Entscheidungshilfesystem für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

EASLi

AZ 39349/01

Abschlussbericht

Verfasser:

ECOLOGICON GmbH (Dr.-Ing. André Rückert)

Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (Dr.-Ing. Nils Wieczorek, Christoph Melzer, Clemens Weig, Paul Klatt)

Battery Damage Service GmbH (Mikhail Kasiyanov, Jan Zins)

Projektleitung: Dr.-Ing. Nils Wieczorek (Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien)

Projektlaufzeit: 10.01.2025–28.02.2026

Institution: Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien

Kooperationspartner:

Battery Damage Service GmbH

ECOLOGICON GmbH

ERLOS Produktion und Montagen GmbH

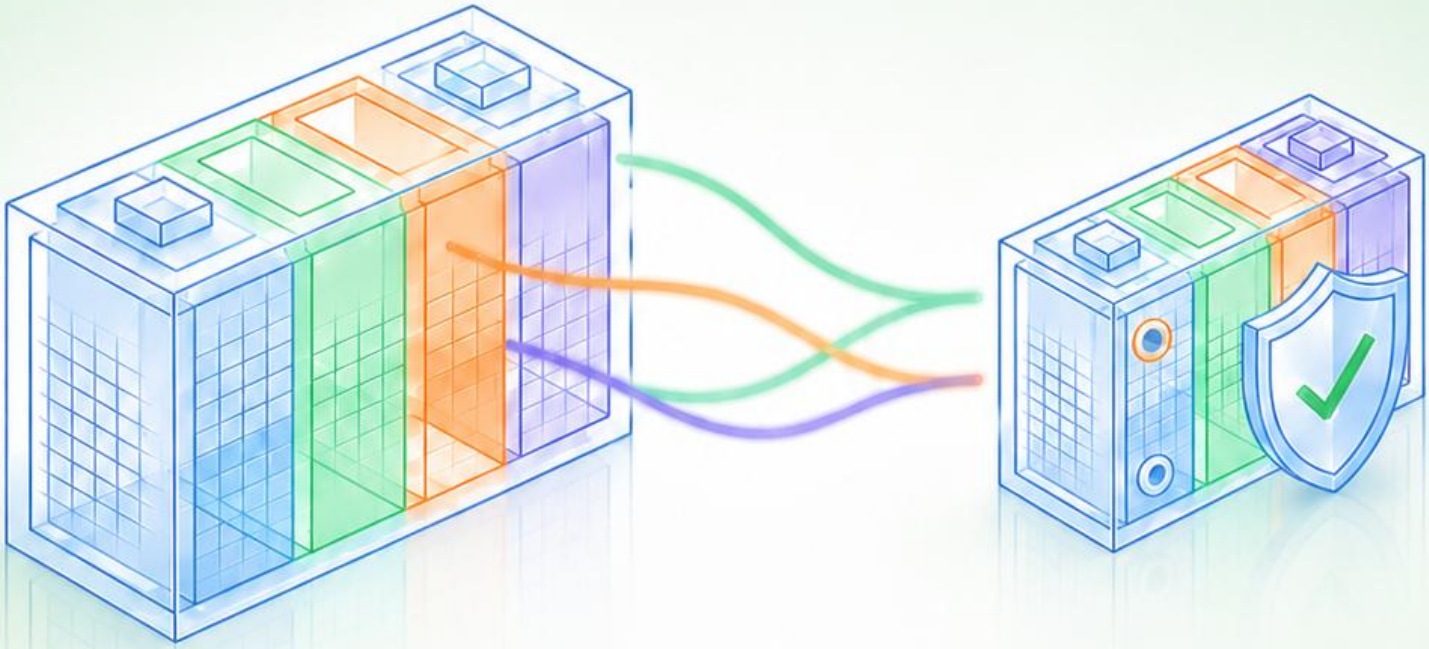
Gemeinsames Rücknahmesystem Servicegesellschaft mbH

Robert Bosch Powertools GmbH

Hamburg, 2026

Namensnennung 4.0 International. (CC BY 4.0)

Zitierempfehlung: Stiftung GRS Batterien. (2026). Entscheidungshilfesystem für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – EASLi. Hamburg.



Entscheidungshilfesystem für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser

Die industrielle Transformation hin zur Klimaneutralität führt zu einem wachsenden Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien und erhöht zugleich den Bedarf an kritischen Rohstoffen. Neben Antriebsbatterien rücken dabei zunehmend auch Gerätebatterien aus Elektrowerkzeugen in den Fokus, da sie einen wachsenden und bislang nur begrenzt strukturierten Stoffstrom darstellen. Vor dem Hintergrund globaler Rohstoffabhängigkeiten und neuer regulatorischer Anforderungen gewinnt eine effiziente und strategisch ausgerichtete End-of-Life-Behandlung dieser Batterien an Bedeutung.
Mit der EU-Batterieverordnung und der Weiterentwicklung des nationalen Batterierechts wurden klare Rahmenbedingungen für Sammlung, Recycling und den Einsatz von Sekundärrohstoffen geschaffen. Dabei geht es nicht allein um Abfall- und Umweltpolitik, sondern auch um die Stärkung der europäischen Rohstoffsouveränität, industriellen Wettbewerbsfähigkeit und Wertschöpfung.
Vor diesem Hintergrund verfolgte das Projekt EASLi – Entscheidungshilfesystem für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien das Ziel, praxisnahe Entscheidungsgrundlagen für die Verwertung von End-of-Life-Batterien aus Elektrowerkzeugen zu entwickeln. Der vorliegende Abschlussbericht fasst die zentralen Ergebnisse aus Markt-, Technik- und Rechtsanalysen sowie aus umfangreichen Praxisuntersuchungen zusammen und zeigt auf, unter welchen Bedingungen Wiederverwendung, Wiederinstandsetzung oder stoffliche Verwertung sinnvoll und wirtschaftlich tragfähig sind.
Ein zentrales Ergebnis ist die Entwicklung akteursspezifischer Entscheidungsbäume, die reale Entscheidungspunkte entlang der Entsorgungskette abbilden und eine transparente, praxistaugliche Zuordnung von Batterien zu geeigneten Verwertungsstrategien ermöglichen. Damit leistet der Bericht einen Beitrag zur Weiterentwicklung effizienter, rechtssicherer und zukunftsfähiger Recyclingstrukturen für Lithium-Ionen-Batterien.

Wir wünschen Ihnen eine aufschlussreiche Lektüre.

Georgios Chryssos

Vorstand

Dr.-Ing. Nils Wieczorek

Leiter Forschung und Entwicklung

Ergebnisse und Empfehlungen

1

Produktion hochwertiger Sekundärrohstoffe sorgt für gesteigerte Rohstoffsouveränität

Die Lieferketten für Rohstoffe von NMC-Lithium-Ionen-Batterien (NMC-LIB) sind derzeit äußerst angespannt. Vor diesem Hintergrund ist der konsequente Aufbau von Recyclingkapazitäten zur Gewinnung hochwertiger Sekundärrohstoffe am Ende der Batterielebensdauer unerlässlich. Nur so lassen sich die langfristige Rohstoffverfügbarkeit sichern und die europäische Souveränität im Batteriesektor stärken. Gleichzeitig entwickeln sich Batteriechemien kontinuierlich weiter. Der technologische Fortschritt führt dabei zu fortlaufenden Veränderungen in Zusammensetzung, Leistungsfähigkeit und Einsatzbereichen von Batterien. Insgesamt ist der Batteriemarkt durch eine hohe Dynamik gekennzeichnet, was eine kontinuierliche Beobachtung erforderlich macht, um Marktveränderungen frühzeitig zu erkennen und angemessen darauf reagieren zu können.

2

Abwesenheit von „Second-Life“ Strategien entlang der Entsorgungskette

Die Entsorgungskette für EoL-NMC-LIB aus Powertools in Deutschland ist streng reguliert und organisatorisch gut etabliert. Die derzeit vorgesehenen Entsorgungswege konzentrieren sich jedoch überwiegend auf eine sichere Sammlung, den regelkonformen sicheren Transport sowie die stoffliche Verwertung der Batterien. Die Abfallhierarchie wird bislang nur unzureichend berücksichtigt, da alternative Re-Strategien wie die direkte Wiederverwendung (Reuse), die Reparatur (Repair), die Wiederinstandsetzung (Refurbishment) oder die Wiederaufarbeitung (Remanufacturing) im Bereich von NMC-LIB aus Powertools bislang keine Anwendung finden.

3

Rechtliche Vorgaben sorgen für Fokus auf stoffliche Verwertung

Die Auswertung der rechtlichen Vorgaben für den NMC-LIB-Powertool-Sektor zeigt, dass eine Vielzahl an Regularien für die ordnungsgemäße Organisation und Einhaltung der Entsorgungskette maßgeblich ist und zahlreiche Verordnungen und Gesetze ineinandergreifen. Die jüngste Novellierung der europäischen Batterieverordnung (BattVO) sowie die Einführung des Batterierecht-Durchführungsgesetzes (BattDG) auf nationaler Ebene schaffen dabei mehr Klarheit hinsichtlich Zuständigkeiten sowie Kennzeichnungs-, Rücknahme- und Verwertungsanforderungen. Ob diese rechtlichen Rahmenbedingungen jedoch tatsächlich zur Entstehung neuer Geschäftsmodelle entlang der Entsorgungskette von NMC-Lithium-Ionen-Batterien aus Powertools beitragen, bleibt offen.

4

Mehr als die Hälfte der EoL-Powertool Batterien auf Lithiumbasis

Im Rahmen des Projektes wurde eine Sortierkampagne durchgeführt, mit dem Ziel die Stoffstromzusammensetzung sowie den Zustand der EoL-Powertoolbatterien zu ermitteln. Ein wesentliches Ergebnis ist die Verteilung

der ermittelten Zellchemien LIB, NiMh und NiCd. LIB haben hierbei mehr als die Hälfte der erfassten Batterien ausgemacht. Zweithäufigste Zellchemie war NiCd. NiMH-haltige und nicht bestimmbare Batteriepacks haben nur einen kleinen Anteil ausgemacht. Der Ladungszustand der Batterien hat ergeben, dass Batterien mit einer geringeren Nutzungsdauer einen höheren SoC aufweisen und sich somit eher für ein „Second-Life"-Szenario eignen könnten. Die Untersuchung der Nutzungsdauer hat eine durchschnittliche Lebensdauer von 10 Jahren ergeben, wobei LIB aus Powertools aus dem privaten Bereich eine doppelt so lange Nutzung aufweisen gegenüber den im gewerblichen Bereich verwendeten.

5

Technische Potentiale bei Wiederinstandsetzung, allerdings fehlende wirtschaftliche Umsetzbarkeit

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass ein signifikanter Anteil der Powertoolbatterien aus technischer Sicht als Gebrauchtprodukt wieder in Verkehr gebracht werden könnte. Eine wirtschaftliche Durchführbarkeit dieser Wiederinstandsetzung für eine „Second-Life"-Anwendung erscheint derzeit jedoch nicht umsetzbar. Die Integration einer Testung als neuer Prozessschritt in bestehende Abläufe ermöglicht zudem eine Tiefentladung der Batterien, wodurch deren Handhabung und Recycling vereinfacht werden.

6

Praxistaugliche Entscheidungsbäume fördern die optimierte Ausschleusung von NMC-LIB

Die Identifikation optimaler Entscheidungspunkte entlang der Entsorgungskette für EoL-Powertoolbatterien ist essenziell, um eine Ausschleusung von EoL-NMC-LIB für eine mögliche „Second-Life"-Anwendung oder eine hochwertige Verwertung zu ermöglichen. Als Entscheidungshilfetool wurden Entscheidungsbäume ausgewählt, da sie für alle Akteure entlang der Entsorgungskette von EoL-Powertoolbatterien einfach zugänglich sind und eine hohe Praxistauglichkeit aufweisen. Ebenso können sie dazu verwendet werden, eine webbasierte App zu programmieren, die anhand von Bilderkennung bestimmte äußere Merkmale abgleicht und darauf aufbauend optimale Entscheidungen unterstützt.

Inhalt

Vorwort I

Ergebnisse und Empfehlungen II

Zusammenfassung V

1 Einleitung 1

2 Projektablauf 3

3 Projektergebnisse 6

3.1 Recherche 6

3.2 Analyse der Powertoolbatterien aus dem End-of-Life 34

3.3 Wiederverwendung und Verwertung 39

3.4 Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems 56

4 Handlungsempfehlung 70

5 Fazit 76

6 Ausblick 78

Literaturverzeichnis 86

Anhang 91

Impressum 105

Zusammenfassung

Dieser Abschlussbericht fasst die wichtigsten Ergebnisse des Projektes EASLi „Entscheidungshilfesystem für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“, dass im Zeitraum vom 10.01.2025 bis zum 28.02.2026 durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert wurde, zusammen. Das zentrale Ziel des Projektes war es, die aktuelle Marktsituation von NMC-Lithiumionenbatterien zu analysieren und auf Basis praxisrelevanter Versuche entlang der Entsorgungskette ein Entscheidungshilfesystem zu entwickeln. Dieses soll den Akteuren entlang dieser Kette ermöglichen, höherwertige Kreislaufwirtschaftsstrategien zu realisieren, als sie derzeit im Marktumfeld umgesetzt werden.

Im Rahmen des Projektes wurde die Situation von NMC-Lithiumionenbatterien aus Powertools im nationalen Kontext umfassend untersucht. Die Forschung konzentrierte sich auf aktuelle Marktdaten, den Stand von Technik und Wissenschaft sowie rechtliche Vorgaben entlang des gesamten Lebenszyklus der Batterien. Ergänzend wurden praxisnahe Versuche durchgeführt, darunter eine umfangreiche Sortierkampagne, eine mechanische Vorbehandlung und gezielte Untersuchungen zur Vorbereitung zur Wiederverwendung. Diese Maßnahmen ermöglichten eine Bewertung der Eignung von Powertoolakkumulatoren für unterschiedliche Strategien, zusammengefasst in drei ausgewählten Loops:

- Loop 1 „Wiederinstandsetzung“,
- Loop 2 „Stoffliche Verwertung als Rohstoff der Kathodenherstellung“,
- Loop 3: „Stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff“.

Besonders wurde die Eignung von NMC-Lithiumionenbatterien für die direkte Wiederverwendung, Reparatur, Wiederinstandsetzung und Wiederaufarbeitung betrachtet.

Im Verlauf des Projektes konnten drei wesentliche Entscheidungspunkte identifiziert werden, an denen eine Entscheidung über eine höherwertige Verwertung getroffen werden kann:

- an der Sammelstelle,
- im Sortierbetrieb,
- im Betrieb zur Wiederinstandsetzung.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden praxisnahe Entscheidungsprozesse entwickelt, die die Ergebnisse aus den Versuchskampagnen aufnehmen und den Stakeholdern ermöglichen, gezielt Entscheidungen zu treffen.

Die Resultate der Praxisversuche wurden in eine handlungsorientierte Empfehlung für kleine und mittlere Unternehmen entlang der Batterieverwertungskette übersetzt.

Die Auswertung der Arbeitspakete zeigte, dass die Entsorgungskette von NMC-Lithiumionenbatterien bislang ausschließlich auf die stoffliche Verwertung ausgerichtet ist. Die Bauweise der Batterien fokussiert auf Nutzungssicherheit und Robustheit, während Kreislauffähigkeit weniger berücksichtigt wird. Entsprechend sind die Prozesse entlang der Entsorgungskette darauf ausgerichtet. Versuche zur Wiederinstandsetzung belegten, dass es technisch möglich ist, Batterien am Ende ihres Lebens für eine „Second-Life“-Anwendung vorzubereiten. Allerdings bestehen erhebliche Hürden, darunter die Selbstkannibalisierung der Nachfrage, haftungs- und sicherheitsrelevante Fragestellungen sowie die fehlende ökonomische Machbarkeit.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass zwar Potenziale für die Anwendung von höherwertigen RE-Strategien bei NMC-Lithiumionenbatterien aus Powertools bestehen, diese jedoch aktuell weder marktreif noch wirtschaftlich realisierbar sind.

