of-life management: Exploring opportunities and related benefits of remanufacturing and functional recycling. *Resources, Conservation and Recycling* 102, 80–93.
- [23] British Standards Institution. 2009. *Design for manufacture, assembly, disassembly and end-of-life processing (MADE). Part 2: Terms and definitions* ICS 01.100.01 ICS 01.100.01, BS 8887-2:2009.
- [24] Kampker, A. 2014. *Elektromobilproduktion*. Springer Vieweg, Berlin.
- [25] Baltac, S. and Slater, S. 2019. *Batteries on wheels: the role of battery electric cars in the EU power system and beyond*. Element Energy.
- [26] Jiao, N. 2018. *All EV batteries born after August 2018 in China will have unique IDs*. <http://www.electricvehiclesresearch.com/articles/15455/all-ev-batteries-born-after-august-2018-in-china-will-have-unique-ids>. Accessed 18 February 2020.
- [27] Zhang, H., Liu, W., Dong, Y., Zhang, H., and Chen, H. 2014. A Method for Pre-determining the Optimal Remanufacturing Point of Lithium ion Batteries. *Procedia CIRP* 15, 218–222.
- [28] Klör, B., Bräuer, S., Beverungen, D., and Monhof, M. 2015. A Domain-Specific Modeling Language for Electric Vehicle Batteries. In *Proceedings der 12. Internationalen Tagung Wirtschaftsinformatik*, 1038–1054.
- [29] 2018. *Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030*, Frankfurt am Main.
- [30] Standridge, C. R. and Hasan, M. M. 2015. Post-vehicle-application lithium-ion battery remanufacturing, repurposing and recycling capacity: Modeling and analysis. *JIEM* 8, 3.
- [31] Kampker, A., Heimes, H. H., Ordnung, M., Lienemann, C., Hollah, A., and Sarovic, N. 2016. Evaluation Of A Remanufacturing For Lithium Ion Batteries From Electric Cars.
- [32] Kampker, A., Vallée, D., and Schnettler, A., Eds. 2018. *Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Springer Vieweg, Berlin.
- [33] Bittner, P. 2020. *Zweites Leben für gebrauchte Akkus*. https://www.volkswagen.de/de/e-mobilitaet-und-id/id_magazin/elektroauto-nachhaltigkeit/zweites-leben-fuer-gebrauchte-akkus.html. Accessed 8 August 2020.
- [34] Kleine-Möllhoff, P., Benad, H., Beilard, F., Esmail, M., and Knöll, M. 2012. *Die Batterie als Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität der Zukunft. Herausforderungen - Potenziale - Ausblick*.

- [35] Treffer, F. 2011. *Abschlussbericht zum Verbundvorhaben: Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge (LiBRi)*, Hanau.
- [36] Standridge, C. R. and Corneal, L. 2014. *Remanufacturing, Repurposing, and Recycling of Post-Vehicle-Application Lithium-Ion Batteries*. Mineta National Transit Research Consortium.
- [37] Charter, M. and Gray, C. 2008. Remanufacturing and product design. *IJPD* 6, 3/4, 375.
- [38] Steinhilper, R. 1999. *Produktrecycling. Vielfachnutzen durch Mehrfachnutzung*. Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart.
- [39] Daimler AG. 2020. *Patentierte Frischzellenkur*. <https://www.daimler.com/nachhaltigkeit/lebenszyklus-batterie/nutzung-charging/remanufacturing-reportage.html>. Accessed 10 August 2020.
- [40] Dürr Systems AG. 2019. *Lösungen die verbinden. Innovative Verfahren für die Batterieverklebung*.
- [41] Bundesministerium für Bildung und Forschung. 2020. *Karliczek: Deutschland ist heute wieder „Hotspot“. 100 Millionen Euro für die Batterieforschung: BMBF fördert vier neue Batterie-Kompetenzcluster*.
- [42] Maltoni, F. 2019. Challenges and Outlook in the remanufacturing of automotive Li-Ion Batteries. In *To Elevate Automotive Remanufacturing by Innovation and Automation*, 111–132.
- [43] Heimes, H. 2019. *Return on Battery Engineering. Anforderungen aus der Automobilindustrie*, Berlin.
- [44] Paterson, D. A. P., Kao, C.-C., Ijomah, W. L., and Windmill, J. F. C. 2018. Incorporating remanufacturing into the end-of-life vehicles directive: current presence and the waste problem. *Jnl Remanufactur* 8, 1-2, 23–37.
- [45] Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L., and Anderson, P. 2019. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature* 575, 7781, 75–86.
- [46] Hanisch, C., Haselrieder, W., and Kwade, A. 2012. Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – das Projekt LithoRec. In *Recycling und Rohstoffe*. TK-Verl., Neuruppin.
- [47] 2013. *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Springer Vieweg, Berlin.
- [48] Buchert, M., Jenseit, W., Merz, C., and Schüler, D. 2011. *Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec)*. Öko-Institut e.V.
- [49] Foster, M., Isely, P., Standridge, C. R., and Hasan, M. M. 2014. Feasibility assessment of remanufacturing, repurposing, and recycling of end of vehicle application lithium-ion batteries. *JIEM* 7, 3.
- [50] Keuchel, J. 2019. Heikle Lücken bei der Entsorgung von Batterien für EAutos – Umweltbundesamt überprüft Tesla. *Handelsblatt* 2019 (Dec. 2019).
- [51] Umweltbundesamt. *BattG Melderegister*. <https://www.battg-melderegister.umweltbundesamt.de/battg/content.do>. Accessed 11 May 2020.
- [52] Öko-Institut. 2017. *Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende*. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf. Accessed 11 May 2020.