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund stetig wachsender Produktionskapazitäten für Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in Europa hat sich die deutsche Politik zum Ziel gesetzt, Deutschland als führenden Standort für Forschung, Fertigung und Recycling von Batteriezellen zu etablieren. Gleichzeitig sollen Anreizsysteme geschaffen werden, die eine umweltgerechte Entsorgung von LIB begünstigen und idealerweise in eine funktionierende Kreislaufwirtschaft münden. Ein wesentlicher Treiber dieser Entwicklung sind europäische Vorgaben, insbesondere die Batterieverordnung, die Hersteller verpflichtet, bis 2030 einen bestimmten Anteil an Rezyklaten von Kobalt, Blei, Lithium und Nickel in der Batterieproduktion einzusetzen. Diese Quoten sollen bis 2035 nochmals erhöht werden.
Aktuell ist jedoch unklar, ob die Recyclingprozesse die geforderten Rezyklatgehalte in ausreichender Menge und Qualität liefern können, um primäre Rohstoffe in der Batterieproduktion tatsächlich zu ersetzen. Neben hochwertiger stofflicher Verwertung (engl. Recycling) mittels hydrometallurgischer oder pyrometallurgischer Verfahren werden auch die direkte Wiederverwendung (engl. Reuse), die Reparatur (engl. Repair), die Wiederinstandsetzung (engl. Refurbishment) und die Wiederaufarbeitung (engl. Remanufacturing) von LIB am Lebensende (engl. End-of-Life, EoL) als vielversprechende Kreislaufwirtschaftsstrategien betrachtet, um Produkte länger im Einsatz zu halten und natürliche Ressourcen zu schonen. Über die ökologischen Vorteile hinaus kann eine erfolgreiche Kreislaufwirtschaft auch die Abhängigkeit von Rohstofflieferanten reduzieren und so die europäische Souveränität im Zuge der zunehmenden Elektrifizierung stärken. Gleichwohl ist bislang offen, inwiefern direkte Wiederverwendung, Wiederinstandsetzung oder Wiederaufarbeitung wirtschaftlich tragfähige und für Hersteller attraktive Geschäftsmodelle darstellen können. Nur wenn die ökonomische Rentabilität gewährleistet ist, ist zu erwarten, dass sich Hersteller auf alternative, kreislauforientierte Geschäftsmodelle einlassen. Hauptsächliche Bedenken und Vorbehalte bestehen seitens der Produzenten hinsichtlich einer möglichen Kannibalisierung der Nachfrage nach Neuprodukten im Markt sowie bezüglich Qualitäts- und Haftungsfragen bei Re-Produkten (Reused, Repaired, Refurbished, Remanufactured).
Vor diesen Hintergründen hat sich das Projektkonsortium zum Ziel gesetzt, grundlegende Fragen, die diesbezüglich am Ende des Lebens von LIB auftreten, zu beantworten. Als beispielhaften Sektor hat das Konsortium hierzu den Sektor der kabellosen Elektrowerkzeuge (engl.: Powertools) gewählt. Die zunehmende Elektrifizierung in Industrie, Mobilität und im Haushalt hat zu einem stark wachsenden Bedarf an leistungsfähigen Energiespeichern geführt. In Powertools kommen dabei vermehrt LIB mit Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC) als Kathodenmaterial zum Einsatz. Dieser Batterietyp stellt eine bisher unerschlossene Quelle an LIB für Re-Strategien dar, da EoL-Powertool-LIB in sehr hohen Stückzahlen anfallen und bisher noch keine Geschäftsmodelle existieren, welche Re-Strategien erfolgreich anwenden. Kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) können aufgrund ihrer Größe flexibel und schnell auf Marktveränderungen reagieren. Aufgrund der Struktur dieser Unternehmen zählen innovative Ideen und Lösungen zu ihren Stärken. Dies bietet Vorteile in der Umsetzung dieses Projekts sowie bei den zukünftigen Entwicklungen auf dem EoL-Batteriemarkt.

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines umfassenden Entscheidungshilfesystems, das KMU dabei unterstützt, die geeignetsten Recyclingstrategien für LIB zu identifizieren. Dabei werden zwei zentrale Fragestellungen betrachtet – zunächst geht es um die Auswahl des optimalen Systems für die Stoffkreisläufe. Hierbei stellt sich die Frage, ob „Herstellerindividuelle“ oder „Branchenspezifische“ Stoffkreisläufe bevorzugt werden sollten oder ob auch „alternative Konzepte“ zur Verfügung stehen, die möglicherweise besser geeignet sind. Im zweiten Schritt soll die beste Entsorgungskette ermittelt werden, wobei verschiedene Optionen zur Verfügung stehen, die in drei Loops dargestellt sind:

- Loop 1 „Wiederinstandsetzung“,
- Loop 2 „Stoffliche Verwertung als Rohstoff der Kathodenherstellung“,
- Loop 3: „Stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff“.

In dieser Studie wird im Rahmen einer „Second-Life“-Anwendung lediglich die Wiederinstandsetzung von LIB aus Powertools tiefergehend evaluiert. Durch die gezielte Analyse und Bewertung dieser Optionen wird ein praxisnahes Entscheidungssystem entwickelt, das nicht nur ökologische Vorteile bietet, sondern auch ökonomisch tragfähige Lösungen aufzeigt. Somit leistet das Vorhaben einen wichtigen Beitrag zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft und zur Ressourcenschonung im Bereich der Batterietechnologie, die im Einklang mit den Vorgaben der Europäischen Union sowie der Bundesrepublik Deutschland stehen.

2 Projektablauf

Das Konsortium besteht aus den in der folgenden Tabelle dargestellten Projektpartnern, welche den kompletten Lebenszyklus von Batterien abbilden.

Tabelle 2.1: Übersicht der beteiligten Projektpartner sortiert nach Position im Lebenszyklusabschnitt.

Projektpartner	Lebenszyklusabschnitt	Aufgabe im Projekt
Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien	Think Tank für Kreislaufwirtschaft und erweiterte Herstellerverantwortung	Projektkoordination sowie Charakterisierung der EoL-Powertoolbatterien Zusammensetzung
Robert Bosch Power Tools GmbH	Hersteller und Inverkehrbringer	Bereitstellung von EoL-Powertool-LIB für mechanische Vorbehandlung sowie Experten Konsultationen
Gemeinsames Rücknahmesystem Servicegesellschaft mbH	Sammelsystem und Transportlogistik	Bereitstellung von EoL-Powertoolbatterien zur Charakterisierung sowie Experten Konsultationen
Battery Damage Service GmbH (BDS)	Wiederinstandsetzung	Technische Analyse und Einschätzung der Wiederinstandsetzbarkeit von EoL-Powertool-LIB
ERLOS Produktion und Montagen GmbH	Stoffliche Verwertung	Mechanische Vorbehandlung der EoL-Powertool-LIB und Charakterisierung des Rezyklat
ECOLOGICON GmbH	Abfallwirtschaftsexperten im Batteriesektor	Bewertung der Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete sowie Erarbeitung des Entscheidungshilfesystems

Der Projektablauf des EASLi Projektes gliederte sich in fünf Arbeitspakete, deren Inhalt und Zielstellung in der folgenden Tabelle dargestellt sind.

Tabelle 2.2: Übersicht der Arbeitspakete und deren Inhalte.

Arbeitspaketname und beteiligte Projektpartner	Inhalt und Zielstellung
AP1: Recherche **Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien** **ECOLOGICON GmbH**	Das Arbeitspaket erarbeitet die Grundlage zur Erstellung eines Entscheidungshilfesystems für NMC-Lithium-Ionen-Batterien (LIB) aus Powertools, indem bestehende Recherchen überprüft und aktualisiert werden. Dazu umfasst es eine Marktanalyse mit Darstellung der Lieferkette, der relevanten Marktteilnehmer und der Marktgrößen, ergänzt durch eine Betrachtung von Technik und Wissenschaft zu aktuellen Recycling- und Verwertungsverfahren, ReUse-Ansätzen sowie der Bewertung zentraler EU-Vorgaben wie dem Circular Economy Action Plan und der EU-Batterieverordnung.
AP2: Analyse der Powertoolbatterien aus den End-of-Life **Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien** **Gemeinsames Rücknahmesystem Servicegesellschaft mbH** **Robert Bosch Powertools GmbH** **Battery Damage Service GmbH**	Zum Projektstart bestand ein unzureichender Kenntnisstand über den Zustand von EoL-LIB aus Powertools, insbesondere hinsichtlich Nutzungsdauer, Rückgabezeitpunkt, technischem Zustand, Rückgabeorten sowie Rücklaufquoten und Endverbleib. Um diese Wissenslücken zu schließen, sollen Batterien an unterschiedlichen Rücknahmestellen gesammelt, bei einem Recyclingunternehmen konditioniert und anschließend umfassend analysiert, charakterisiert, bewertet und dokumentiert werden. Die praktische Umsetzung ist über Sortierkampagnen vorgesehen.
AP3: Wiederverwendung und Verwertung **Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien** **Robert Bosch Powertools GmbH** **Battery Damage Service GmbH** **ERLOS Produktion und Montagen GmbH**	Zu Projektstart lagen keine belastbaren Studien vor, welche die Eignung von EoL-LIB aus Powertools für ReUse- oder „Second-Life“-Anwendungen bewerten, und dass auch die weiteren Verwertungsoptionen, etwa eine produktionsnahe Nutzung oder die Verwertung als Sekundärrohstoff, unklar sind. Um zu klären, welcher Aufarbeitungs- oder Verwertungsweg in Abhängigkeit vom Zustand der Batterien möglich ist, sollen gezielte Untersuchungen durchgeführt werden, die diese Fragestellungen systematisch beantworten.
AP4: Entwicklung eines Entscheidungshilfesystem für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien **Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien** **Gemeinsames Rücknahmesystem Servicegesellschaft mbH** **ECOLOGICON GmbH**	Aus den Ergebnissen der durchgeführten Versuche aus AP2 und AP3, Untersuchungen und Analysen lassen sich unterschiedliche Strategien für die Verwertung von LIB aus Powertools entwickeln. Um dies umzusetzen werden die Ergebnisse aus den vorherigen Versuchen zu einer Bewertungsmatrix entwickelt. Mithilfe dieses Systems sollen die Beteiligten der Batterieprozesskette zukünftig die Möglichkeit der bestmöglichen Erfüllung ihrer Produktverantwortung gegeben werden.
AP5: Handlungsempfehlung **Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien** **Gemeinsames Rücknahmesystem Servicegesellschaft mbH** **ECOLOGICON GmbH**	Die Handlungsempfehlung soll aufzeigen, welche Vorteile sich für KMUs und weitere Beteiligte der Batteriewertschöpfungskette aus der Anwendung des Entscheidungshilfesystem ergeben, wie die Umsetzung des Konzeptes anhand von Beispielen erfolgen kann. Des Weiteren sollen die Übertragbarkeit auf andere Zellchemien und Batteriearten,

	sowie weitere Möglichkeiten der Optimierungen und Verbesserungen der EoL-NMC-LIB Verwertung beschrieben werden.

Die zeitliche Abfolge des EASLi-Projektes ist in der folgenden Tabelle 2.3 als GANTT Chart dargestellt.

Tabelle 2.3: Übersicht des zeitlichen Projektablaufs.

Arbeitspaket	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AP 1 Recherche		M1										
AP 2 Analyse EoL			M2									
AP 3 Verwertung												
- Analyse ReUse Szenario							M3					
- Stoffliche Verwertung										M4		
- Sekundärrohstoff								M5				
AP 4 Entscheidungshilfesystem											M6	
AP 5 Handlungsempfehlung												M7

Die folgenden Meilensteine wurden im Rahmen des Projektes erarbeitet:

- M1: Die Recherche ist abgeschlossen und mit den Vorarbeiten verknüpft
- M2: Der Zustand der EoL-Powertoolbatterien ist erfasst
- M3: Die Analyse zu den EoL-Szenarien ist durchgeführt
- M4: Die Herstellung und Bewertung von Batterierohstoffen sind abgeschlossen
- M5: Die Bewertung der Haupt- und Nebenprodukte aus der thermischen Behandlung ist erfolgt
- M6: Das Konzept für ein Entscheidungshilfesystem ist erstellt
- M7: Die Handlungsempfehlung zur Umsetzung des Entscheidungshilfesystems ist erarbeitet

3 Projektergebnisse

Die nachfolgenden fünf Unterkapitel präsentieren die Projektergebnisse entsprechend der in der Projektskizze definierten Arbeitspakete. In jedem Abschnitt werden die wesentlichen Erkenntnisse, identifizierten Herausforderungen sowie die erreichten Ergebnisse umfassend beschrieben. Zu Beginn jedes Unterkapitels erfolgt eine kurze Darstellung des Zieles und der gewählten Vorgehensweise. Zusätzlich wird jeweils auf die zentrale Aussage und die praktische Relevanz der Resultate in einer Textbox eingegangen.

3.1 Recherche

In den folgenden drei Abschnitten werden drei wichtige Aspekte von NMC-LIB detailliert erläutert, die zur Bewertung der aktuellen Marktsituation notwendig sind: Marktanalyse, technische und wissenschaftliche Grundlagen sowie rechtliche Rahmenbedingungen.

3.1.1 Marktanalyse – Zahlen, Größe, Teilnehmer

Kernbotschaft und Praxisbezug

Die Analyse des globalen Batteriemarkts zeigt, dass die Lieferketten für Rohstoffe von NMC-Lithium-Ionen-Batterien (NMC-LIB) derzeit äußerst fragil sind. Vor diesem Hintergrund ist der konsequente Aufbau von Recyclingkapazitäten zur Gewinnung hochwertiger Sekundärrohstoffe am Ende der Batterielebensdauer unerlässlich. Nur so lassen sich die langfristige Rohstoffverfügbarkeit sichern und die europäische Souveränität im Batteriesektor stärken.

Gleichzeitig verdeutlicht der Blick auf die aktuelle Marktsituation, dass sich Batteriechemien kontinuierlich weiterentwickeln. Technologischer Fortschritt führt dabei zu fortlaufenden Veränderungen in Zusammensetzung, Leistungsfähigkeit und Einsatzbereichen von Batterien. Insgesamt ist der Batteriemarkt durch eine hohe Dynamik gekennzeichnet, was eine kontinuierliche Beobachtung erforderlich macht, um Marktveränderungen frühzeitig zu erkennen und angemessen darauf reagieren zu können.

Marktgröße

Das Segment der Elektrowerkzeuge und tragbaren Haushaltsanwendungen gilt als starker Wachstumsmarkt für die nächsten Jahre, mit jährlichen Wachstumsraten von 15–20 % (Fraunhofer, 2022). Im Jahr 2021 lag der Marktwert der verkauften LIB-Zellen bei etwa 50–60 Milliarden EUR. Angesichts des erwarteten Marktwachstums könnte dieser Wert bis 2030 auf über 200–300 Milliarden EUR ansteigen. Derzeit belaufen sich die durchschnittlichen Zellkosten moderner LIB auf rund 125 EUR/kWh. Viele Prognosen rechnen bis 2030 mit einem Rückgang auf etwa 50–80 EUR/kWh. Allerdings berücksichtigen diese Vorhersagen häufig noch nicht die Preisanstiege bei Batterierohstoffen, die im vergangenen Jahr beobachtet wurden (Fraunhofer, 2022). Die Herstellungskosten von Lithium-Ionen-Zellen machen mit etwa 10–27 EUR/kWh nur einen geringen Anteil an den Gesamtkosten aus. Für 2030 wird die industrielle Wertschöpfung durch Zellproduktion (exklusive Materialkosten) auf rund 20 Mrd. EUR in Europa und 82 Mrd. EUR weltweit geschätzt. Ergänzende Marktsegmente wie die Zell-zu-Pack-

Montage (ca. 17 EUR/kWh) und der Maschinen- und Anlagenbau gewinnen ebenfalls an Bedeutung. Letzterer wird durch den globalen Aufbau hochautomatisierter Zellfabriken getrieben, wofür weltweit bis 2030 Investitionen in Höhe von rund 180 Mrd. EUR erwartet werden – davon entfallen etwa 44 Mrd. EUR auf Europa und über 12 Mrd. EUR auf Deutschland (Fraunhofer, 2022).

In den letzten zehn Jahren sind die Kosten für LIB stark gesunken – von rund 710 EUR/kWh auf unter 125 EUR/kWh im Jahr 2023. Treiber waren technologische Fortschritte, Skaleneffekte und Innovationen. Kostengünstige Zellchemien wie Lithium-Eisenphosphat (LFP) haben dabei eine zentrale Rolle gespielt; deren Preise fielen 2023 erstmals unter 90 EUR/kWh (International Energy Agency, 2024).

Steigende Rohstoffpreise führten 2022 kurzzeitig zu höheren Batteriepreisen, aber 2023 sanken die Preise wieder – unter anderem durch Angebotsausweitung und geringere Nachfrage, besonders in China. Der Rohstoffanteil an den Gesamtkosten ist gestiegen, wodurch Batteriekosten anfälliger für Preisschwankungen bei Lithium, Kobalt und Nickel sind. Regional sind die Preise in China am niedrigsten, mit einem Aufschlag von 10–20 % in Europa und den USA. Langfristig zeigt sich eine Annäherung der Preise zwischen den Regionen (International Energy Agency, 2024).

Darstellung der Lieferkette

In Abbildung 3.1 sind die Kathodenaktivmaterialien in Bezug auf die gesammelten Altbatterien im Jahr 2020 abgebildet. Die verschiedenen Kathodenformen weisen unterschiedliche Stöchiometrien und Kristallstrukturen auf, welche die Eigenschaften des Batterietyps bestimmen und folglich die vorgesehenen Endanwendungen. Zum Beispiel hat LCO eine hohe volumetrische Energiedichte, die zu einer weit verbreiteten Verwendung auf dem Markt für Unterhaltungselektronik geführt hat, während Kathoden des Typs NMC mit ihrer hohen Energiedichte und guten Zyklierbarkeit — neben LFP mit ihrer Sicherheit, langen Zykluslebensdauer und niedrigen Kosten — die meisten Märkte für Elektrofahrzeuge besetzt haben (Bachér, Jenu & Kajolinna, 2025). Die derzeit am häufigsten verwendeten Kathodenchemikalien sind Lithium-Kobaltoxid $LiCoO_2$ (LCO), Lithium-Eisenphosphat $LiFePO_4$ (LFP), Lithium-Manganoxid $LiMn_2O_4$ (LMO), Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid $LiNi_xCo_yAl_1$-x-yO_2 (NCA) und Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid $LiNi_xMn_yCo_1$-x-yO_2 (NMC). Aufgrund der Vorteile und weiterhin steigenden Nachfrage fokussiert sich dieses Projekt auf NMC-LIB, welche im Folgenden analysiert werden.

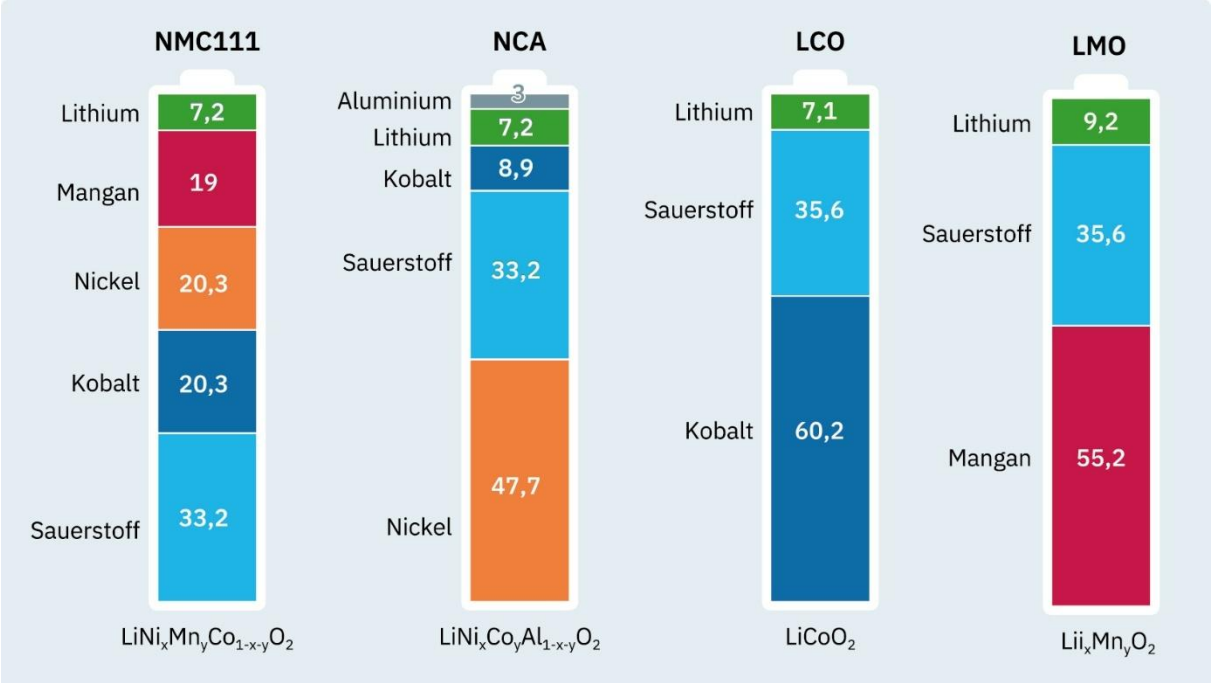


Abbildung 3.1: Massenanteile der vier wichtigsten Kathodenaktivmaterialien in Bezug auf die gesammelten Altbatterien im Jahr 2020. (RWTH Aachen Universität, BLB TU Braunschweig & VDMA, 2021)

Grundsätzlich kann der Lebenszyklus von NMC-LIB – wie in Abbildung 3.2 dargestellt – in verschiedene Abschnitte unterteilt werden. Die globale Batterie-Lieferkette ist sehr komplex und beginnt mit der Gewinnung wichtiger Rohstoffe wie Lithium, Nickel, Mangan und Kobalt im Bergbau. Diese Rohstoffe werden zu hochreinen Chemikalien verarbeitet, aus denen Batteriebestandteile wie Kathoden, Anoden, Elektrolyte und Separatoren hergestellt werden. Diese Bestandteile werden zu Batteriezellen und anschließend zu Batteriepaketen zusammengebaut (International Energy Agency, 2024). Wie in diesem Projekt vorgesehen, werden die Batterien in ihrer Nutzphase in Powertools verwendet. Nach Erreichen des Lebensendes werden die Batterien einer Sammlung zugeführt, transportiert und sortiert. Für die anschließende Entsorgungskette gibt es die Optionen zur direkten Wiederverwendung, zur Wiederinstandsetzung, zur Wiederaufarbeitung oder zur stofflichen Verwertung (engl.: Recycling).

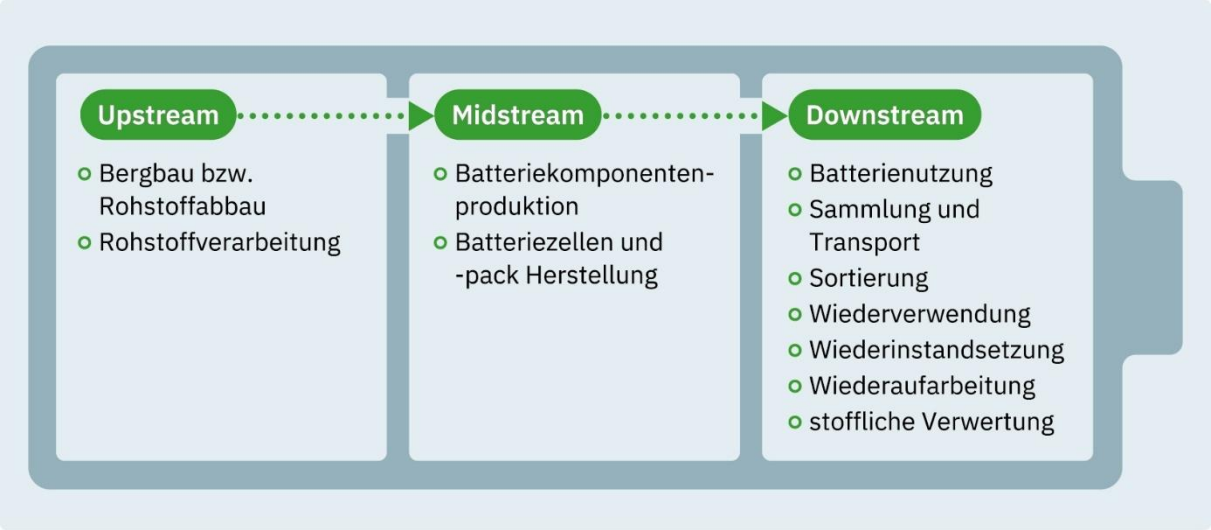


Abbildung 3.2: Lebenszyklus von NMC-LIB.

Der Abbau der für NMC-LIB relevanten Rohstoffen (Nickel, Mangan und Kobalt) ist geografisch stark konzentriert: Australien ist beim Abbau von Lithium führend, die Demokratische Republik Kongo beim Abbau von Kobalt, Indonesien bei Nickel und Südafrika beim Abbau von Mangan (siehe Abbildung 3.3). In Indonesien wurden zudem moderne Verfahren entwickelt, um Nickel in batteriefähige Zwischenprodukte umzuwandeln.
Ein erheblicher Anteil der insgesamt geförderten Menge dieser Rohstoffe wird jedoch für andere Produkte als Batterien verwendet. Besonders auffällig ist, dass große Mengen von Nickel und Mangan in nicht batterierelevante Anwendungen fließen. Daher haben Länder mit hoher Produktion möglicherweise nur begrenzten Einfluss auf die Lieferketten von Batteriematerialien. Zudem besteht eine hohe Unsicherheit in den Daten zur Versorgung, insbesondere bei Kobalt und Nickel, sowohl auf der Ebene der Rohstoffe als auch bei den verarbeiteten Materialien (Cheng, Fuchs, Karplus & Michalek, 2024). Abbildung 3.3 aufgeführt (International Energy Agency, 2024).

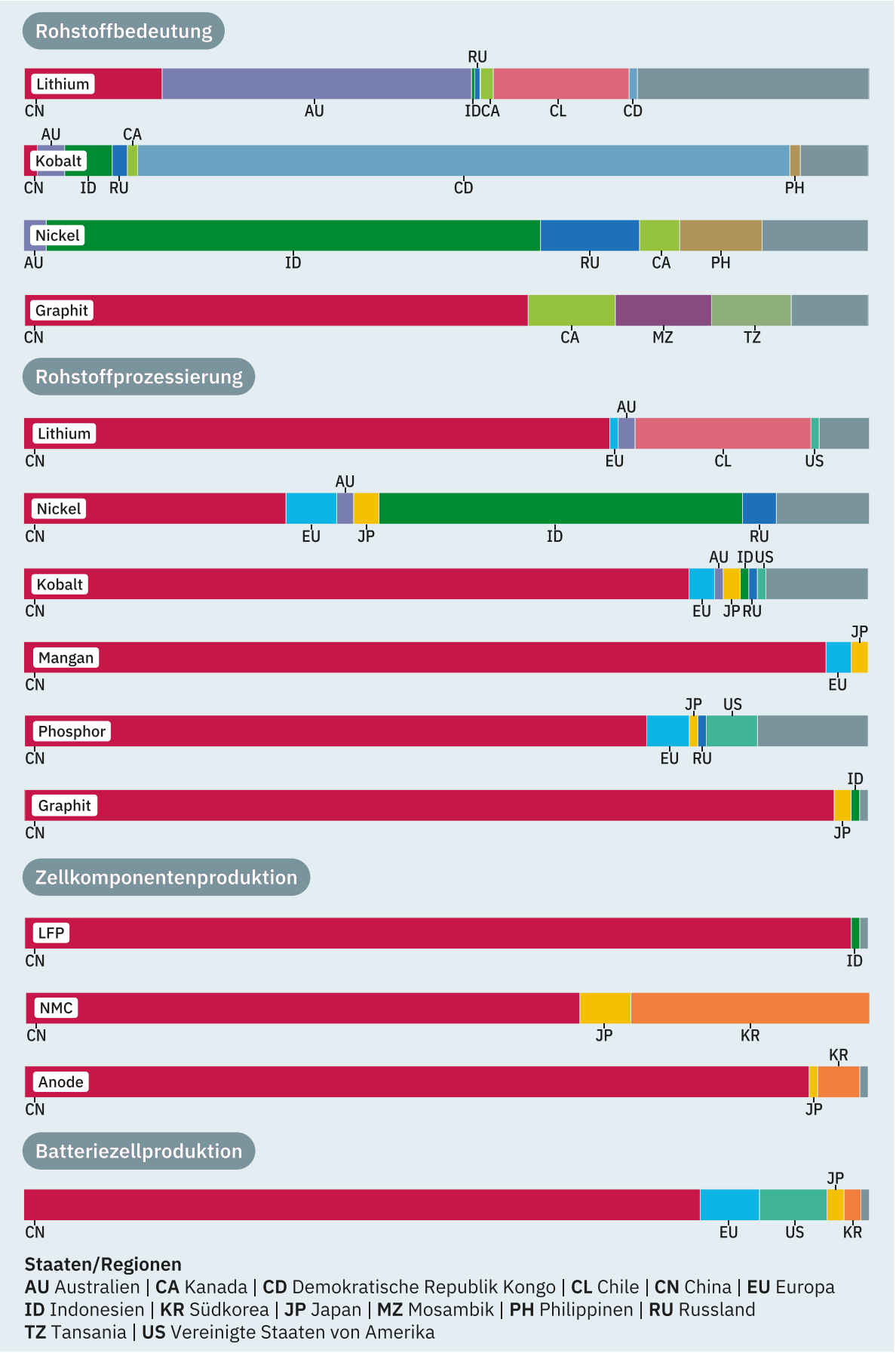


Abbildung 3.3 Geografische Verteilung der globalen Batterie Lieferkette. (International Energy Agency, 2025; Fraunhofer ISI, 2025)

Da ein erheblicher Teil der geförderten Rohstoffe nicht in die Batterieproduktion gelangt, gewinnt die nachgelagerte Materialverarbeitung innerhalb der Lieferkette zunehmend an Bedeutung und wird zum entscheidenden Faktor für die Verfügbarkeit von Batteriematerialien. China dominiert die nachgelagerten Stufen der Lieferkette, einschließlich Raffinierung, Materialherstellung und Zellproduktion, insbesondere bei Grafit, Kathoden- und Anodenmaterialien. Weitere wichtige Akteure sind Korea (Kathodenmaterialien), die USA (EV-Produktion) sowie europäische Länder wie Polen, Ungarn und Finnland. Die gesamte geografische Verteilung ist in.

Die geografische Verteilung zeigt, dass Europa in der gesamten Lieferkette für Batterien in hohem Maße von anderen Ländern abhängig ist.

Batteriezellen Produktion in Deutschland

Gemäß der Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien fallen Batterien aus Powertools in die Kategorie der Gerätebatterien (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2023). Nach Artikel 3 Absatz 1, Punkt 9 ist eine Gerätebatterie eine gekapselte Batterie mit einem Gewicht von maximal 5 kg, die nicht speziell für industrielle Anwendungen, Elektrofahrzeuge, leichte Verkehrsmittel oder Starterbatterien ausgelegt ist.