- [53] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. *Altbatterien. Statistiken: Verkäufe, Sammlung, Sammelquote*, Recyclingeffizienz und Recyclingniveau*. <https://www.bmu.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/statistik-altbatterien/>. Accessed 11 May 2020.
- [54] EU - Recycling. 2020. Die Novelle des Batteriegesetzes: Chance zum Wandel vertan? *EU-recycling – das fachmagazin für den europäischen recyclingmarkt* 37, 18–21.
- [55] Tytgat, J., Ed. 2014. *The recycling efficiency of Li-ion EV batteries according to the European Commission regulation, and the relation with the end-of-life vehicles directive recycling rate*.
- [56] Accurec. *Lithium. Lithium Batterie Recycling*. <https://accurec.de/lithium?lang=de>. Accessed 11 May 2020.
- [57] Volkswagen AG. *Lithium zu Lithium, Mangan zu Mangan*. <https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2019/02/lithium-to-lithium-manganese-to-manganese.html>. Accessed 11 May 2020.
- [58] Gardiner, J. 2017. The rise of electric cars could leave us with a big battery waste problem. *The Guardian* (Aug. 2017).
- [59] Peters, J. F., Baumann, M., and Weil, M. 2018. *Recycling aktueller und zukünftiger Batteriespeicher: Technische, ökonomische und ökologische Implikationen*. Ergebnisse des Expertenforums, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- [60] California Environmental Protection Agency. *Lithium-ion Car Battery Recycling Advisory Group*. <https://calepa.ca.gov/climate/lithium-ion-car-battery-recycling-advisory-group/>.
- [61] US Congress. 1996. *Mercury-Containing and Rechargeable Battery Management Act*.
- [62] California Environmental Protection Agency. 2019. *Background Information. Provided in Preparation for Meeting #1*. <https://calepa.ca.gov/climate/lithium-ion-car-battery-recycling-advisory-group/lithium-ion-car-battery-recycling-advisory-group-meeting-materials-11-4-19-background/>. Accessed 11 May 2020.
- [63] Velázquez-Martínez, Valio, Santasalo-Aarnio, Reuter, and Serna-Guerrero. 2019. A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. *Batteries* 5, 4, 68.
- [64] Sloop, S., Crandon, L., Allen, M., Koetje, K., Reed, L., Gaines, L., Sirisaksoontorn, W., and Lerner, M. 2020. A direct recycling case study from a lithium-ion battery recall. *Sustainable Materials and Technologies* 25, e00152.
- [65] Sloop, S. 2016. *Advances in Direct Recycling of Li-ion Batteries*. NAATBatt Recycling Workshop Ann Arbor, MI 11/30/2016, Ann Arbor, MI, USA.
- [66] American Manganese Inc. *Offizieller Webauftritt Unternehmen*. <https://americanmanganeseinc.com/>. Accessed 11 May 2020.
- [67] PRTM Management Consultants, Inc. 2011. *The China New Energy Vehicles Program - Challenges and Opportunities*. Report. The World Bank, Peking.
- [68] Zhang, L., Liu, Y., Pang, B., Sun, B., and Kokko, A. 2020. Second Use Value of China's New Energy Vehicle Battery: A View Based on Multi-Scenario Simulation. *Sustainability* 12, 1, 341.
- [69] International Energy Agency (IEA). 2019. *Global Electric Vehicle Outlook 2019*, Paris.
- [70] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). 2020. *DLR interne Datenbank*. Datensammlung, Berlin.
- [71] Asad, F. o.J. *Battery Recycling – a Tsunami of Old Cells Approaching*. The Battery Show, Stuttgart, Germany.

- [72] Nowak, O. 2019. *The Evolution of the Battery Supply Chain: Technology Trends and Bottlenecks*. Battery Experts Forum 2019, Frankfurt am Main.
- [73] Ministerium für Industrie und Informationstechnik. *Ministerium für Industrie und Informationstechnik*. *Ministerium für Industrie und Informationstechnik*. <http://www.miit.gov.cn/>. Accessed 20 February 2020.
- [74] Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2018. *Interim Measures for the Management of Recovery and Utilization of New Energy Vehicle Power Battery*. <http://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC173695>. Accessed 20 February 2020.
- [75] Liu, F. 2020. *Ministry of Industry and Information Technology: issuance and implementation of two Industry Standards for Comprehensive Utilization of waste Power batteries for New Energy vehicles*. *SMM News.Metal.com*. <https://news.metal.com/newscontent/101012455/ministry-of-industry-and-information-technology:-issuance-and-implementation-of-two-industry-standards-for-comprehensive-utilization-of-waste-power-batteries-for-new-energy-vehicles/>. Accessed 14 February 2020.
- [76] Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2017. *Interim Administrative Measures for New Energy Vehicle Power Battery Recycling and Utilization*. <http://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC153798>. Accessed 20 February 2020.
- [77] Stanway, D. 2018. *China launches pilot EV battery recycling schemes*. *Reuters.com*. <https://www.reuters.com/article/us-china-autos-batteries/china-launches-pilot-ev-battery-recycling-schemes-idUSKBN1KF375>.
- [78] An, L. 2019. *Recycling of spent lithium-ion batteries: processing methods and environmental impacts*.
- [79] Highpower International Inc. 2019. *Highpower - Power for the Future*. <https://www.highpowertech.com/>. Accessed 16 February 2020.
- [80] GEM. *Five core industrial chains. GEM - Recycling for future*. <http://en.gem.com.cn/index.php/fejjudianchiheniefeiliao/>. Accessed 16 February 2020.
- [81] GH Tech. 2019. *Offizieller Webauftritt Unternehmen. GHTECH*. <https://www.ghtech.com/Eindex.html>. Accessed 16 February 2020.
- [82] Zhu, X. and Yu, L. 2019. Screening Contract Excitation Models Involving Closed-Loop Supply Chains Under Asymmetric Information Games: A Case Study with New Energy Vehicle Power Battery. *Applied Sciences* 9, 1, 146.
- [83] Zhong, X. 2017. *A 178 million for Chinese lithium recycling*. *Energy Storage Publishing*. <https://www.bestmag.co.uk/content/178-million-chinese-lithium-recycling>.
- [84] Huayou Cobalt. 2019. *Offizieller Webauftritt Unternehmen. Huayou Cobalt*. <http://en.huayou.com/intro/33.html>. Accessed 16 February 2020.
- [85] Park, J.-m. and Chung, J. 2018. *South Korea's LG Chem to set up battery material JVs with China's Zhejiang Huayou Cobalt*. *Reuters.com*. <https://www.reuters.com/article/us-lg-chem-china/south-koreas-lg-chem-to-set-up-battery-material-jvs-with-chinas-zhejiang-huayou-cobalt-idUSKBN1HH3MI>. Accessed 16 February 2020.
- [86] Miningscout. 2018. *LG Chem und Huayou Cobalt schaffen neue Verhältnisse am Batteriemarkt für Elektromobile*. <https://www.miningscout.de/blog/2018/04/13/lg-chem-und-huayou-cobalt-schaffen-neue-verhaeltnisse-am-batteriemarkt-fuer-elektromobile/>. Accessed 16 February 2020.