Gerätebatterien in Powertools bestehen meist aus Batteriepacks, die aus Rundzellen, seltener prismatischen Zellen oder Pouch-Zellen, gefertigt werden. In Powertools dominieren Rundzellen des Typs 18650, die aufgrund ihrer hohen Energiedichte und Kosteneffizienz weit verbreitet sind (VDMA Batterieproduktion, 2020). Rundzellen des Typs 21700, die bereits in der Elektromobilität etabliert sind, kommen allerdings auch zunehmend in Powertools zum Einsatz. Die Gestaltung der Batteriepacks variiert stärker als die standardisierten Rundzellen. Die Gehäuse bestehen überwiegend aus Hartkunststoff (Brüning et al., 2023).

Die Kapazität einer Batterie, angegeben in Ampere-Stunden (Ah) oder Milliampere-Stunden (mAh), beschreibt die gespeicherte Energiemenge. Die Nennenergie, angegeben in Wattstunden (Wh) oder Kilowattstunden (kWh), gibt die gesamte verfügbare Energie an. Eine Analyse von Brüning et al. (2023) auf der Webseite der Einzelhandelskette Saturn (Herbst 2020) zeigt eine große Vielfalt an Powertoolbatterien mit unterschiedlichen Kapazitäten, Nennspannungen und Entnehmbarkeitsoptionen. Die Auswertung fokussiert sich auf Powertoolbatterien und schließt Kategorien wie Balance Boards, Saugroboter, Powerbanks, Notebooks, Tablets, Smartphones und Sicherheitstechnik aus.

Tabelle 3.1: Übersicht von Eigenschaften von Powertool Gerätebatterien am Markt im Jahr 2020. (Brüning et al., 2023)

Gerätetypen	Nenn-energie [Wh] (min)	Nenn-energie [Wh] (max)	Span-nung [V] (min)	Span-nung [V] (max)	Kapazi-tät [mAh] (min)	Kapazi-tät [mAh] (max)	i.d.R. ent-nehm-bar
Sägen	108	216	18	36	6.000	6.000	ja/nein
Werkzeug gesamt	4,7	216	3,6	36	1.300	6.000	ja/nein
Bohrer und Schrauber	4,7	120	3,6	20	1.300	6.000	ja/nein
Baustrahler	14,8	108	3,7	18	4.000	6.000	ja/nein
Schleifer	14,4	90	3,6	18	4.000	5.000	ja/nein
Handstaub-sauger	21,6	51,1	10,8	25,6	2.000	2.000	nein
Staubsauger	33,6	46	16	21,9	2.100	2.100	ja/nein

Festzustellen ist, dass seit der Erhebung der Stichprobe von Brüning (2023) im Jahr 2020 sich die Batterietechnologie weiterentwickelt hat, sodass mittlerweile auch Batterien mit bis zu 18 V Spannung und 15.000 mAh auf dem Markt angeboten werden (Robert Bosch Powertools GmbH). Mit fortschreitender Forschung ist ein Anstieg der Batteriekapazitäten nicht ausgeschlossen.

Einige Hersteller bieten interoperable Batteriesysteme an, bei denen Batterien in verschiedene Geräte eines Herstellers oder sogar markenübergreifend (z. B. BOSCH AMPShare powered by BOSCH, Makita LXT) passen. Dies erhöht die Flexibilität und senkt die Kosten für Verbraucher:innen.

Da die Batterieproduktion derzeit stark auf China konzentriert ist, spielt Europa – und damit auch Deutschland – bislang keine bedeutende Rolle. Es bestehen jedoch Pläne, die Produktion nach Deutschland zu verlagern, um Zellkosten zu senken und die Wettbewerbsfähigkeit von Elektrofahrzeugen zu stärken. In der untenstehenden Tabelle sind die Standorte sowie (geplanten) Kapazitäten aufgeführt. Diese Zahlen unterliegen allerdings häufigen Anpassungen, da zahlreiche Projekte und Investitionen in die lokale Batterieproduktion infolge globaler Wettbewerbsbedingungen und hoher lokaler Kosten vorübergehend ausgesetzt werden. So musste der Mutterkonzern Northvolt zum Beispiel Insolvenz anmelden, wodurch ein Ausbau der Batterieproduktionskapazät in Heide unsicher bleibt (Rauterberg, 2025). Ein Rückgang von Investitionen und Projekten seit 2024 wird auch vom Batterieherstellerverband RECHARGE festgestellt (Advanced Rechargeable & Lithium Batteries Association [RECHARGE], 2025).

Tabelle 3.2: (Geplante) Batteriezellen Hersteller in Deutschland (Stand Oktober 2025). (Bockey, 2025)

Unternehmen	Standort	GWh
Leclanché	Willstätt	2,5 GWh
PowerCo	Salzgitter	20 GWh (2026)
CATL	Erfurt	14 GWh (202X)
Tesla	Grünheide	X GWh (202X)
EAS	Nordhausen	0,5 GWh (202X)
Lyten	Heide	X GWh (202X)
Univer Cell	Flintbeck	8 GWh (2029)

Verwendung der Batterien in Elektrowerkzeugen

Die Powertoolbranche in Deutschland ist trotz der Dominanz einiger großer Hersteller und Marken vielfältig und differenziert strukturiert. Es gibt eine Unterscheidung zwischen klassischen Herstellern von Elektrowerkzeugen und Handelsunternehmen sowie zwischen den Marktsegmenten Profibedarf und Heimwerker. Die räumliche Verteilung zeigt eine klare Dominanz im Südwesten Deutschlands, insbesondere in Baden-Württemberg und der Region Stuttgart. In Tabelle 3.3 ist eine Übersicht der Unternehmensstruktur mit Unternehmensbeispielen dargestellt (Hans Böckler Stiftung, 2016).

Die Unternehmensstruktur der Branche lässt sich in Cluster einteilen:

- **Powertools Global Player mit Vollsortiment**: Diese weltweit tätigen Konzerne umfassen sowohl in Deutschland produzierende Hersteller als auch Vertriebszentralen von Konzernen aus Fernost und den USA.
- **Spezialisierte Unternehmen im Profibereich**: Diese Hersteller, deren Produkte klar im Profisegment positioniert sind, haben fast alle ihren Sitz in Deutschland. Eine Ausnahme bildet der global tätige, spezialisierte Konzern Hilti aus Liechtenstein.
- **Kleine hochspezialisierte Nischenanbieter im Profibereich**: Diese Gruppe besteht aus deutschen Unternehmen mit weniger als 100 Mitarbeitern, die sich stark auf spezifische Branchen und Anwendungen spezialisiert haben.
- **Handelsunternehmen mit Zukauf von Markenherstellern und Auftragsfertigern**: Große Handelsunternehmen wie Würth und BTI kaufen Elektrowerkzeuge von klassischen Herstellern und Auftragsfertigern aus Fernost und Osteuropa zu und verfügen über eigene Produktentwicklungskapazitäten und Vertriebsschienen, insbesondere im Profibereich.

Tabelle 3.3: Unternehmensstruktur der Elektrowerkzeug-Branche in Deutschland mit Unternehmensbeispielen. (Hans Böckler Stiftung, 2016)

Bereich	Unternehmen
Powertools Global Player mit Vollsortiment	Robert Bosch Powertools GmbH (anteilig in Deutschland produzierend)
	Metabo (anteilig in Deutschland produzierend)
	Hitachi
	Makita
	Stanley Black & Decker
Spezialisierte Unternehmen im Profibereich	Eibenstock
	Fein
	Festool
	Hilti
Kleine, hochspezialisierte Nischenanbieter im Profibereich	Alki-Technik
	Baier
	Duss
	Lösomat
Handelsunternehmen mit Zukauf von Markenherstellern und Auftragsfertigern	BTI
	Würth

Stoffliche Verwertungskapazitäten

Der europäische Markt für das Recycling von LIB befindet sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium und bietet erhebliches Wachstumspotenzial. Zu den in Europa und Deutschland industriell etablierten Recyclinganlagen mit einer Jahreskapazität von mehr als 10.000 Mg zählen, unter anderem ecobat, Glencore und Primobius (Kresse, Bastian, Bookhagen & Frenzel, 2022). Auch kleinere Pilotanlagen planen ihre Kapazität maßgeblich innerhalb von kurzer Zeit zu steigern. Zum Beispiel plant das Start-up Cyclib ihre Kapazitäten bis 2026 auf 7.500 Mg pro Jahr auszuweiten (Heimes, 2024). Dabei können die Anlagen eine Recyclingeffizienz von 90–98% vorweisen. Die Hauptquelle für das Recycling von LIB sind derzeit jedoch nicht Altbatterien, sondern Abfälle aus der Batterieproduktion. Dies wird sich voraussichtlich ab 2029 ändern. Deutschland hat derzeit die höchste Konzentration an Recyclingunternehmen in Europa, was auf die hohe Dichte an Automobilherstellern und die gestiegene Nachfrage nach Batterien zurückzuführen ist (Heimes, 2024). Eine genaue Übersicht der Recyclingstandorte in Deutschland ist in Tabelle aufgeführt.

Tabelle 3.4: Batterie Recycling Standorte in Deutschland und Recyclingkapazitäten. (Soldan Cattani, Bajaber & Heimes, 2025)

Unternehmen	Standort	Recyclingverfahren	Tonnen pro Jahr (Battery News)	Tonnen pro Jahr (andere Quellen)
Accurec	Krefeld	Mechanisch-hydrometallurgisches Recycling	4.500; 20.000 (ab 2027)	3.000
Aurubis	Hamburg	Mechanisch-hydrometallurgisches Recycling	n.b.	
BASF	Schwarzheide	Mechanisch-hydrometallurgisches Recycling	15.000 (ab 20XX)	
CellCircle	Randersacker	Direktes Recycling	25.000	
Cylib	Aachen	Mechanisch-hydrometallurgisches Recycling	120; 10.000 (ab 2027)	
Cylib	Dormagen	Mechanisch-hydrometallurgisches Recycling	n.b.	30.000 (ab2027)
Duesenfeld	Wendeburg	Direktes Recycling	3.000; 5.000 (ab 2026)	3000
ecobat	Hettstedt	Mechanisches Recycling	20.000	10.000 (inkl. Anlagen in USA und England)
ERLOS Produktion und Montagen GmbH	Zwickau	Mechanisches Recycling	3.500	3500
Fortum	Kirchardt	Mechanisch-hydrometallurgisches Recycling	3.000	3.000
H. C. Starck	Goslar	Hydrometallurgisches Recycling	20.000 (ab 2029)	
Iondrive	Aachen	Hydrometallurgisches Recycling	3.000 (ab 2029)	
Glencore	Magdeburg	Mechanisches Recycling	10.000; 30.000 (ab 20XX)	10.000
Mercedes-Benz Group	Kuppenheim	Mechanisch-hydrometallurgisches Recycling	2.500	2.500

Unternehmen	Standort	Recyclingverfahren	Tonnen pro Jahr (Battery News)	Tonnen pro Jahr (andere Quellen)
Nickelhütte Aue	Aue	Mechanisch-hydrometallurgisches sowie Pyrometallurgisches Recycling	10.000	7.000
Primobius	Hilchenbach	Mechanisch-hydrometallurgisches Recycling	2.500	3.000
Primobius	Kuppenheim	Mechanisch-hydrometallurgisches Recycling	2.500	
Redux	Bremerhaven	Mechanisches Recycling	10.000	
Pure Battery	Hagen	Hydrometallurgisches Recycling	2.500; 15.000 (ab 20XX)	2.500
Prezero - RE.LION.BAT	Meppen	Mechanisch Recycling	30.000	
Tozero	München	Hydrometallurgisches Recycling	500; 30.000 (ab 20XX)	
WHW Recycling	Baudenbach	Mechanisch Recycling (eigene Einschätzung)	5.000	7.000
BMW encory	Salching	Direktes Recycling	n.b.	

Ausblick Marktsituation

In Zukunft wird der Bestand an in Gebrauch befindlichen Materialien aus NMC-LIB weltweit deutlich zunehmen, insbesondere aufgrund der steigenden Nachfrage nach Elektrofahrzeugen. China wird dabei voraussichtlich weiterhin den größten Anteil an NMC-LIB nutzen und damit auch die höchsten Materialbestände aufweisen. Auch Südkorea und die USA werden signifikante Mengen an NMC-Materialien im Umlauf haben. Besonders hohe Werte werden bei Aluminium, Mangan, Grafit/Kohlenstoff, Kupfer, Stahl und Lithium erwartet. In Europa wird Norwegen führend bei den Beständen dieser Materialien sein.

Mit dem zunehmenden Einsatz von Batterien wächst auch das Potenzial zur Rückgewinnung von Materialien nach dem Ende der Lebensdauer. China wird hierbei eine führende Rolle spielen, gefolgt von den USA und Deutschland. Die Rückgewinnungsraten für Materialien wie Mangan und Aluminium sind sehr hoch, während Lithium weiterhin eine Herausforderung darstellt, da seine Rückgewinnungsrate niedriger ist. Dennoch könnten durch optimierte Recyclingprozesse zukünftig bis zu 60 % des Bedarfs an neuen Materialien gedeckt werden (Greenwood, Wentker & Leker, 2021).

Parallel dazu wird auch das Abfallaufkommen aus NMC-LIB erheblich ansteigen, vor allem in Asien und Europa. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, effektive Recyclinglösungen zu entwickeln, um wertvolle Rohstoffe zurückzugewinnen und die Belastung für Umwelt und Ressourcen zu minimieren.

Für das Jahr 2040 besteht insbesondere in China, Europa und den USA ein großes Potenzial für eine nahezu geschlossene Kreislaufwirtschaft bei Kobalt, einem zentralen Bestandteil von NMC-LIB. Ein entscheidender Treiber dieser Entwicklung ist der erwartete Rückgang des Kobaltgehalts in Batteriezellen, wodurch sich Angebot und Nachfrage langfristig annähern könnten. In der Praxis bestehen jedoch erhebliche Hürden: Zum einen liegt die Nachfrage oft geografisch entfernt von den bestehenden Produktions- und Recyclingkapazitäten, was den Aufbau regionaler Verarbeitungs- und Recyclinginfrastrukturen notwendig macht. Zum anderen stellen wirtschaftliche Faktoren eine Barriere dar: Obwohl Kobalt wegen seines hohen Wertes ein wichtiges Recyclingziel ist, könnte der Trend zu kobaltärmeren oder kobaltfreien Batterien die Rentabilität des Recyclings gefährden. Eine funktionsfähige Kreislaufwirtschaft erfordert daher gezielte politische Maßnahmen, um Recycling wirtschaftlich tragfähig zu machen (Dunn, Slattery, Kendall, Ambrose & Shen, 2021).

China und die EU haben bereits entsprechende Regulierungen eingeführt, etwa durch Anforderungen an Recyclingquoten, Design-for-Recycling und Produzentenverantwortung. In anderen Regionen wie den USA fehlen bislang verbindliche Regelungen, obwohl erste Initiativen zur Kostenreduktion des Recyclings bestehen. Trotz dieser Unterschiede wird in den kommenden 20 Jahren eine große Zahl an Batterien ihr Lebensende erreichen, was eine wichtige Chance für den Aufbau eines geschlossenen Materialkreislaufs bietet. Insbesondere für NMC-LIB bedeutet dies: Eine effiziente Rückgewinnung von Kobalt, Nickel und Mangan kann nicht nur die Abhängigkeit von Primärrohstoffen verringern, sondern auch ökologische Vorteile bringen – vorausgesetzt, Politik, Wirtschaft und Forschung gestalten die Rahmenbedingungen entsprechend (Dunn et al., 2021).