- [87] Institute of Process Engineering. 2019. *Offizieller Webauftritt Institut. Chinese Academy of Sciences*. <http://english.ipe.cas.cn/>. Accessed 16 February 2020.
- [88] Sun, Z. and Lin, X. 2019. *Toward Sustainability of Spent Lithium ion Battery Recycling*, Shanghai. <http://www.ieahev.org/tasks/CRM4EV-critical-raw-material-for-electric-vehicles-task-40/>. Accessed 8 November 2019.
- [89] Gu, Y., Wu, Y., Xu, M., Mu, X., and Zuo, T. 2016. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) recycling for a sustainable resource supply in the electronics industry in China. *Journal of Cleaner Production* 127, 331–338.
- [90] Catarc. 2019. *Webauftritt "Standards" und "Science and Technology Innovation". China Automotive Technology and Research Center Co. Ltd.* http://www.catarc.ac.cn/ac_en/. Accessed 16 February 2020.
- [91] ATZ. 2017. *Netzintegration der Elektromobilität 2017: Mobilitätswandel konsequent entwickeln: 2. Internationale ATZ-Fachtagung*. Proceedings. Springer Vieweg, Wiesbaden, Germany.
- [92] Fraunhofer ITWM. 2019. *Fraunhofer ITWM schließt Kooperationsvertrag mit CATARC. Fraunhofer ITWM*. https://www.itwm.fraunhofer.de/de/presse-publikationen/presseinformationen/2019/2019_09_30_itwm_kooperation_catarc.html. Accessed 16 February 2019.
- [93] International Council on Clean Transportation. 2013. *ICCT and China Automotive Technology and Research Center announce joint research plans*. <https://theicct.org/news/icct-and-china-automotive-technology-and-research-center-announce-joint-research-plans>.
- [94] BOTREE. 2020. *Offizieller Webauftritt BOTREE. BOTREE*. <http://www.botree.tech/>. Accessed 16 February 2020.
- [95] Eduljee, G., Harrison, R. M., and Royal Society of Chemistry. 2020. *Electronic waste management*.
- [96] Zhao, G. 2017. *Reuse and recycling of lithium-ion power batteries*. John Wiley & Sons, Singapore, Hoboken, NJ.
- [97] 1991. *Act on the Promotion of Effective Utilization of Resources*. <http://www.japaneselawtranslation.go.jp/law/detail/?id=80&vm=04&re=01>. Accessed 3 March 2020.
- [98] Battery Association of Japan. 2020. *Overview of the Main Tasks of the Battery Association of Japan. Battery Association of Japan*. <http://www.baj.or.jp/e/about/maintasks.html>. Accessed 5 March 2020.
- [99] Nippon Recycle Center Corp. 2019. *Offizieller Webauftritt Unternehmen. Nippon Recycle Center Corp.* <https://www.recycle21.co.jp/recycle-e/>. Accessed 29 February 2020.
- [100] Tasaki, T. 2014. *The Recycling Scheme for Compact Rechargeable Batteries in Japan - under the Act on the Promotion of Effective Utilization of Resources*. National Institute of Environmental Studies. https://www.oecd.org/environment/waste/EPR_Japan_battery.pdf. Accessed 25 February 2020.
- [101] Ministry of Economy, Trade and Industry. *Law for the Recycling of End-of-Life Vehicles*. <https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/english/law/end.html>.
- [102] 3R Corporation. 2014. *Japanese Automobile Recycling Law. 3R Corporation*. https://www.3-r.co.jp/contents/en/en_recycle.html. Accessed 3 March 2020.
- [103] Togawa, K. 2015. Current Status of Japan's Automobile Recycling System. In.

- [104] Hiratsuka, J., Sato, N., and Yoshida, H. 2014. Current status and future perspectives in end-of-life vehicle recycling in Japan. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 16, 1, 21–30.
- [105] González, M. 2019. *Japan Steps Up Efforts to Recycle Electric Car Batteries & Gives E Waste Industry a Boost*. ewaste-expo. <https://www.ewaste-expo.com/onboard-battery-health-indicators-could-improve-value-to-the-recycling-sector/>. Accessed 3 March 2020.
- [106] Ministry of Economy, Trade and Industry. 2019. *Offizieller Webauftritt METI. Ministry of Economy, Trade and Industry*. <https://www.meti.go.jp/english/index.html>. Accessed 3 March 2020.
- [107] JAMA. 2019. *Offizieller Webauftritt Institut. japan Automobile Manufacturers Association*. <http://www.jama-english.jp/>. Accessed 3 March 2020.
- [108] Randall, C. 2018. *Japanese car manufacturers aim to unify battery recycling*. electrife.com. <https://www.electrive.com/2018/09/06/japanese-car-manufacturers-aim-to-unify-battery-recycling/>. Accessed 20 January 2020.
- [109] Nicke, K. and Holst, G. *Batterierecycling als Beschäftigungsperspektive für die Lausitz*. Otto Brenner Stiftung.
- [110] Nissan Motor Corporation. 2018. *Nissan LEAF batteries to light up Japanese town*. <https://global.nissannews.com/en/releases/180322-01-e?source=nng&lang=en-US&la=1&downloadUrl=%2Freleases%2F180322-01-e%2Fdownload>. Accessed 3 March 2020.
- [111] Toyota. 2018. *Chubu Electric Power and Toyota to Commence Electrified Vehicle Battery Reuse and Recycling Verification Project*. <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/20929916.html>. Accessed 20 January 2020.
- [112] The Bangkok post. 2019. *Toyota group opens plant for recycling car batteries*. *The Bangkok post*. <https://www.bangkokpost.com/business/1739851/toyota-group-opens-plant-for-recycling-car-batteries>. Accessed 21 February 2020.
- [113] Casals, L. C., Amante García, B., and Canal, C. 2019. Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis. *Journal of environmental management* 232, 354–363.
- [114] Li, L., Dababneh, F., and Zhao, J. 2018. Cost-effective supply chain for electric vehicle battery remanufacturing. *Applied Energy* 226, 277–286.
- [115] Marano, V., Onori, S., Guezennec, Y., Rizzoni, G., and Madella, N. 2009 - 2009. Lithium-ion batteries life estimation for plug-in hybrid electric vehicles. In *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. IEEE, 536–543. DOI=10.1109/VPPC.2009.5289803.
- [116] Hannan, M. A., Hoque, M. M., Hussain, A., Yusof, Y., and Ker, P. J. 2018. State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations. *IEEE Access* 6, 19362–19378.
- [117] Hakimian, A., Kamarthi, S., Erbis, S., Abraham, K. M., Cullinane, T. P., and Isaacs, J. A. 2015. Economic analysis of CNT lithium-ion battery manufacturing. *Environ. Sci.: Nano* 2, 5, 463–476.
- [118] Gantenbein, S., Schönleber, M., Weiss, M., and Ivers-Tiffée, E. 2019. Capacity Fade in Lithium-Ion Batteries and Cyclic Aging over Various State-of-Charge Ranges. *Sustainability* 11, 23, 6697.