3.1.2 Technik und Wissenschaft

Kernbotschaft und Praxisbezug

Die Entsorgungskette für EoL-NMC-LIB aus Powertools in Deutschland ist streng reguliert und organisatorisch gut etabliert. Die derzeit vorgesehenen Entsorgungswege konzentrieren sich jedoch überwiegend auf eine sichere Sammlung, den regelkonformen, sicheren Transport sowie die stoffliche Verwertung der Batterien.
Dabei wird die Abfallhierarchie bislang nur unzureichend berücksichtigt, da alternative Re-Strategien wie die direkte Wiederverwendung (Reuse), die Reparatur (Repair), die Wiederinstandsetzung (Refurbishment) oder die Wiederaufarbeitung (Remanufacturing) im Bereich von NMC-LIB aus Powertools bislang keine Anwendung finden. Die Ursachen hierfür liegen vor allem in fehlenden tragfähigen Geschäftsmodellen, einer bislang unzureichenden wirtschaftlichen Attraktivität, rechtlichen und sicherheitstechnischen Unsicherheiten sowie in den stark etablierten Entsorgungs- und Organisationsstrukturen, die primär auf eine stoffliche Verwertung ausgerichtet sind.
Eine juristische Einordnung von „Second-Life"-Anwendungen zeigt, dass Betriebe zur Wiederinstandsetzung von Batterien nach aktueller EU-Rechtslage nicht als Hersteller gelten, wenn sie lediglich ihren Service für Dritte anbieten und die Batterie nicht selbst in Verkehr bringen. Demnach würde der Betrieb auch nicht einer erweiterten Herstellerverantwortung unterliegen, sondern der Auftraggeber.

Generell werden die Schritte, die zu einem Recycling von LIB und damit einer Rückgewinnung der Rohstoffe führen, in die folgenden Schritte eingeteilt: Sammlung, Transport, Sortierung und Vorbereitung zur Wiederverwendung oder Verwertung.

Sammlung

Gemäß dem deutschen Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (Batterierecht-Durchführungsgesetz – BattDG) sind Verbraucher verpflichtet, gebrauchte, ausgediente oder beschädigte Altbatterien aus Powertools an geeignete Rücknahmesysteme abzugeben. Die Rückgabe ist für Verbraucher unentgeltlich und bundesweit flächendeckend gewährleistet. Altbatterien dürfen nicht im Hausmüll entsorgt werden, da dies umwelt- und sicherheitsgefährdend ist. Die Abgabe kann an folgenden Stellen erfolgen:

- *Vertreiber/Einzelhandel:* Verkaufsstellen wie Baumärkte oder Elektronikfachgeschäfte nehmen Altbatterien unabhängig vom Kaufort kostenfrei zurück, oft über Sammelboxen oder spezielle Behälter für beschädigte Batterien.
- *Kommunale Wertstoffhöfe:* Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger bieten Sammelstellen für Altbatterien an, die für Verbraucher leicht zugänglich sind.
- *Zertifizierte Recyclingbetriebe:* In Ausnahmefällen können Verbraucher Batterien direkt an Behandlungsanlagen abgeben, insbesondere bei größeren Mengen oder speziellen Batterietypen.
- *Herstellereigene Rücknahmesysteme:* Hersteller oder gemeinschaftliche Systeme, wie die Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien, stellen Rücknahmemöglichkeiten bereit, z. B. über Sammelboxen in Verkaufsstellen oder spezielle Rücknahmeprogramme.

Für beschädigte oder defekte Batterien gelten besondere Sicherheitsvorkehrungen, wie die Abgabe in speziellen Schutzbehältern, um Risiken wie Kurzschlüsse oder Brände zu minimieren. Hersteller und Vertreiber tragen die Kosten für Rücknahme und Recycling, um eine umweltverträgliche Entsorgung gemäß den Vorgaben des BattDG zu gewährleisten.

Transport

Der Transport von LIB von Sammelstellen zu Verwertungsbetrieben erfolgt in dafür zugelassenen Transportbehältern gemäß den Vorschriften des Gefahrgutrechts. LIB werden gemäß dem ADR (frz.: Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route; dt.: Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße) als Gefahrgut der Klasse 9 (verschiedene gefährliche Stoffe und Gegenstände) eingestuft, unabhängig von ihrer Energiedichte. Für Batterien mit einer Energiedichte über 100 Wh gelten strengere Anforderungen, während Zellen bis 20 Wh und Batterien bis 100 Wh unter bestimmten Bedingungen (Sonderbestimmung 188 des ADR) als „ausgenommen“ transportiert werden können, sofern sie in robusten Verpackungen und mit entsprechender Kennzeichnung transportiert werden.

Die maßgeblichen Regelungen für den sicheren Transport von LIB sind im ADR festgelegt, insbesondere in den Verpackungsanweisungen (z. B. *(P903, P908, P909, P910, P911)*), die je nach Zustand der Batterien (intakt, beschädigt, defekt oder zur Entsorgung bestimmt) variieren. Ergänzend dazu beschreibt die Norm DIN EN IEC 62281 „Sicherheit von primären und sekundären Lithiumzellen und -batterien beim Transport“ technische Sicherheitsanforderungen und Testmethoden, um die Widerstandsfähigkeit der Batterien gegen Transportbedingungen wie Vibrationen, Stöße oder Temperaturschwankungen zu gewährleisten.

Vor dem Transport müssen alle LIB die Tests nach UN 38.3 (UN-Handbuch für Prüfungen und Kriterien, Teil III, Abschnitt 38.3) bestehen. Diese Tests umfassen acht Prüfungen, darunter Höhen-, Temperatur-, Vibrations-, Stoß- und Kurzschlusstests, um sicherzustellen, dass die Batterien transportfähig sind. Ein Testzusammenfassungsbericht (engl. Test Summary) gemäß UN 38.3 muss verfügbar sein und auf Anfrage (z. B. bei Kontrollen) vorgelegt werden können. Dieser Bericht enthält Informationen wie Batterietyp, Hersteller und Testergebnisse. Während des Transports ist ein Gefahrgutbegleitdokument nach ADR erforderlich, dass Angaben zu UN-Nummer, Verpackungsgruppe und Transportkategorie enthält.

Der Transport von gesammelten LIB wird organisiert, sobald bestimmte Abholmassen an den Sammelstellen erreicht sind. In Deutschland regelte bisher das Batteriegesetz (BattG) die Rücknahme und Entsorgung von Batterien. Seit August 2025, gilt in Deutschland das neue BattDG. Gemäß organisatorischen Vorgaben, etwa von Rücknahmesystemen wie der Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien, erfolgt die Abholung typischerweise, wenn an Sammelstellen von Vertreibern oder freiwilligen Rücknahmestellen eine Abholmasse von 90 kg angefallen und gemeldet wurde. Bei öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern oder Behandlungsanlagen wird der Transport in der Regel bei einer Abholmasse von 180 kg durchgeführt. Diese Mengengrenzen können je nach Rücknahmesystem oder regionalen Vorgaben variieren und sollten bei den jeweiligen Betreibern verifiziert werden.

Sortierung

Die Sortierung und Identifizierung von Altbatterien konzentriert sich derzeit primär auf die Trennung von LIB von anderen Batterietypen, wie Blei-Säure-, Nickel-Metallhydrid- (NiMH) oder Nickel-Cadmium- (NiCd) Batterien. Diese Trennung erfolgt überwiegend manuell durch geschultes Personal und basiert auf äußeren Merkmalen wie Kennzeichnungen (z. B. „Li-Ion“, „Pb“, „NiMH“, „NiCd“), Gehäuseformen, Gewicht oder Informationen zur Herkunft der Batterien (z. B. aus Elektrofahrzeugen, Unterhaltungselektronik oder Energiespeichersystemen). Aufgrund uneinheitlicher oder beschädigter Beschriftungen sowie der Vielfalt an Batterieformaten (zylindrisch, prismatisch, Pouch) ist die manuelle Sortierung jedoch fehleranfällig und zeitaufwendig, was Sicherheitsrisiken (z. B. Brände durch unsachgemäße Handhabung) oder ineffiziente Recyclingprozesse verursachen kann.

Um diese Phase zu verbessern, werden fortschrittliche Technologien entwickelt, darunter optische Erkennungsverfahren (z. B. Kamerasysteme mit KI-gestützter Bildverarbeitung zur Auslesung von Barcodes, QR-Codes oder Beschriftungen), Röntgenanalysen (z. B. Röntgenfluoreszenz (XRF) oder Röntgen-Durchstrahlung zur Bestimmung der Materialzusammensetzung) sowie weitere Methoden wie Nahinfrarotspektroskopie (NIR) und Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIPS; engl. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy = LIBS). Diese automatisierten Sortierverfahren zielen darauf ab, die Genauigkeit und Effizienz der Batterieidentifizierung zu erhöhen, indem sie Batterietypen, Zustand (intakt oder beschädigt) und teilweise sogar die chemische Zusammensetzung nicht-invasiv bestimmen.

Ein zentraler Aspekt für die Optimierung des Recyclingprozesses ist die Identifizierung der Kathodenchemie von LIB (z. B. LCO, NMC, LFP) vor dem mechanischen Zerkleinern. Eine frühzeitige Trennung nach Chemie verhindert die Vermischung unterschiedlicher Kathodenmaterialien in der sogenannten schwarzen Masse – dem pulverisierten Material, das nach dem Zerkleinern gewonnen wird. Diese Vermischung erschwert die Rückgewinnung von Wertstoffen wie Kobalt, Nickel oder Lithium, da verschiedene Batteriechemien spezifische Recyclingverfahren (z. B. hydrometallurgische oder pyrometallurgische Prozesse) erfordern. Nicht-invasive Analysemethoden wie XRF, LIBS oder elektrochemische Tests werden derzeit erforscht, um die Kathodenchemie zu bestimmen, sind jedoch noch nicht standardisiert oder wirtschaftlich für den großflächigen Einsatz geeignet.

Derzeitige Methoden zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Batterien oder Zellen setzen in der Regel voraus, dass die Batterien mechanisch zerkleinert werden, um die schwarze Masse zu isolieren. Diese wird anschließend mittels analytischer Verfahren wie Induktiv gekoppelter Plasma-Optischer Emissionsspektroskopie (ICP-OES), Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) oder XRF untersucht, um den Gehalt an Wertstoffen zu bestimmen.
Bei der Verarbeitung mehrerer Batterien mit unterschiedlichen Kathodenchemien liefert die Analyse der schwarzen Masse lediglich eine durchschnittliche Zusammensetzung, die hauptsächlich der Qualitätskontrolle dient, etwa zur Überprüfung der Eignung für nachfolgende Recyclingprozesse oder zur Erfüllung gesetzlicher Rückgewinnungsquoten (z. B. gemäß EU-Batterieverordnung).
Ohne eine vorgelagerte Identifizierung und Trennung einzelner Zellen oder Batterien nach ihrer Chemie können chemisch spezifische Recyclingprozesse nicht gezielt angewendet werden, was die Reinheit und Rückgewinnungsrate der Materialien einschränken.

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der derzeit bekannten Möglichkeiten der Batterieidentifizierung.

Tabelle 3.5: Übersicht der Sortiermöglichkeiten mit Vor- und Nachteilen. (Bachér et al., 2025)

Methode	Beschreibung	Vorteil	Nachteil
Kennzeichnung	Die Identifizierung erfolgt anhand der Markierungen auf dem Etikett. Wenn keine Zellchemie angegeben ist, kann der angegebene Spannungsbereich auf die Chemie hinweisen. Neben der manuellen Identifizierung und Sortierung wurde eine sensorgestützte Sortierung entwickelt, die das Etikett automatisch liest.	Einfache und schnelle Methode zum Sortieren unterschiedlich beschrifteter Batterien.	Die Qualität der Sortierung hängt ausschließlich von den Angaben auf dem Etikett ab. Wenn die Informationen unvollständig sind oder das Etikett abgenutzt ist, kann die Identifizierung nicht durchgeführt werden, was zu einer unvollständigen Sortierung führt.
Anwendungsbasierte Sortierung	Identifizierung und Sortierung beruhen auf der Annahme, dass bestimmte Chemikalien für bestimmte Endanwendungen verwendet werden. Die Sortierung kann durch manuelles oder mechanisches Sortieren nach Zelltyp (zylindrisch, pouch und prismatisch) sowie nach Zellgröße verbessert werden.	Einfache und schnelle Methode zur Gruppierung von Batterien mit unterschiedlichen Verwendungszwecken, Zellentypen und Größen.	Die Sortierung ist unvollkommen, da Li-Ionen-Batterien mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung in verschiedenen Endprodukten verwendet werden.
Spektroskopie	Der Batteriezellentyp wird mit invasiven und nicht-invasiven Spektroskopietechniken wie XRF, Raman, visuell, infrarot, ultraviolett oder Magnetismus bestimmt. Die Sensorfusion liefert eine Kombination von Daten, die mit KI verarbeitet werden können, um Zellen unterschiedlicher Chemie zu erkennen.	Potenzielle Erkennung und Sortierung von Batteriezellen anhand ihrer chemischen Zusammensetzung.	Die Zellhülle und insbesondere ihre Dicke können die Erkennung der chemischen Zusammensetzung beeinträchtigen. Es liegen nur begrenzte öffentliche Daten zur Wirksamkeit der Methode vor.

Methode	Beschreibung	Vorteil	Nachteil
Mikrocomputer gestützte Röntgenlaminographie	Bei dieser Methode wird eine Beutelzelle in einem Winkel auf einem rotierenden Rahmen befestigt. Die Röntgenquelle sendet einen Strahl auf die Probe, während ein Detektor 2D-Projektionen in verschiedenen Winkeln erfasst, aus denen ein 3D-Bild rekonstruiert.	Identifizierung der Zellchemie bei hoher Auflösung (0,5 µm) sowie Informationen zur Morphologie.	Die in der Entwicklung befindliche Labortechnik erfordert die Trennung der Batteriezellen vor der Analyse. Die Analyse kann aufgrund der vielen Schritte zeitaufwendig sein. Diese Methode wird für ebene Objekte (Pouch-Zellen) verwendet, nicht für zylindrische oder prismatische.
Analyse der Zusammensetzung der schwarzen Masse	Die Zusammensetzung der schwarzen Masse aus zerkleinerten Batteriezellen wird mit verschiedenen Techniken wie ICP-OES[1], XRF[2], XRD[3] oder SEM-EDS[4] analysiert.	Liefert die chemische Zusammensetzung der schwarzen Massenfraktion. SEM-EDS kann Informationen über die Morphologie der Probe liefern.	Die Batteriezelle muss zerstört und die schwarze Masse vor der Analyse von der Zelle getrennt werden. Die Zusammensetzung der einzelnen Zellen lässt sich nicht feststellen, es sei denn, sie werden zerbrochen und separat analysiert.

[1] **ICP-OES** – *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy*

[2] **XRF** – *X-ray Fluorescence*

[3] **XRD** – *X-ray Diffraction*

[4] **SEM-EDS** – *Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*

„Second-Life“-Anwendungen

Eine „Second-Life“-Anwendung von Produkten bezeichnet eine Verlängerung der Nutzungsphase von Produkten, nachdem deren primäre Nutzungsphase abgeschlossen ist. Gründe für das Ende der ersten Nutzungsphase können ein Abfall an Leistungswerten sein oder verschiedene Obsoleszenzgründe (technisch, ökonomisch oder psychologisch). Eine „Second-Life“-Anwendung kann durch verschiedene Re-Strategien erreicht werden (R3-R7 vgl. Potting et al., 2018). Ziel dieser Strategien ist dabei immer eine Verlängerung der Produktlebensdauer oder der Lebensdauer von Bauteilen des Produktes. Die Re-Strategien sind dabei in Ebenen angeordnet, die eine Hierarchie vorgeben. Je höher die Ebene der Hierarchie, desto ökologisch unvorteilhafter ist sie einzuordnen. Tabelle 3.6 gibt eine Übersicht über die benannten Re-Strategien und eine entsprechende Definition.

Tabelle 3.6: Definition "Second-Life"-Strategien.