- [119] Neubauer, J. and Pesaran, A. 2011. The ability of battery second use strategies to impact plug-in electric vehicle prices and serve utility energy storage applications. *Journal of Power Sources* 196, 23, 10351–10358.
- [120] Skeete, J.-P., Wells, P., Dong, X., Heidrich, O., and Harper, G. 2020. Beyond the Event horizon: Battery waste, recycling, and sustainability in the United Kingdom electric vehicle transition. *Energy Research & Social Science* 69, 101581.
- [121] Volkswagen AG. 2019. *Neuer ID.3 und künftige ID. Modelle erhalten Batterien mit höchster Kapazität – mit acht Jahren Garantie*, Wolfsburg.
- [122] Audi AG. *Audi Garantie. Neuwagengarantie der AUDI AG*.
- [123] BMW AG. 2020. *BMW Battery Certificate für die Hochvolt-Batterie - Leistungen und Bedingungen*. https://www.bmw.de/content/dam/bmw/marketDE/bmw_de/topics/offers-and-services/warranty/pdf/iPerformance.pdf.asset.1490193419387.pdf. Accessed 18 August 2020.
- [124] BMW AG. 2020. *BMW i Battery Certificate für die Hochvolt-Batterie - Leistungen und Bedingungen*. https://www.bmw.de/content/dam/bmw/marketDE/bmw_de/topics/offers-and-services/warranty/pdf/Zertifikat%20BMW_i_BEV_Ab%2001.08.2019_final.docx%20V2.pdf. Accessed 18 August 2020.
- [125] Daimler AG. 2019. *Der Mercedes-Benz EQC: Elektrische Intelligenz*, Oslo.
- [126] CITROËN DEUTSCHLAND GmbH. *100 % Elektroantrieb. Die PKW Citroën C-Zero und E-Mehari und das Nutzfahrzeug Citroën Berlingo Electric fahren mit Elektromotor*. <https://www.citroen.de/technologie/elektroantrieb.html>. Accessed 18 August 2020.
- [127] Opel Automobile GmbH. 2020. *BATTERIEN FÜR ELEKTROAUTOS*. <https://www.opel.de/einfach-elektrisch/uebersicht/batterien-fuer-elektrofahrzeuge.html>. Accessed 18 August 2020.
- [128] Tesla Germany GmbH. 2020. *Fahrzeuggarantie*. https://www.tesla.com/de_DE/support/vehicle-warranty?redirect=no. Accessed 18 August 2020.
- [129] Barré, A., Deguilhem, B., Grolleau, S., Gérard, M., Suard, F., and Riu, D. 2013. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *Journal of Power Sources* 241, 680–689.
- [130] Liu, Q., Du, C., Shen, B., Zuo, P., Cheng, X., Ma, Y., Yin, G., and Gao, Y. 2016. Understanding undesirable anode lithium plating issues in lithium-ion batteries. *RSC Adv.* 6, 91, 88683–88700.
- [131] Kostopoulos, E. D., Spyropoulos, G. C., and Kaldellis, J. K. 2020. Real-world study for the optimal charging of electric vehicles. *Energy Reports* 6, 418–426.
- [132] Lima, P. 2018. *Battery charging: Full versus Partial*. <https://pushevs.com/2018/04/27/battery-charging-full-versus-partial/>. Accessed 3 March 2020.
- [133] Broussely, M., Biensan, P., Bonhomme, F., Blanchard, P., Herreyre, S., Nechev, K., and Staniewicz, R. J. 2005. Main aging mechanisms in Li ion batteries. *Journal of Power Sources* 146, 1-2, 90–96.
- [134] Zeng, X., Li, M., Abd El-Hady, D., Alshitari, W., Al-Bogami, A. S., Lu, J., and Amine, K. 2019. Commercialization of Lithium Battery Technologies for Electric Vehicles. *Adv. Energy Mater.* 9, 27, 1900161.
- [135] Yang, X.-G., Leng, Y., Zhang, G., Ge, S., and Wang, C.-Y. 2017. Modeling of lithium plating induced aging of lithium-ion batteries: Transition from linear to nonlinear aging. *Journal of Power Sources* 360, 28–40.

- [136] Iannuzzi, D. and Franzese, P. 2020. Ultrafast charging station for electrical vehicles: Dynamic modelling, design and control strategy. *Mathematics and Computers in Simulation*.
- [137] Schirinzi, L., Coppola, G., and Munoz, C. B. 2019 - 2019. Investment assessment over fast and ultra-fast EV charging stations with embedded electricity storage systems. In *2019 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*. IEEE, 456–463. DOI=10.1109/ICCEP.2019.8890128.
- [138] Pillot, C. 2017. *The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2016-2025*. 33rd International Battery Seminar, Fort Lauderdale.
- [139] Biemolt, J., Jungbacker, P., van Teijlingen, T., Yan, N., and Rothenberg, G. 2020. Beyond Lithium-Based Batteries. *Materials (Basel, Switzerland)* 13, 2.
- [140] Fan, E., Li, L., Wang, Z., Lin, J., Huang, Y., Yao, Y., Chen, R., and Wu, F. 2020. Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects. *Chemical reviews*.
- [141] Massé, R. C., Uchaker, E., and Cao, G. 2015. Beyond Li-ion: electrode materials for sodium- and magnesium-ion batteries. *Sci. China Mater.* 58, 9, 715–766.
- [142] Frost & Sullivan. 2020. *Emerging Innovations Enabling Cobalt-free Batteries. Fragility of the Global Cobalt Supply Chain Driving the Battery Manufacturers' Transition Towards Cobalt Free Battery Chemistries*.
- [143] Baazizi, M., Dahbi, M., Aqil, M., Ghamouss, F., and Saadoune, I. 2019 - 2019. A Ni-rich Cathode Material for Lithium-ion Batteries with Improved Safety and Cost. In *2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*. IEEE, 1–4. DOI=10.1109/IRSEC48032.2019.9078158.
- [144] Croy, J. R., Long, B. R., and Balasubramanian, M. 2019. A path toward cobalt-free lithium-ion cathodes. *Journal of Power Sources* 440, 227113.
- [145] Hsieh, I.-Y. L., Pan, M. S., Chiang, Y.-M., and Green, W. H. 2019. Learning only buys you so much: Practical limits on battery price reduction. *Applied Energy* 239, 218–224.
- [146] Schmuch, R., Wagner, R., Hörpel, G., Placke, T., and Winter, M. 2018. Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries. *Nat Energy* 3, 4, 267–278.
- [147] Andre, D., Kim, S.-J., Lamp, P., Lux, S. F., Maglia, F., Paschos, O., and Stiaszny, B. 2015. Future generations of cathode materials: an automotive industry perspective. *J. Mater. Chem. A* 3, 13, 6709–6732.
- [148] Berjoza, D. and Jurgena, I. 2017. Influence of batteries weight on electric automobile performance. In . *Engineering for Rural Development*. Latvia University of Agriculture. DOI=10.22616/ERDev2017.16.N316.
- [149] Ren, D., Yang, Y., Shen, L., Zeng, R., and Abruña, H. D. 2020. Ni-rich LiNi_{0.88}Mn_{0.06}Co_{0.06}O₂ cathode interwoven by carbon fiber with improved rate capability and stability. *Journal of Power Sources* 447, 227344.
- [150] Breiung, A. and Knosala, R. 1997. *Bewerten technischer Systeme. Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l.
- [151] Büssow, C. 2004. *Prozessbewertung in der Logistik. Kennzahlenbasierte Analysemethodik zur Steigerung der Logistikkompetenz*. Logistik-Management. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.

- [152] Koch, S. 2011. *Einführung in das Management von Geschäftsprozessen. Six Sigma, Kaizen und TQM*. Springer, Berlin.
- [153] Schott, E. and Campana, C. 2005. *Strategisches Projektmanagement*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [154] Dittmer, G. 1995. *Managen mit Methode. Instrumente für individuelle Lösungen*. Gabler Verlag, Wiesbaden.
- [155] Zangemeister, C. 2014. *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. Teilw. zugl.: Berlin, Univ., Diss., 1970. Books on Demand, Norderstedt.
- [156] Dittmer, G. 2002. *Rationales Management. Komplexität methodisch meistern ; mit 36 Tabellen*. Springer, Berlin.
- [157] Alves Dias, P., Blagoeva, D., Pavel, C. C., and Arvanitidis, N. 2018. *Cobalt. Demand-supply balances in the transition to electric mobility*. JRC science for policy report. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- [158] Europäische Union. 2006. *Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. September 2006 über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren und zur Aufhebung der Richtlinie 91/157/EWG. RL 2006/66/EG*.
- [159] Europäische Kommission. 2020. *Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0098&from=EN>. Accessed 4 March 2020.
- [160] Drabik, E. and Rizos, V. 2018. *Prospects for electric vehicle batteries in a circular economy*. CEPS.
- [161] Aydin, R., Kwong, C. K., Geda, M. W., and Okudan Kremer, G. E. 2018. Determining the optimal quantity and quality levels of used product returns for remanufacturing under multi-period and uncertain quality of returns. *Int J Adv Manuf Technol* 94, 9-12, 4401–4414.
- [162] Witek, C. 2017. *Dynamische Produktionsprogrammplanung in Closed Loop Supply Chains mit aktivem Rückflussmanagement*. Dissertation, Technische Universität Dresden.
- [163] George, M. L., Rowlands, D., Price, M., and Maxey, J. 2016. *Das Lean Six Sigma Toolbox. Mehr als 100 Werkzeuge zur Verbesserung der Prozessgeschwindigkeit und -qualität*. Management Competence. Verlag Franz Vahlen, s.l.
- [164] Idjis, H. and da Costa, P. 2017. Is Electric Vehicles Battery Recovery a Source of Cost or Profit? In *The Automobile Revolution. Towards a New Electro-Mobility Paradigm*, D. Attias, Ed. Springer International Publishing, Cham, s.l., 117–134.
- [165] Fischhaber, S., Regett, A., Schuster, S. F., and Hesse, H. 2016. *Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen. Analyse von Nachnutzungsanwendungen, ökonomischen und ökologischen Potenzialen*. Ergebnisrapport der Begleit- und Wirkungsforschung 18.
- [166] Bernhart, W. 2019. *Zukunftsmarkt Batterie-Recycling: Verpasst Europa (wieder) den Anschluss?* [https://www.rolandberger.com/de/Point-of-View/Zukunftsmarkt-Batterie-Recycling-Verpasst-Europa-\(wieder\)-den-Anschluss.html](https://www.rolandberger.com/de/Point-of-View/Zukunftsmarkt-Batterie-Recycling-Verpasst-Europa-(wieder)-den-Anschluss.html). Accessed 10 August 2020.
- [167] Groupe Renault. 2018. *GROUPE RENAULT IS LAUNCHING "ADVANCED BATTERY STORAGE", THE BIGGEST STATIONARY ENERGY STORAGE SYSTEM FROM ELECTRIC VEHICLE (EV) BATTERIES IN EUROPE*, Boulogne-Billancourt.

- [168] The Mobility House AG. 2016. *Weltweit größter 2nd-use Batteriespeicher geht ans Netz*. https://www.mobilityhouse.com/de_de/magazin/presse-meldungen/weltweit-groesster-2nd-use-batteriespeicher-geht-ans-netz.html/. Accessed 10 August 2020.
- [169] RWTH Aachen. *BatteReMan. Steigerung der Ressourceneffizienz der Lithium-Ionen-Batterien durch Remanufacturing*. <https://www.pem.rwth-aachen.de/cms/PEM/Forschung/Projekte/~kvia/BatteReMan/>. Accessed 8 August 2020.
- [170] Daimler AG. 2019. *Mercedes-Benz bezieht erstmals Batteriezellen aus CO₂-neutraler Produktion*. <https://www.daimler.com/innovation/case/electric/co2-neutral-produzierte-batteriezellen.html>. Accessed 8 August 2020.
- [171] Europäische Union. 2012. *Verordnung (EU) Nr. 493/2012 der Kommission vom 11. Juni 2012 mit Durchführungsbestimmungen zur Berechnung der Recyclingeffizienzen von Recyclingverfahren für Altbatterien und Altakkumulatoren gemäß der Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates*.
- [172] Deutscher Bundestag. 2009. *Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (Batteriegelgesetz)*. BattG.
- [173] Mathew, M., Kong, Q. H., McGrory, J., and Fowler, M. 2017. Simulation of lithium ion battery replacement in a battery pack for application in electric vehicles. *Journal of Power Sources* 349, 94–104.
- [174] Lv, W., Wang, Z., Cao, H., Sun, Y., Zhang, Y., and Sun, Z. 2018. A Critical Review and Analysis on the Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 6, 2, 1504–1521.
- [175] Schäfer, P. 2020. *Projekt forscht an automatisiertem Batterierecycling*.
- [176] Fraunhofer ISC. 2018. »AutoBatRec2020«: *Altbatterien aus E-Fahrzeugen intelligent wiederverwerten – EU fördert Forschung für ressourceneffizientes Recycling von Traktionsbatterien*. <https://www.isc.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/autobatrec2020-altbatterien-intelligent-wiederverwerten.html>.
- [177] e-mobil BW. *Datenmonitor e-mobil BW Oktober 2019*. https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Broschueren/e-mobil_Datenmonitor_Oktober_2019.pdf. Accessed 11 May 2020.
- [178] Kraftfahrtbundesamt. 2019. *FZ 1.1 Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz1_b_uebersicht.html. Accessed 11 May 2020.
- [179] Zweirad-Industrie-Verband. 2020. *Zahlen – Daten – Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland 2019*, Berlin.
- [180] Bundesregierung. 2019. *Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050*. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1>. Accessed 11 May 2020.
- [181] Europäische Union. 2019. *VERORDNUNG (EU) 2019/1242 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 20. Juni 2019 zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 595/2009 und (EU) 2018/956 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Richtlinie 96/53/EG des Rates*.

- [182] Europäische Union. 2019. *VERORDNUNG (EU) 2019/631 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. April 2019 zur Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011.*
- [183] International Council on Clean Transportation (ICCT). 2019. *CO₂ emissions from new passenger cars in the European Union: Car manufacturers' performance in 2018 (Briefing).*
- [184] European Environment Agency. 2019. *Share of transport greenhouse gas emissions.* <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/share-of-transport-ghg-emissions-2>. Accessed 11 May 2020.
- [185] McKinsey. 2020. *Electric Vehicle Index (März 2020).* <https://www.mckinsey.de/branchen/automobil-zulieferer/electric-vehicle-index>. Accessed 28 May 2020.
- [186] Kugler, U., Brokate, J., Schimeczek, C., and Schmid, S. A. 2017. *Powertrain Scenarios for Cars in European Markets to the Year 2040. 11th International Colloquium Fuels – Conventional and Future Energy for Automobiles, June 27-29.*
- [187] Mock, P. 2010. *Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21).* DOI=10.18419/OPUS-6760.
- [188] Kraftfahrtbundesamt. 2019. *FZ 5.1 Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern im Jahr 2018 nach Zulassungsbezirken und Fahrzeugklassen.* https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Zulassungsbezirke/zulassungsbezirke_node.html. Accessed 11 May 2020.
- [189] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. *Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr.* https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/energie-treibhausgaswirkungen-vernetztes-fahren.pdf?__blob=publicationFile. Accessed 11 May 2020.
- [190] Europäische Kommission. 2009. *VERORDNUNG (EG) Nr. 443/2009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen.*
- [191] Der Rat der Europäischen Union. 2013. *Informal agreement on car CO₂ emissions reduction.*
- [192] International Council on Clean Transportation. 2012. *European CO₂ Emission Performance Standards for Passenger Cars and Light Commercial Vehicles (Policy Update).* [https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT%20Policy%20Update%20EU%20PV_LCV%20CO₂%20July2012final.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT%20Policy%20Update%20EU%20PV_LCV%20CO2%20July2012final.pdf). Accessed 11 May 2020.
- [193] International Council on Clean Transportation (ICCT). 2020. *European Passenger Car Registrations: January–March 2020.*
- [194] Linke, R. 2017. *The real barriers to electric vehicle adoption. Ideas Made to Matter.* <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/real-barriers-to-electric-vehicle-adoption>. Accessed 11 May 2020.