Ebene	Re-Strategie Bezeichnung	Definition	Quelle
R3	Reuse (dt. Wiederverwendung)	„Wiederverwendung“ bezeichnet die Verwendung eines ausrangierten, aber noch brauchbaren Produkts für denselben Zweck durch einen anderen Nutzer.	Potting et al. (2018)
R4	Repair (dt. Reparatur)	„Reparatur“ bezeichnet den Vorgang, bei dem ein fehlerhaftes Produkt wieder in einen Zustand versetzt wird, in dem es seinen vorgesehenen Verwendungszweck erfüllen kann, entweder als Dienstleistung oder im Hinblick auf den späteren Wiederverkauf des reparierten Produkts	Potting et al. (2018)
R5	Refurbishment (dt. Wiederinstandsetzung[5])	„Wiederinstandsetzung“ bedeutet das Testen und gegebenenfalls Reparieren, Reinigen oder Modifizieren eines gebrauchten Produkts, um dessen Leistung oder Funktionalität zu verbessern oder wiederherzustellen oder um geltende technische Normen oder regulatorische Anforderungen zu erfüllen, mit dem Ergebnis, dass ein voll funktionsfähiges Produkt entsteht, das für einen Zweck verwendet werden kann, der mindestens dem ursprünglich vorgesehenen Zweck entspricht, und das weiterhin den geltenden technischen Normen oder regulatorischen Anforderungen entspricht, die ursprünglich in der Entwurfsphase vorgesehen waren	Directorate-General for Financial Stability, Financial Services and Capital Markets Union [DG FISMA] (2025)

[5] Zur Trennscharfen Abgrenzung von Wiederaufarbeitung (engl. Remanufacturing) und Aufbereitung oder Wiederaufbereitung (engl. Refurbishment) wird im weiteren Verlauf des Textes statt Wiederaufbereitung das Synonym Wiederinstandsetzung verwendet.

Ebene	Re-Strategie Bezeichnung	Definition	Quelle
R6	Remanufacturing (dt. Wiederaufarbeitung)	„Wiederaufarbeitung“ bezeichnet einen standardisierten industriellen Prozess, der in Industrie- oder Fabrikumgebungen stattfindet und bei dem Produkte in ihren ursprünglichen neuwertigen Zustand und ihre ursprüngliche Leistungsfähigkeit oder einen besseren Zustand zurückversetzt werden und in der Regel mit einer kommerziellen Garantie auf den Markt gebracht werden	DG FISMA (2025)
R7	Repurpose (dt. Weiterverwendung)	Verwendung von ausrangierten Produkten oder deren Teilen in (neuen) Produkten mit einer anderen Funktion.	Potting et al. (2018)

Sollten in Bezug auf NMC-LIB aus Powertools eine „Second-Life“-Anwendungen (z.B. in Energiespeichern) in Betracht gezogen werden, ist die Bestimmung des Gesundheitszustandes der Batterie (engl.: State of Health, SoH)) sowie die Ladezustandskontrolle (engl.: State of Charge, SoC) erforderlich. Die Ermittlung des SoC stellt einen entscheidenden Indikator für die weitere Bearbeitung dar, um eine sichere Weiterverarbeitung, wie beispielsweise zur Wiederverwendung oder Reparatur, sicherzustellen. Der SoH gibt Auskunft über den umfassenden Zustand der Batterie (z. B. Restkapazität, Innenwiderstand) und wird durch elektrochemische Tests (z. B. Kapazitätsmessung, Impedanzspektroskopie), thermische Analysen oder, sofern verfügbar, das Auslesen des Batteriemanagementsystems (BMS) ermittelt. Das BMS liefert Daten wie Ladezyklen oder Fehlerprotokolle, ist jedoch nicht bei allen Batterien zugänglich. Die SoH-Bestimmung ist zeit- und kostenintensiv, da sie spezialisierte Messgeräte und Fachwissen erfordert. Sie ist jedoch entscheidend, um die Eignung für „Second-Life“-Anwendungen oder Wiederinstandsetzung zu bewerten und kann auch Recyclingprozesse durch eine vorgelagerte Sortierung optimieren. Eine Bewertung der Eignung der NMC-LIB für „Second-Life“-Anwendungen könnte von speziell dafür ausgerichteten Servicedienstleistern in Diagnosezentren erfolgen

Eine dokumentierte Wiederverwendung von NMC-Batteriezellen aus Powertool-LIB ist in Deutschland bislang nicht bekannt; dies dürfte vor allem auf technische, rechtliche oder wirtschaftliche Hürden zurückzuführen sein. Darüber hinausbringen „Second-Life“-Anwendungen dieser Batterien erhöhte sicherheitstechnische Risiken mit sich, da NMC-LIB über eine besonders hohe Energiedichte verfügen. Im europäischen Ausland, speziell Frankreich können hingegen zwei Unternehmen benannt werden, die bereits einen industriellen Prozess aufgesetzt haben, um EoL-Batteriezellen in eine „Second-Life“-Anwendung zu bringen. Dies ist der Batteriezellen-Wiederaufarbeiter VoltR (VoltR, 2026) und der Batteriehersteller im Medizinbereich Vlad (Vlad, 2026).

Im Vergleich zum Powertool-LIB gibt es für LIB aus Elektrofahrzeugen (EVs) bereits etablierte Ansätze für „Second-Life“-Anwendung, sobald diese eine Restkapazität von etwa 80 % erreichen. Nach Kriterien, die in den 1990er Jahren für nickelbasierte Batterien festgelegt wurden (Hunt, 1996), gelten Batterien unter diesem Grenzwert als Batterien im EoL-Status. Neueste Studien zeigen jedoch, dass eine Kapazität von 80 % ausreichend ist, um den Alltagsbedarf von 65 % der US-Bürger bei der Nutzung von Elektrofahrzeugen zu decken (Saxena, Le Floch, MacDonald & Moura, 2015). Dies deutet darauf hin, dass die bestehenden EoL-Kriterien überarbeitet werden sollten, um die Fortschritte in der Batterietechnologie zu beachten.

Direkte Wiederverwendung ohne weitere Zerlegungsschritte kann lediglich durchgeführt werden, wenn die Kapazität der Batteriepacks bei 80 % oder höher liegt. Module mit einem SoH zwischen 70–80 % eignen sich zu einer Wiederinstandsetzung von Batteriepacks. Module mit einem SoH unter 70 % werden auf Zellebene demontiert und vertieft charakterisiert. Batteriezellen benötigen mindestens einen SoH von 85 %, dass sie wieder in Modulen eingesetzt werden können (RWTH Aachen Universität et al., 2021).

Das Haupteinsatzgebiet von „Second-Life"-LIB sind stationäre Energiespeichersysteme, die Schwankungen in der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien ausgleichen sollen. Beispiele umfassen die Speicherung von Solar- oder Windenergie, Spitzenlastreduzierung oder auch Notstromversorgung. Häufig wird in diesem Zusammenhang auch der Begriff „Second-Life"-Nutzung verwendet. Hierbei handelt es sich der Definition nach um eine Weiterverwendung, die sich von der direkten Wiederverwendung dadurch unterscheidet, dass ein anderer Einsatzzweck mit der Batterie verfolgt wird. Eine direkte Wiederverwendung würde demnach stattfinden, wenn die Batterie in einem Fahrzeug eingesetzt werden würde. Aus ökologischer und ökonomischer Sicht ist die Verlängerung der Lebensdauer dieser ressourcenintensiv hergestellten Batterien sinnvoll, da sie die Abhängigkeit von neuen Rohstoffen reduziert und der Recyclingindustrie mehr Zeit für technologische Weiterentwicklungen gibt.

Kritische Stimmen zur „Second-Life"-Nutzung weisen darauf hin, dass die Nutzungsdauer von Batterien sich zwar verlängert, jedoch die Rückführung von Batterien in den Recyclingkreislauf verzögert wird, was die Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe wie Nickel, Cobalt und Lithium behindert. Dies ist problematisch, da die globale Lieferkette für Batteriematerialien angespannt ist und durch „Second-Life"-Anwendungen nicht unmittelbar entlastet wird. Ebenso könnte für die gewählte „Second-Life"-Nutzung keine passende hochwertige EoL-Lösung vorhanden sein, was zur Nutzung von Recyclingstrategien führt, die einen Sekundärrohstoffverlust bedeuten würden. Eine ausgewogene Strategie, die „Second-Life"-Anwendungen und Recycling kombiniert, ist daher erforderlich, um sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Ziele zu erreichen (Patel et al. 2024, Bernhart, Hotz & Koper, 2023, International Energy Agency [IEA], 2024).

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über Möglichkeiten der „Second-Life"-Anwendung von LIB und notwendige Restkapazitäten der Batterien.

Tabelle 3.7: Übersicht der Anwendungsgebiete für „Second-Life"-LIB. Grün = geeignet; Orange = nur manchmal geeignet; Rot = nicht geeignet. (Patel et al., 2024)

Anwendung	Wohngebäude	Gewerbe	Industrie
Erneuerbare Energien Integration	0–150 kWh	0–500 kWh	0–10 MWh
Energiearbitrage	0–60 kWh	0–500 kWh	n. v.
Spitzenlastreduzierung	0–60 kWh	500–4.500 kWh	0–4 MWh
Notstromversorgung	0–40 kWh	0–700 kWh	0–4 MWh
Kleine Mobilitätsfahrzeuge	0–15,3 kWh	0–8 kWh	11–25 kWh
Laden von Elektrofahrzeugen	0–20 kWh	0–1 MWh	0–5 MWh
Laststeuerung	n. v.	0–2 MWh	0–4 MWh
Mikronetz	0,02–2 MWh	2–6 MWh	6–20 MWh

Bezogen auf Tabelle 7 liegen die Kapazitäten in Wohngebäuden (z. B. Häuser und Wohnungen) in der Regel zwischen 3 und 20 kWh, abhängig von Faktoren wie der Anzahl der Bewohner und der Gebäudegröße. Die Kapazitäten im gewerblichen Bereich (Gebäude oder Räume, die speziell für die Geschäftstätigkeit vorgesehen sind) liegen zwischen 3 und 500 kWh, abhängig von der Größe und dem Energiebedarf des Unternehmens. Die Kapazitäten im industriellen Sektor (Bereiche, die für die Herstellung und Verarbeitung von Gütern und Dienstleistungen bestimmt sind) reichen von 500 kWh bis zu mehreren Megawattstunden. Am besten geeignet sind Anwendungen, die weniger häufige Lade-/Entladezyklen erfordern.

Der Betrieb im Versorgungsmaßstab erfordert die Speicherung und Freisetzung sehr großer Energiemengen und eignet sich weniger für wiederverwendete Batterien, da deren Kapazität geringer ist, sie sich ständig verschlechtert und Sicherheitsbedenken bestehen, wenn sie bei sehr hohen Leistungsanforderungen mit C-Raten (ein Maß für den Strom, mit dem die Batterie geladen oder entladen wird) von über 2C betrieben werden (McLoughlin & Conlon, 2015). Eine ausführliche Liste mit Projekten, in denen Batterien aus dem Elektrofahrzeugbereich weiterverwendet wurden, findet sich in Patel et al. (2024).

Juristische Einschätzung der Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien

Neben den technischen Anforderungen an die Wiederinstandsetzung und Wiederverwendung müssen zudem die rechtlichen Dimensionen beachtet werden. Dabei stellt sich die zentrale Frage, ob der Wiederinstandsetzer von Altbatterien als Hersteller bzw. Inverkehrbringer gilt und somit den entsprechenden Herstellerverantwortungen gem. der EU-BattVO unterliegt. Im Folgenden werden daher zwei Sachverhalte beleuchtet: Der wiederinstandsetzende Betrieb übernimmt lediglich die Dienstleistung der Wiederinstandsetzung für einen Dritten oder er bringt die Batterie selbst wieder in Verkehr.

Laut Art. 3 Abs. 1 Nr. 47 EU-BattVO gilt jeder Wirtschaftsakteur, der Batterien in der EU erstmalig auf den Markt bringt als Hersteller und unterliegt der Herstellerverantwortung. Der Wiederinstandsetzer gilt also rechtlich nicht automatisch bereits durch die Behandlung der Altbatterien als Inverkehrbringer oder Hersteller. Maßgeblich ist vielmehr, ob er die behandelten Batterien anschließend selbst erstmals auf dem Unionsmarkt bereitstellt oder in Betrieb nimmt. Wenn der Wiederinstandsetzende Betrieb also nur die Überprüfung und Vorbereitung zur Wiederverwendung der als Abfall eingestuften Altbatterie vornimmt, gilt er demnach nicht als Hersteller bzw. Inverkehrbringer. Zudem ist relevant ab wann die Tätigkeit des Wiederinstandsetzers als Vorbereitung zur Wiederverwendung gilt.
Als Vorbereitung zur Wiederverwendung gem. Art. 3 Abs. 1 Nr. 29 EU-BattVO gilt „jedes Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile von Erzeugnissen, die zu Abfällen geworden sind, so vorbereitet werden, dass sie ohne weitere Vorbehandlung wiederverwendet werden können“. Diese weit gefasste Definition deutet darauf hin, dass bereits die alleinige Überprüfung der Batterie (z. B. Spannungsmessung oder Öffnung der Batterie) als Vorbereitung zur Wiederverwendung gilt, und die Altbatterie somit ihren Abfallstatus verliert. Wird sie dann vom Wiederinstandsetzer auf dem EU-Markt wieder bereitgestellt gilt er als Hersteller gem. Art. 3 Abs. 1 Nr. 47 EU-BattVO und unterliegt der Herstellerverantwortung gem. Art. 38 i V. m. Art. 3 Abs. 1 Nr. 47 EU-BattVO.

Stoffliche Verwertung

Stoffliche Verwertung (engl. Recycling) wird von Potting et al. (2018) als „Verarbeitung von Materialien, um die ursprüngliche hohe Qualität zu erreichen oder auf eine niedrige Qualität zu reduzieren“ definiert. Die europäischer Abfallrahmenrichtlinie definiert Recycling etwas weiter, als jedes Verwertungsverfahren, bei dem Abfallmaterialien zu Produkten, Materialien oder Stoffen aufbereitet werden,

sei es für den ursprünglichen oder für andere Zwecke. Eine Aussage über die zu erzielende Qualität wird in dieser Definition nicht getroffen. Entlang der Re-Strategien wird das Recycling auf Ebene R8 und somit als zweitschlechteste Kreislaufwirtschafts-Strategie eingeordnet.

In Bezug auf die stoffliche Verwertung von NMC-LIB aus Powertools wird generell in mechanisches Recycling, pyrometallurgisches Recycling, hydrometallurgisches Recycling, Direktes Recycling als auch biotechnologische Recyclingverfahren unterschieden. Die verschiedenen Ansätze sind in der folgenden Tabelle dargestellt. In biotechnologische Recyclingverfahren bzw. im Bioleaching werden Mikroorganismen eingesetzt, um Metalle wie Nickel oder Kobalt aus Batterien zu lösen. Aufgrund hoher Kosten und langer Prozesszeiten findet Bioleaching bisher keine großtechnische Anwendung und wird deshalb in Tabelle 11 nicht verglichen.