- [195] Statharas, S., Moysoglou, Y., Siskos, P., Zazias, G., and Capros, P. 2019. Factors Influencing Electric Vehicle Penetration in the EU by 2030: A Model-Based Policy Assessment. *Energies* 12, 14, 2739.
- [196] Europäische Kommission. 2014. *RICHTLINIE 2014/94/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe*.
- [197] Tran, M., Banister, D., Bishop, J. D. K., and McCulloch, M. D. 2012. Realizing the electric-vehicle revolution. *Nature Climate Change* 2, 5, 328–333.
- [198] Nykvist, B. and Nilsson, M. 2015. Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Clim Change* 5, 4, 329–332.
- [199] Knupfer, S. M., Hensley, R., Hertzke, P., and Schaufuss, P. 2017. *Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability*. Advanced Industries.
- [200] Kraftfahrtbundesamt. 2019. *Neuzulassungen von Pkw im Jahr 2018 nach ausgewählten Kraftstoffarten*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Umwelt/2018_n_umwelt_dusl.html?nn=652326. Accessed 11 May 2020.
- [201] Kraftfahrtbundesamt. 2019. *Bestand an Pkw am 1. Januar 2019 nach ausgewählten Kraftstoffarten*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2019_b_umwelt_dusl.html?nn=663524. Accessed 11 May 2020.
- [202] UBA. 2020. *Altfahrzeugverwertung und Fahrzeugverbleib*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib>. Accessed 19 August 2020.
- [203] NPM. 2019. *Klimaschutz im Verkehr. Zwischenbericht 03/2019 Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor Arbeitsgruppe 1 Klimaschutz im Verkehr*. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität.
- [204] Kraftfahrtbundesamt. 2020. *Bestand an Kraftfahrzeugen am 1. Januar 2020 nach Bundesländern, Kraftstoffarten und Fahrzeugklassen*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz27_b_uebersicht.html. Accessed 11 May 2020.
- [205] Kraftfahrtbundesamt. 2018. *Fahrzeugzulassungen Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2018*. https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2018/fz14_2018_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4. Accessed 30 April 2020.
- [206] Kraftfahrtbundesamt. 2018. *FZ 16 Fahrzeugzulassungen Besitzumschreibungen und Außerbetriebsetzungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter Jahr 2018*. https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2018/fz16_2018_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4. Accessed 30 April 2020.
- [207] Kleiner, F. and Friedrich, H.E. 2017. *Development of a Transport Application based Cost Model for the assessment of future commercial vehicle concepts. European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress Geneva 14th-16th March*.
- [208] Kraftfahrtbundesamt. 2017. *[Duplikat] Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen, Besitzumschreibungen, Außerbetriebsetzungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken Jahr 2016*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Zulassungsbezirke/2016/2016_zulassungsbezirke_node.htmlhttps://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/

- Neuzulassungen/Zulassungsbezirke/2016/2016_zulassungsbezirke_node.html. Accessed 11 May 2020.
- [209] Kraftfahrtbundesamt. 2018. *FZ 5.1 Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern im Jahr 2017 nach Zulassungsbezirken und Fahrzeugklassen*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Zulassungsbezirke/2017/2017_zulassungsbezirke_node.html. Accessed 11 May 2020.
- [210] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. 2020. *Förderung von Elektrobussen*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/saubere-luft/foerderung-von-elektrobussen-bmu--318844>. Accessed 11 May 2020.
- [211] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. *Verkehrsverflechtungsprognose 2030 Schlussbericht*. <http://daten.clearingstelle-verkehr.de/276/1/verkehrsverflechtungsprognose-2030-schlussbericht-los-3.pdf>. Accessed 11 May 2020.
- [212] Öko-Institut. 2014. *eMobil 2050 Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz*.
- [213] Zweirad-Industrie-Verband. 2019. *Zahlen – Daten – Fakten zum Deutschen E-Bike-Markt 2018. E-Bike-Verkäufe erreichen Rekordniveau*.
- [214] Bundesministerium der Finanzen. *AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter*. https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/Ergaenzende-AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_AV.pdf;jsessionid=3F4C10E18A7688BC7F2E4E7847B145BC.delivery2-replication?__blob=publicationFile&v=3. Accessed 11 May 2020.
- [215] Zweirad-Industrie-Verband. 2019. *Wirtschaftspressekonferenz am 21. März 2019 Zahlen – Daten – Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland 2018*, Berlin.
- [216] Zweirad-Industrie-Verband. 2019. *ZIV: Fahrradmarkt wuchs 2018 noch stärker*. <https://radmarkt.de/nachrichten/deutscher-fahrradmarkt-2018-starkes-jahr-fuer-branche>. Accessed 11 May 2020.
- [217] Statistische Ämter des Bundes und der Länder. 2020. *Fläche und Bevölkerung nach Ländern*. <https://www.statistikportal.de/de/bevoelkerung/flaeche-und-bevoelkerung>. Accessed 11 May 2020.
- [218] Statistisches Bundesamt. 2019. *Vorausberechneter Bevölkerungsstand: Bundesländer, Stichtag, Varianten der Bevölkerungsvorausberechnung*. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=abrufabelleBearbeiten&levelindex=2&levelid=1589355511281&auswahloperation=abrufabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&code=12421-0003&auswahltext=&werteabruf=Werteabruf>. Accessed 11 May 2020.
- [219] *DIN EN ISO 14040:2009-11, Umweltmanagement_- Ökobilanz_- Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO_14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO_14040:2006*. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [220] *DIN EN ISO 14044:2018-05, Umweltmanagement_- Ökobilanz_- Anforderungen und Anleitungen (ISO_14044:2006_+ Amd_1:2017); Deutsche Fassung EN_ISO_14044:2006_+ A1:2018*. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

- [221] Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B. 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int J Life Cycle Assess* 21, 9, 1218–1230.
- [222] European Commission. 2018. *Report on Raw Materials for Battery Applications*, Brüssel.
- [223] Klöpffer, W. and Grahl, B. 2009. *Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. WILEY-VCH, Weinheim.
- [224] Goedkoop, M. J., Heijungs, R., Huijbregts, M., Schryver, A. de, Struijs, J., and van Zelm, R. 2009. *ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First Edition Report I: Characterisation*.
- [225] IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [226] Huijbregts, M. A. J., Rombouts, L. J. A., Hellweg, S., Frischknecht, R., Hendriks, A. J., van de Meent, D., Ragas, A. M. J., Reijnders, L., and Struijs, J. 2006. Is cumulative fossil energy demand a useful indicator for the environmental performance of products? *Environmental science & technology* 40, 3, 641–648.
- [227] Frischknecht, R., Wyss, F., Büsler Knöpfel, S., Lützkendorf, T., and Balouktsi, M. 2016. Erratum to: Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. *Int J Life Cycle Assess* 21, 6, 921–923.
- [228] Dai, Q., Spangenberg, J., Ahmed, S., Gaines, L., Kelly, J. C., and Wang, M. 2019. *EverBatt: A Closed-loop Battery Recycling Cost and Environmental Impacts Model*. Argonne National Laboratory.
- [229] Zheng, X., Zhu, Z., Lin, X., Zhang, Y., He, Y., Cao, H., and Sun, Z. 2018. A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium Ion Batteries. *Engineering* 4, 3, 361–370.
- [230] Dahbi, M., Ghamouss, F., Tran-Van, F., Lemordant, D., and Anouti, M. 2011. Comparative study of EC/DMC LiTFSI and LiPF₆ electrolytes for electrochemical storage. *Journal of Power Sources* 196, 22, 9743–9750.
- [231] Sleeswijk, A. W., van Oers, L. F. C. M., Guinée, J. B., Struijs, J., and Huijbregts, M. A. J. 2008. Normalisation in product life cycle assessment: an LCA of the global and European economic systems in the year 2000. *The Science of the total environment* 390, 1, 227–240.
- [232] Finanzen.net. *Nickelpreis*. <https://www.finanzen.net/rohstoffe/nickelpreis>. Accessed 20 August 2020.
- [233] Handelsblatt. *Cobalt*. <https://finanzen.handelsblatt.com/9045377/cobaltpreis>. Accessed 20 August 2020.