Tabelle 3.8: Gegenüberstellung unterschiedlicher Verwertungsverfahren für LIB. (Neef, Schmaltz & Thielmann, 2021; Patel et al., 2024; RWTH Aachen Universität et al., 2021)

Mechanisches Recycling
Beschreibung: Mechanisches Recycling umfasst physikalische Prozesse wie Zerkleinern, Sieben, Schreddern und Trennen, um Batterien in ihre Bestandteile (z. B. schwarze Masse, Metalle, Kunststoffe) zu zerlegen. Ziel ist die Isolierung der schwarzen Masse (Kathoden- und Anodenmaterialien) und die Rückgewinnung von Metallen wie Aluminium oder Kupfer aus Gehäusen. **Vorteile:** Relativ kostengünstig, energieeffizient und ermöglicht die Trennung von Wertstoffen für nachfolgende Prozesse. **Nachteile**: Begrenzte Rückgewinnung von chemisch reinen Materialien; die schwarze Masse muss oft durch andere Verfahren (z. B. hydrometallurgisch) weiterverarbeitet werden.
Direktes Recycling
Beschreibung: Beim direkten Recycling werden aktive Materialien (z. B. Kathodenmaterialien wie NMC oder LFP) aus der schwarzen Masse rückgewonnen, ohne sie chemisch vollständig aufzuspalten. Die Materialien werden gereinigt, regeneriert (z. B. durch thermische oder chemische Behandlung) und für die Herstellung neuer Batterien wiederverwendet. **Vorteile:** Erhalt der Kristallstruktur der Kathodenmaterialien; geringerer Energieverbrauch im Vergleich zu pyrometallurgischen oder hydrometallurgischen Verfahren; hohe Materialeffizienz; Rückgewinnung vielfältiger Materialien möglich. **Nachteile:** Technisch anspruchsvoll; erfordert präzise Sortierung nach Kathodenchemie; ist derzeit nicht weit verbreitet; hoher Aufwand in der Vorbehandlung

Pyrometallurgisches Recycling	Hydrometallurgisches Recycling
Beschreibung: Bei diesem Verfahren werden Batterien in Hochtemperaturöfen geschmolzen (oft >1.500 °C), um Metalle wie Kobalt, Nickel und Kupfer in einer Legierung rückzugewinnen. Organische Bestandteile (z. B. Elektrolyte, Separatoren) verbrennen, und Lithium geht teilweise in die Schlacke, die weiterverarbeitet werden kann. **Vorteile:** Robust, kann verschiedene Batteriechemien verarbeiten; etabliertes Verfahren in der Industrie (z. B. Umicore); keine Vorbehandlung notwendig; hohe Rückgewinnungsquoten für Metalle; Einfach skalierbar; keine Gefahr durch Batterieleckagen. **Nachteile:** Hoher Energieverbrauch; Verlust von Lithium in die Schlacke und organischen Materialien; zusätzliche Prozesse für Lithiumrückgewinnung erforderlich; Kein Einsatz für LFP-LIB; Wirtschaftlichkeit hängt von werthaltigen Metallen in den Batterien ab.	**Beschreibung:** Dieses Verfahren nutzt wässrige chemische Prozesse (z. B. Säurelaugung, Fällung), um Metalle wie Lithium, Kobalt, Nickel und Mangan aus der schwarzen Masse zu extrahieren. Die Metalle werden in reiner Form als Salze oder Oxide rückgewonnen. **Vorteile:** Hohe Rückgewinnungsraten (auch für Lithium), geringerer Energieverbrauch als pyrometallurgische Verfahren, hohe Reinheit der Materialien. **Nachteile:** Chemikalienintensiv; hoher Aufwand in der Vorbehandlung; hohe Prozesskomplexität; hoher Wasserverbrauch; erzeugt Abwasser: erfordert aufwendige Nachbehandlung.

Die folgende Abbildung 3.4 zeigt eine Übersicht über verschiedene Möglichkeiten der stofflichen Verwertung von LIB inklusive der einzelnen erforderlichen Prozessschritte.

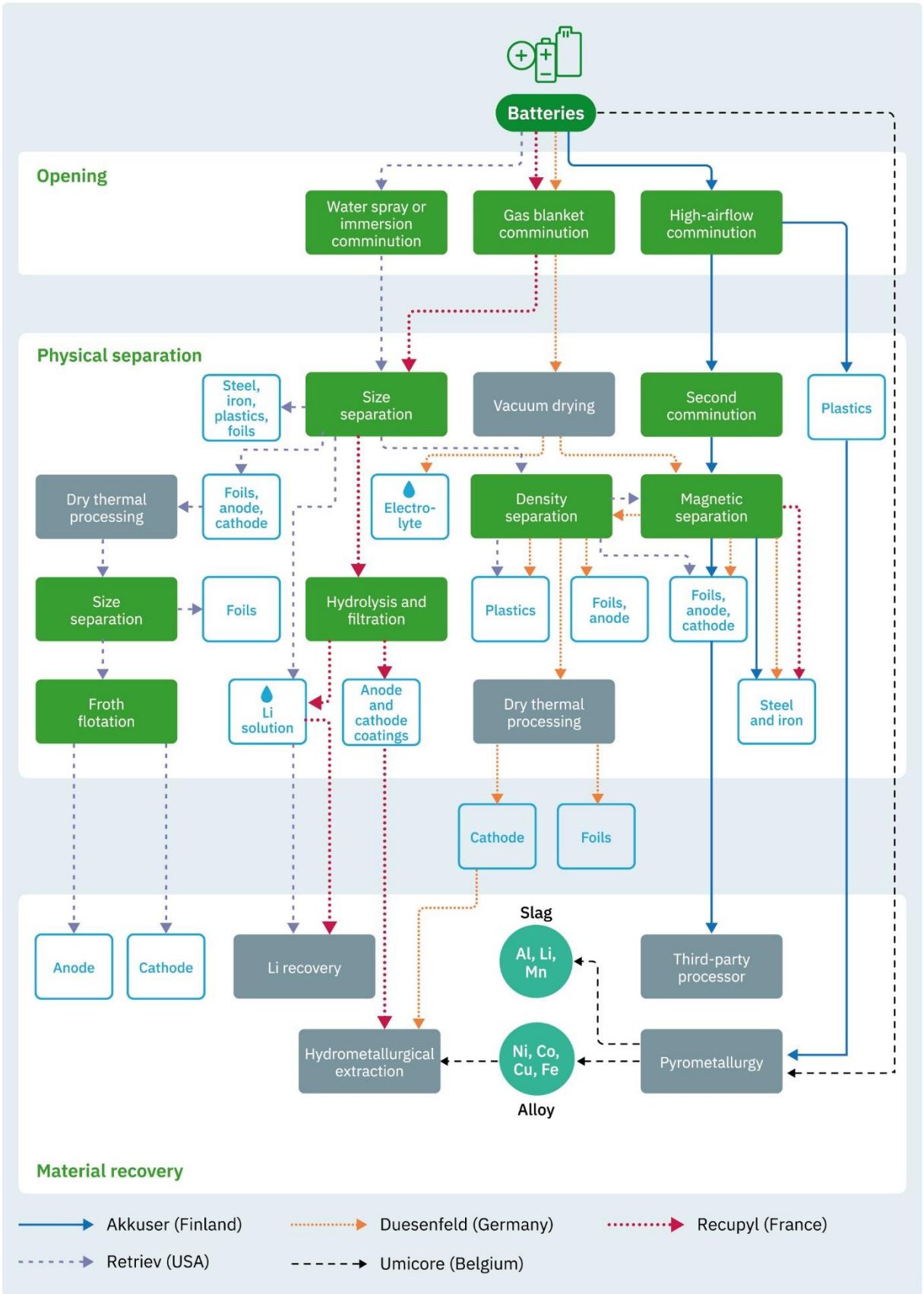


Abbildung 3.4: Prozessübersicht mechanischer und metallurgischer Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien nach Recycler. (Harper et al., 2019)

Vor der Zuführung von LIB zu einem Verwertungsprozess ist eine Vorbehandlung erforderlich, um Sicherheitsrisiken zu minimieren und die Batterien für nachfolgende Prozesse vorzubereiten. Diese

umfasst in der Regel die Entladung der Batterien, um Restenergie zu entfernen, und die Demontage, bei der Batteriemodule in Zellen, Gehäuse und andere Komponenten zerlegt werden. Die Entladung erfolgt kontrolliert mit speziellen Geräten oder durch sicheres Kurzschließen (z. B. in Salzlösungen), während die Demontage manuell oder automatisiert durchgeführt wird. Je nach Verwertungsstrategie können weitere Schritte wie die Inaktivierung des Elektrolyten (z. B. durch thermische oder chemische Behandlung) oder die Sortierung nach Chemie oder Zustand notwendig sein. Diese Maßnahmen verhindern potenzielle Gefahren wie thermisches Durchgehen, Kurzschlüsse auf Zell- oder Modulebene, die zu Bränden führen können, sowie den Austritt von Elektrolyten oder anderen chemischen Bestandteilen bei mechanischen Beschädigungen. Zusätzlich können beschädigte Batterien toxische Gase (z. B. Fluorwasserstoff) freisetzen oder chemische Reaktionen auslösen, wodurch die Sicherheit durch die Vorbehandlung erhöht wird.

Die folgende Abbildung zeigt einen beispielhaften Industrieprozess zur mechanischen Aufbereitung von LIB. Dieser Prozess kann zum Beispiel der Pyro- oder Hydrometallurgie vorgelagert sein.

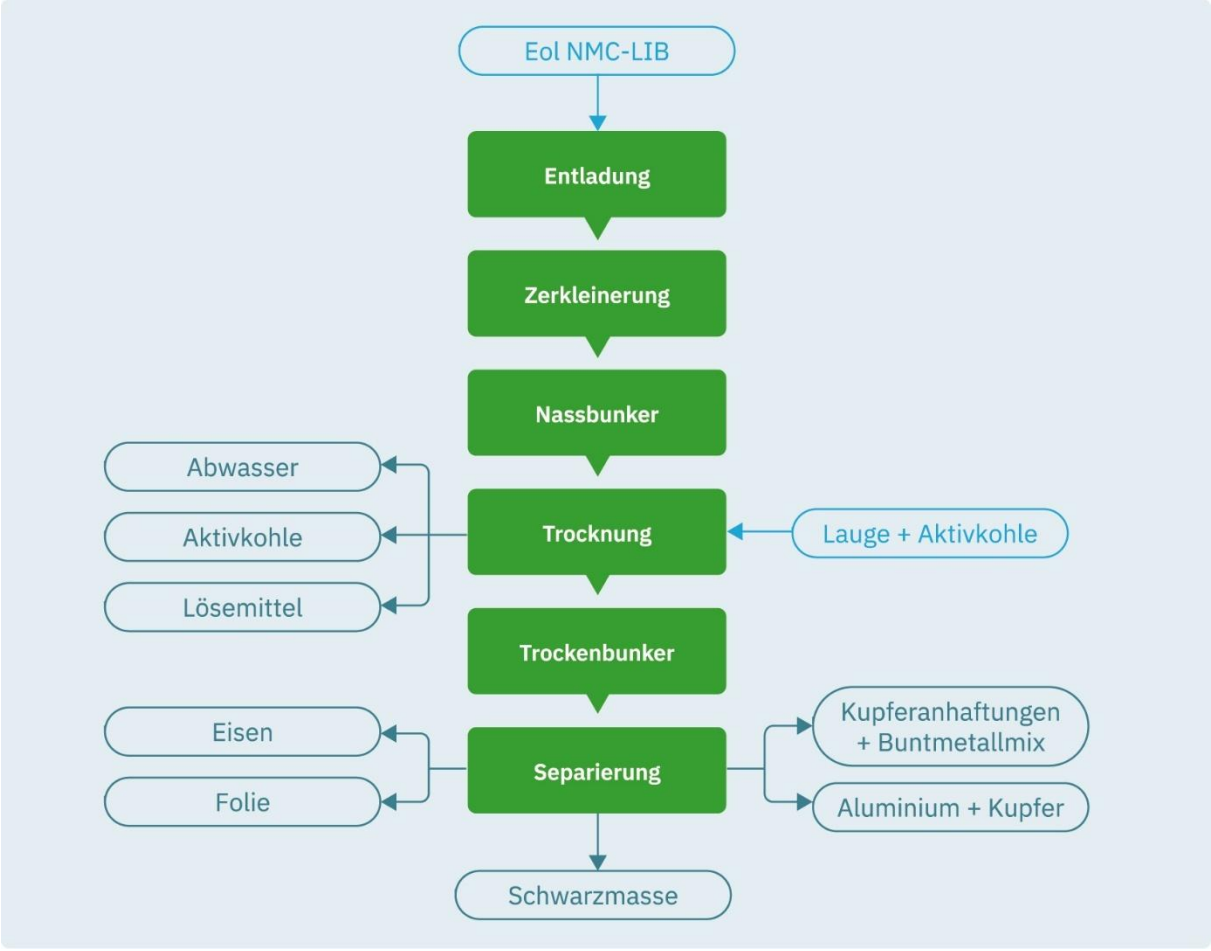


Abbildung 3.5: Prozess zur mechanischen Aufbereitung in Anlehnung an ERLOS Produktion und Montagen GmbH (gelb: Prozessschritte; blau: In-/Output).

Um hohe stoffliche Verwertungsquoten zu erzielen, ist häufig eine Kombination verschiedener Verfahren erforderlich, wie beispielsweise mechanische Zerkleinerung, Pyrometallurgie oder Hydrometallurgie. Die Wahl des Verfahrensablaufs hängt von der Batteriechemie (z. B. NMC-111 oder NMC-811) und der Batteriegröße (z. B. Geräte- oder Fahrzeugbatterien) ab. Abbildung bietet eine Übersicht über mögliche Kombinationen dieser Verfahrensschritte, um die Rückgewinnung kritischer Rohstoffe zu optimieren.

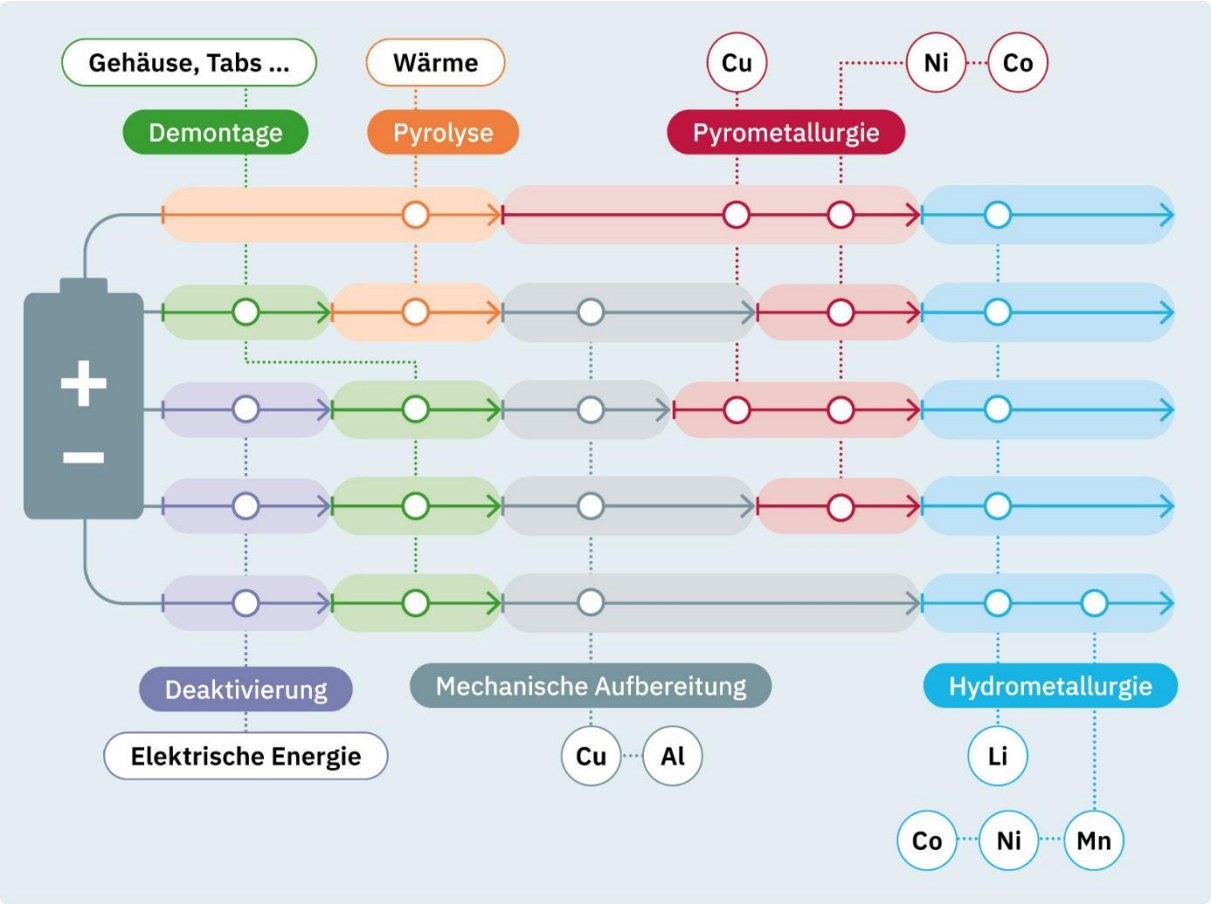


Abbildung 3.6: Übersicht zu potenziellen Aufbereitungspfaden für LIB. (verändert nach Doose, Mayer, Michalowski und Kwade (2021))

Aktuelle Forschung wird aktuell im Bereich der Separierung von Batterietypen betrieben. Lee et al. (2025) erforschen die Verwendung von elektrostatischen und magnetischen Trennverfahren in vier unterschiedlichen kommerziellen Kathodenchemien zur Herstellung hochwertiger Kathoden- und Anodenelektrodenprodukte. Verwendet wurden Produktionsabfälle und Altbatterien mit den Kathodenchemien $LiMn_2O_4$–$LiNi_{0,8}Co_{0,15}Al_{0,05}O_2$ (LMO/NCA), $LiFePO_4$ (LFP), $LiCoO_2$ (LCO) und $LiNi_{0,5}Mn_{0,3}Co_{0,2}O_2$ (NMC532), die alle mit Grafitanoden kombiniert sind. Die beiden Trenntechnologien verbesserten die Trennleistung von zerkleinerten Elektroden erheblich und führten zu einer Rückgewinnungsrate von >98 % bei zerkleinerten NMC-Kathodenelektroden, >99 % bei LMO-NCA-Elektroden und >98 % bei LFP-Elektroden. LCO-Batterien haben sich für diese Trennverfahren als ungeeignet erwiesen.