11 Anhang

11.1 Befragte Expert*innen

No:	Expert*in	Institution/ Unternehmen
1	Dr. Linda Gaines	Argonne National Laboratory (USA)
2	Thomas Mertens	BMW AG
3	Ph.D. Xue Wang	BOTREE Cycling Sci.&Tech. Co. LTD (China)
4	Dr. Maximilian Kaus	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
5	Dr. Birger Horstmann	
6	Dr. Daniel Bahro	Energie Baden-Württemberg EnBW
7	Małgorzata Leszczyk	Eneris Group (Poland)
8	Jose Manuel Miguez Novoa	Ferro Globe (Spanien)
9	Prof. Dr. Jens Tübke	Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie, ICT
10	Dr. Duygu Kaus	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, IPA
11	Jan Koller	
12	Steffen Kiemel	
13	Soumya Singh	
14	Dr. Sarah Hartmann	Fraunhofer-Institut für Silicatforschung, ISC
15	Johannes Öhl	Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie, IWKS
16	Lisbeth Dahllöf	IVL Swedish Environmental Research Institute (Schweden)
17	Prof. Dr. rer. Nat Helmut Ehrenberg	Karlsruher Institut für Technologie, KIT – Institut für Angewandte Materialien (IAM-ESS)
18	Holger Kuhlmann	REDUX Recycling GmbH
19	Benedikt Stumper	Technische Universität München - Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)
20	Harry Zhang	TÜV Süd AG
21	Eric Spek	
22	Frank Treffer	Umicore N.V.
23	Dr. Kurt Vandeputte	
24	Dr. Jan Tytgat	
25	Prof. David Greenwood	The University of Warwick (UK)

11.2 Fragebogen – deutsche Ausführung

Einführende Hinweise zur Studie sowie zum Datenschutz werden an dieser Stelle nicht beigefügt.

1. Lebensdauer von EV-Batteriesystemen

Laut aktueller Studien [1, 2] beträgt die Lebensdauer eines durchschnittlichen EV-Batteriesystems ca. 8 Jahre.

- **Expertenfrage 1:** Wie hoch schätzen Sie die Lebensdauer eines EV-Batteriesystems unter Annahme eines progressiven Szenarios im Jahr 2030 ein?
 - **Antwort:** Jahre

- **Expertenfrage 2:** Wie hoch schätzen Sie den Restwert eines Batteriesystemes nach einer Nutzung von 4 bzw. 8 Jahren ein? (Angabe in Prozent, Referenz: NMC 532 Batteriesystem)

NMC 532 Batteriesystem	Restwert (in Prozent)
Jahr 0	100 %
Jahr 4	<input type="text"/> %
Jahr 8	<input type="text"/> %

- **Expertenfrage 3:** Um wie viele Jahre wird Ihrer Meinung nach die durchschnittliche Lebensdauer eines Batteriesystems von derzeit ca. 8 Jahren durch die Weiterverwendung bspw. als stationärer Energiespeicher verlängert?
 - **Antwort:** 8 + Jahre

- **Expertenfrage 4:** Batteriesysteme können am Ende ihrer Nutzungsphase in EV in ein zweites Leben (sog. „Second Life“) überführt werden. Je nach SoH existieren dafür verschiedene Kreislaufstrategien für Batteriesysteme. Bitte legen Sie für die unten genannten Kreislaufstrategien einen prozentualen SoH-Grenzwert fest und weisen Sie so jeder Kreislaufstrategie einen Bereich zu, bei dem Sie der Meinung sind, dass diese Kreislaufstrategie Anwendung finden sollte.

Kreislaufstrategie	SoH Grenzwert
EV	100 %
Reuse/Repurpose	<input type="text"/> ≤ <input type="text"/> %
Remanufacturing	<input type="text"/> ≤ <input type="text"/> %
Recycling	<input type="text"/> ≤ <input type="text"/> %

- **Expertenfrage 5:** Bitte kreuzen Sie an, in wie weit Sie den folgenden Aussagen hinsichtlich der Entwicklung von Batteriesystemen bis 2030 zustimmen.

Entwicklung bis 2030:	Stimme nicht zu	Unentschieden	Stimme zu
Die Variantenvielfalt von Batteriesystemen wird abnehmen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Demontagefähigkeit von Batteriesystemen wird sich verbessern	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Recyclingfähigkeit von Batteriesystemen wird sich verbessern	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Anschaffungskosten von Batteriesystemen werden sich verringern	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die ungleichmäßige Abnutzung von Batteriezellen wird abnehmen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die State-of-Health-Bewertung von Batteriesystemen wird sich verbessern	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Nachverfolgbarkeit (Traceability) von Batteriesystemen wird sich verbessern	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Steigende Rohstoffpreise	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Erhöhung der Energiedichte	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Verringerung des Batteriegewichts	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Erhöhung der Temperaturtoleranz	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Erhöhung der Stabilität (Sicherheit)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Erhöhung der Kapazität	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

- **Expertenfrage 6:** Bitte bewerten Sie den Einfluss der einzelnen Faktoren auf die Umsetzung von Kreislaufstrategien der EV-Batterien, vom **höchsten (1)** bis zum **niedrigsten (6)**.

Einflussfaktoren	Reihenfolge (1-6)		
	Reuse/Repurpose	Remanufacturing	Recycle
Änderung des Zelldesign	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Änderung der Zellchemie	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sinkende Preisunterschiede (Gebraucht- vs. Neuteil)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Steigende Rohstoffpreise	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Verbesserte State-of-Health-Bewertung	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Verbesserte Demontagefähigkeit	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

- **Expertenfrage 7:** Wie hoch schätzen Sie die Rücklaufquote von Batteriesystemen am Ende der Nutzungsphase im Jahr 2030 ein?
 - **Antwort:** %

1.1 Faktoren, die die Lebensdauer der EV-Batteriesystemen beeinflussen

- **Expertenfrage 8:** Bitte bewerten Sie den Einfluss der genannten Faktoren auf die Lebensdauer von EV-Batteriesystemen, vom **höchsten (1)** bis zum **niedrigsten (4)**.

Einflussfaktoren	Reihenfolge (1-4)
SOC Bereich	<input type="text"/>
Temperatur	<input type="text"/>
C-Rate	<input type="text"/>
Zyklenanzahl	<input type="text"/>

- **Expertenfrage 9:** Bitte kreuzen Sie an, wie Sie das Entwicklungspotenzial der genannten Einflussfaktoren bis 2030 einschätzen.

Einflussfaktoren	Gering	Mittel	Hoch
Breiterer SoC Bereich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Erhöhung der Temperaturresistenz	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Erhöhung der C-Rate	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Erhöhung der Maximalen Zyklenanzahl	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

1. Zukünftige Zellchemie-Szenarien

- **Expertenfrage 10:** Unten sehen Sie die derzeitigen Marktanteile verfügbarer NMC-Chemien. Eine weitreichende Nutzung von Festkörperbatterien oder ähnlich innovativen Konzepten wird meist erst ab ca. 2030 als realistisch angesehen. Entsprechend wird bis dahin mit einer Marktdurchdringung von NMC-Kathoden gerechnet. Bitte geben Sie die Anteile der einzelnen NMC-Chemien im Jahr 2030 unter Annahme eines progressiven Szenarios an.

NMC-Chemie	Marktanteil	
	2019* (aktuell)	2030 (progressiv)
NMC 111	45%	<input type="text"/> %
NMC 532	35%	<input type="text"/> %
NMC 622	20%	<input type="text"/> %
NMC 811	5%	<input type="text"/> %
Total	100%	<input type="text"/> %

2.1 Einflussfaktoren für die Erhöhung der Ni-Anteil in NMC

- **Expertenfrage 11:** Bitte bewerten Sie die aufgeführten Faktoren hinsichtlich Ihres Einflusses auf eine Änderung der Kathodenzusammensetzung von NMC-Batterien vom höchsten (1) bis zum niedrigsten (6).

Einflussfaktoren	Reihenfolge (1-6)
Steigende Rohstoffpreise	<input type="text"/>
Erhöhung der Energiedichte	<input type="text"/>
Verringerung des Batteriegewichts	<input type="text"/>
Erhöhung der Temperaturtoleranz	<input type="text"/>
Erhöhung der Stabilität (Sicherheit)	<input type="text"/>
Erhöhung der Kapazität	<input type="text"/>

- **Expertenfrage 12:** Welche zusätzlichen Herausforderungen bestehen bei der Kreislaufführung von Batteriesystemen?

- **Expertenfrage 13:** Was ist aus Ihrer Sicht notwendig, um diese Herausforderungen bewältigen zu können?

11.3 Anfallende und substituierte Materialien zur Gutschrift

Prozessroute	Anfallendes Material	Aufbereitungsprozess	Substituiertes Material	Prozess Primärgewinnung
Demontage	BMS	treatment of scrap printed wiring boards, shredding and separation [RoW]	Copper	copper production, primary [RoW] [221]
			Nickel, 99,5%	nickel mine operation, sulfidic ore [GLO] [221]
			Silver	silver-gold mine operation with refinery [RoW] [221]
			Gold	silver-gold mine operation with refinery [RoW] [221]
Demontage	Edelstahlschrott	treatment of waste reinforcement steel, recycling [CH]	Steel, chromium steel 18/8	steel production, converter, chromium steel 18/8 [RER] [221]
Demontage	Kunststoffe	treatment of waste polypropylene, municipal incineration [RoW]	electricity, medium voltage	market for electricity, medium voltage [DE] [221]
			heat, district or industrial, other than natural gas	market group for heat, district or industrial, other than natural gas [RER] [221]
Demontage	Kühlflüssigkeit	treatment of spent antifreezer liquid, hazardous waste incineration [RoW]	electricity, medium voltage	market for electricity, medium voltage [DE] [221]
			heat, district or industrial, other than natural gas	market group for heat, district or industrial, other than natural gas [RER] [221]
Demontage/ Route 1/ Route 2	Kupferschrott	treatment of copper scrap by electrolytic refining [RER]	Copper	copper production, primary [RoW] [221]
Demontage/ Route 2	Aluminiumschrott	treatment of aluminium scrap, new, at remelter [RoW]	Aluminium, primary, ingot	aluminium production, primary, ingot [IAI Area, EU27 & EFTA] [221]
Route 1/ Route 2	Kobaltverbindungen	Pyro/Hydro	Cobalt	cobalt production [GLO] [221]
Route 1/ Route 2	Nickelverbindungen	Pyro/Hydro	Nickel sulfat	nickel sulfat production [GLO] [221]
Route 2	Lithiumverbindungen	Hydro (eigens definiert, nach [228])	Lithium hydroxide	lithium hydroxide production [GLO] [221]
Route 2	Manganverbindungen	Hydro (eigens definiert, nach [228])	Manganese sulfat	manganese sulfat production [GLO] [221]
Route 2	Batteriezellen/ -module	Hydro (eigens definiert, nach [228])	Ethylene carbonat	ethylene carbonate production [RoW] [221]
Route 2	Batteriezellen/ -module	Hydro (eigens definiert, nach [228])	Graphite	graphite production [RER] [221]
Route 2	Kunststoffe	polyethylene production, high density, granulate, recycled [Europe without Switzerland]	Polyethylene, high density, granulate	polyethylene production, high density, granulate [RER] [221]

11.4 Verwendete generische Prozesse

Kategorie	Datensatz	Quelle
Aufbereitungsprozesse	treatment of aluminium scrap, new, at remelter [RoW]	Ecoinvent 3.6 [221]
	treatment of copper scrap by electrolytic refining [RER]	
	polyethylene production, high density, granulate, recycled [Europe without Switzerland]	
	treatment of scrap printed wiring boards, shredding and separation [RoW]	
	treatment of waste reinforcement steel, recycling [CH]	
Materialgutschrift	aluminium production, primary, ingot [IAI Area, EU27 & EFTA]	
	cobalt production [GLO]	
	copper production, primary [RoW]	
	ethylene carbonate production [RoW]	
	graphite production [RER]	
	lithium hydroxide production [GLO]	
	manganese sulfate production [GLO]	
	nickel mine operation, sulfidic ore [GLO]	
	nickel sulfate production [GLO]	
	polyethylene production, high density, granulate [RER]	
	silver-gold mine operation with refinery [RoW]	
steel production, converter, chromium steel 18/8 [RER]		
Hilfsstoffe	market for ammonia, liquid [RER]	
	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state [RER]	
	market for hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state [RER]	
	market for lime, packed [Europe without Switzerland]	
	market for sand [CH]	
	market for soda ash, dense [GLO]	
	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state [GLO]	
	market for sulfuric acid [RER]	
market for tap water [Europe without Switzerland]		
Energie	market for diesel [Europe without Switzerland]	
	market for electricity, medium voltage [DE]	
	market for natural gas, high pressure [DE]	
Transport	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [RER]	
Entsorgung	treatment of scrap steel, inert material landfill [Europe without Switzerland]	
	treatment of spent antifreezer liquid, hazardous waste incineration [RoW]	
	treatment of waste polypropylene, municipal incineration [RoW]	
	treatment of wastewater, average, capacity 1E9l/year [Europe without Switzerland]	