Eine ausführliche Literaturrecherche zum Forschungssektor NMC Batterieverwertung zwischen 2015 und 2025 hat insgesamt 33 wissenschaftliche Artikel ergeben, die sich in zwei Hauptkategorien einteilen lassen: Artikel, die sich mit der Erforschung von neuen Prozessen zur Verwertung von NMC-LIB beschäftigen (23 Stück) und Artikel, die sich um die Optimierung von bereits etablierten Prozessen bemühen (10 Stück). Tabelle A1 und A2 im Anhang dieses Berichts geben einen Überblick über die recherchierten Artikel und aktuelle Forschungsschwerpunkte in chronologisch absteigender Reihenfolge.

3.1.3 Rechtliche Vorgaben

Kernbotschaft und Praxisbezug

Die Auswertung der rechtlichen Vorgaben für den NMC-LIB-Powertool-Sektor zeigt, dass eine Vielzahl an Regularien für die ordnungsgemäße Organisation und Einhaltung der Entsorgungskette maßgeblich ist und viele Verordnungen und Gesetze ineinandergreifen. Die jüngste Novellierung der europäischen Batterieverordnung (BattVO) sowie die Einführung des Batterierecht-Durchführungsgesetzes (BattDG) auf nationaler Ebene schaffen dabei mehr Klarheit hinsichtlich Zuständigkeiten, Kennzeichnungs-, Rücknahme- und Verwertungsanforderungen.
Ob diese rechtlichen Rahmenbedingungen jedoch tatsächlich zur Entstehung neuer Geschäftsmodelle entlang der Entsorgungskette von NMC-Lithium-Ionen-Batterien aus Powertools beitragen, bleibt offen. Etablierte Strukturen bei Entsorgungsunternehmen sowie rechtliche und haftungsbezogene Unsicherheiten auf Seiten der Hersteller wirken bislang hemmend auf die Umsetzung alternativer Re-Strategien zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft. Zudem beschränkt sich die praktische Umsetzung der erweiterten Herstellerverantwortung in Deutschland bislang weitgehend auf Sammlung, Sortierung und stoffliche Verwertung.

Gesetzlicher europäischer Rahmen

Derzeit sind verschiedene Strategien und Regularien auf europäischer Ebene aktiv, welche die Anwendung der zu untersuchenden Loops beeinflussen. Im Folgenden sind die Inhalte der Richtlinien dargestellt und wie sie sich auf NMC-LIB aus Powertools und deren Lebenszyklus beziehen.

Auf europäischer Ebene gelten die folgenden rechtlichen und strategischen Vorgaben:

- *Europäische Batterieverordnung (2024):* Sie regelt den kompletten Lebenszyklus von Gerätebatterien, ist aber vor allem auf die Verwertungsprozesse fokussiert. So gibt sie zum Beispiel spezifische Quoten für Sammlung von Gerätebatterien vor (63 % bis 2027, 73 % bis 2030) sowie Mindestrezyklatgehalte in neu produzierten Industriebatterien ab 2031 (16 % Kobalt, 6 % Lithium, 6 % Nickel) bzw. ab 2036 (26 % Kobalt, 12 % Lithium, 15 % Nickel). Für Gerätebatterien zählen keine Mindestrezyklatgehalte, allerdings können diese eine Quelle für die benötigten Rezyklatmengen, die in Industriebatterien eingesetzt werden müssen, sein (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2023).
- *Europäischer Grüner Deal (2019):* Er beschreibt die europäische Strategie zur Klimaneutralität bis 2050. Gerätebatterien in Powertools werden darin indirekt adressiert, indem die Kreislaufwirtschaft von Batterien durch Recycling und Wiederverwendung gefördert sowie CO_2-reduzierte Produktionsprozesse und Förderung von Innovationen durch energieeffiziente Recyclingverfahren sowie „Second-Life“-Anwendungen adressiert werden. Basierend auf der beschriebenen Strategie wurden Regularien wie die EU-Batterieverordnung oder das Gesetz über kritische Rohstoffe (Critical Raw Materials Act = CRMA) ausgearbeitet (Europäische Kommission, 2019).
- *CRMA (2024): Er* ist sehr wichtig für den Lebenszyklus von Gerätebatterien aus Powertools, da er die Bereiche Versorgung, Verarbeitung und das Recycling von kritischen Rohstoffen, zu denen die Inhaltsstoffe der NMC-LIB (Nickel, Mangan, Kobalt) zählen, regelt. Ziel ist es auf europäischer Ebene bis 2030 10 % der Rohstoffe lokal abzubauen, 40 % lokal zu verarbeiten und 15 % des Rohstoffbedarfs durch recyceltes Material zu decken. Generell ist der CRMA für das Recycling der in den NMC-LIB enthaltenen Rohstoffe positiv zu werten, da er den Aufbau von Recyclingkapazitäten fördert, was wiederum die Abhängigkeit von importierten Rohstoffen reduziert (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2024).
- *Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (2008):* Das ADR regelt den Transport von NMC-Powertoolbatterien als Gefahrgut der Klasse 9 (UN

3480 für eigenständige Batterien, UN 3481 für Batterien in Geräten). Es ist relevant für den Transport vor der Inbetriebnahme (z. B. vom Hersteller zum Händler) sowie nach EoL von Gerätebatterien. Für Powertoolbatterien (meist NMC-Rundzellen, Typ 18650 und 21700, ≤100 Wh) gelten vereinfachte Anforderungen gemäß Sondervorschrift 188, wie reduzierte Kennzeichnungspflichten. Das ADR schreibt sichere Verpackungen vor, die Kurzschlüsse verhindern (z. B. stabile Außenverpackungen, nicht brennbare Dämmstoffe für defekte Batterien), sowie spezifische Kennzeichnungen (z. B. Gefahrgutsymbole) und zugelassene Transportbehälter. Für EoL-Powertoolbatterien, die über Sammelstellen entsorgt werden, gewährleistet das ADR die sichere Beförderung zu Recyclinganlagen, in Einklang mit der EU-Batterieverordnung (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2008).

- *Elektro- und Elektronikgeräte-Richtlinie (2012):* Die Richtlinie regelt die Rücknahme und Verwertung von Powertools. Sie verpflichtet Hersteller unter anderem dazu Rücknahmesysteme zu finanzieren, Batterien aus Elektrogeräten entnehmbar zu machen und getrennt zu erfassen. Ebenso regelt sie Verbraucherpflichten, die dazu angehalten sind, kommunale Sammelstellen oder Rücknahmestellen im Einzelhandel für die Entsorgung ihrer Altgeräte zu nutzen (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2012).
- *REACH-Verordnung (2006):* Die REACH-Verordnung beeinflusst den gesamten Lebenszyklus von NMC-Powertoolbatterien, indem sie die sichere Handhabung, Registrierung und Rückgewinnung chemischer Stoffe wie Kobalt, Nickel und Lithium, die in NMC-LIB eingesetzt werden, regelt. Sie fördert Transparenz, Sicherheit und Nachhaltigkeit während des gesamten Lebenszyklus. REACH betrifft dabei nicht nur die Dokumentation der eingesetzten Stoffe und Chemikalien während der Produktion, sondern auch während des Recyclingprozesses. Ebenfalls müssen Hersteller von NMC-LIB Sicherheitsinformationen zu gefährlichen Stoffen (engl. Substances of Very High Concern = SVHC), die in den Batterien enthalten sind, anfertigen, die nicht nur für den Verbraucher während des Gebrauchs hilfreich sind, sondern auch im Verwertungsprozess oder in der Anwendung von Batterien im „Second-Life“ (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2006).

Gesetzlicher nationaler Rahmen

Auf deutscher, nationaler Ebene sind die folgenden Gesetze und Verordnungen für NMC-LIB relevant. Sie setzen europäisches Recht in deutsches Recht um:

- *Batterierecht-Durchführungsgesetz (BattDG):* Das BattDG ersetzt das Batteriegesetz (BattG) vollständig und setzt damit die EU-Batterieverordnung in deutsches Recht um. Dies soll zu einer Vereinheitlichung und Modernisierung des deutschen Batterierechts beitragen, Sammelquoten erhöhen, die Herstellerverantwortung stärken sowie die Sicherheit im Umgang mit Batterien erhöhen. Das BattDG regelt damit die Zuständigkeiten und Durchführung der BattVO in Deutschland. Es beeinflusst damit den gesamten Lebenszyklus von NMC-LIB aus Powertools in Deutschland. Das BattDG führt vor allem eine verbindliche, bundesweit organisierte und kostenfreie Rücknahme ein und ordnet diese LIB eindeutig der erweiterten Herstellerverantwortung zu, unabhängig davon, ob sie im privaten oder gewerblichen Bereich genutzt werden. Hersteller müssen sich an zugelassenen Rücknahmesystemen (Organisationen für Herstellerverantwortung; OfH) beteiligen oder eigene genehmigte Systeme betreiben, die auch finanzielle Sicherheiten hinterlegen und Sammel- sowie Verwertungsziele erfüllen. Ein zentraler Fokus liegt auf Sicherheits- und Brandschutzaspekten, da leistungsstarke Werkzeugakkus ein erhöhtes Risiko darstellen; entsprechend sollen Sammlung, Transport und Verwertung stärker kontrolliert und professionalisiert werden. Für Anwender wie Handwerks- und Industriebetriebe bedeutet dies klare Rückgabewege ohne Entsorgungskosten (Deutscher Bundestag, 2025).
- *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS):* Die nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie wurde im Dezember 2024 von der deutschen Bundesregierung veröffentlicht. Sie beschreibt die strategische Ausrichtung der deutschen Politik zur Förderung der Kreislaufwirtschaft mit der Zielstellung Wirtschaftsprozesse zirkulärer und ressourcenschonender zu gestalten. Gerätebatterien aus

Powertools werden in der Strategie nicht direkt adressiert, sondern eher durch die übergeordneten Handlungsfelder „Batterien“ sowie „Elektro(nik)geräte“. Die NKWS geht dabei vor allem auf eine Förderung des Designs for Circularity dieser Produktgruppen, die Einführung eines digitalen Produktpasses sowie eine Stärkung der Wieder- und Weiterverwendung von Elektro(nik)geräten ein (Deutsche Bundesregierung, 2024).

- *Gefahrgutbeförderungsgesetz (GGBefG):* Das GGBefG setzt den ADR in deutsches Recht um und regelt den Transport von NMC-LIB als Gefahrgut Klasse 9. Es schreibt Verpackungen, Kennzeichnung sowie notwendige Transportdokumente für Batterien sowie Altbatterien vor. Ebenfalls regelt es den Umgang mit defekten oder beschädigten Batterien und gibt Anweisungen zum Brandschutz (Deutscher Bundestag, 1975).
- *Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG):* Das ElektroG setzt die WEEE-Richtlinie in deutsches Recht um. Es regelt damit die Rücknahme und Verwertung von Elektro(nik)geräten in Deutschland. So verpflichtet das Gesetz Hersteller zur Finanzierung von Rücknahmesystemen und zur Registrierung bei der Stiftung EAR. Das Gesetz fordert eine Entnehmbarkeit von Batterien mit haushaltsüblichen Werkzeugen und fördert die getrennte Sammlung von Batterien zur Rückgewinnung kritischer Rohstoffe (Deutscher Bundestag, 2015).
- *Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG):* Das KrWG fördert die getrennte Sammlung und das Recycling von Altbatterien, unterstützt die Rückgewinnung kritischer Rohstoffe (Nickel, Kobalt, Lithium) und die Kreislaufwirtschaft. Es legt ebenfalls fest, dass alle Akteure in der Abfallwirtschaft sich an die Abfallhierarchie halten müssen, welche besagt, dass eine Wiederverwendung, oder Vorbereitung zur Wiederverwendung mittels, Reparatur, Wiederaufarbeitung oder Wiederinstandsetzung Vorzug vor (stofflicher) Verwertung oder Beseitigung zu geben sind (Deutscher Bundestag, 2012).
- *Chemikaliengesetz (ChemG):* Das ChemG setz die europäische REACH-Verordnung in deutsches Recht um. Es regelt die Registrierung und sichere Handhabung von chemischen Stoffen (z. B. Kobalt, Nickel) in der Produktion und im Recycling von NMC-LIB (Deutscher Bundestag, 1980).

3.2 Analyse der Powertoolbatterien aus dem End-of-Life

Kernbotschaft und Praxisbezug

Im Rahmen des Projektes wurde eine Sortierkampagne durchgeführt, mit dem Ziel die Stoffstromzusammensetzung sowie den Zustand der EoL-Powertoolbatterien zu ermitteln. Um eine Aussagekräftige Untersuchung durchzuführen, wurde sich an der Untersuchungsmethodik der LAGA PN 98 orientiert und die notwendige Anzahl an Gebinden des Stoffstroms betrachtet. Bewertete Parameter waren der äußerliche Zustand, das Alter, die Elektrochemie, der SoC und das Gewicht der Batteriepacks. Ein wesentliches Ergebnis ist die Verteilung der ermittelten Zellchemien LIB, NiMh und NiCd. LIB haben hierbei mehr als die Hälfte der erfassten Batterien ausgemacht. Zweithäufigste Zellchemie war NiCd. NiMH-haltige und nicht bestimmbare Batteriepacks haben nur einen kleinen Anteil ausgemacht. Der Ladungszustand der Batterien hat ergeben, dass Batterien mit einer geringeren Nutzungsdauer einen höheren SoC aufweisen und sich somit eher für ein „Second-Life“-Szenario eignen könnten. Die Untersuchung der Nutzungsdauer hat eine durchschnittliche Lebensdauer von 10 Jahren ergeben, wobei LIB aus Powertools aus dem privaten Bereich eine doppelt so lange Nutzung aufweisen gegenüber den im gewerblichen Bereich verwendeten.

Zukünftig wird sich der Anteil an LIB voraussichtlich erhöhen, da NiCd-Batterien seit 2017 einem Inverkehrbringungsverbot unterliegen und die übrige NiMH-Zellchemie nur zu einem geringen Anteil vertreten war.

Zielsetzung und Methodik

Die GRS Service GmbH sammelt jährlich rund 1.450 Mg EoL-Gerätebatterien über das Branchensystem Powertools in sogenannten gelben Fässern. In diesen werden sowohl Hochenergiebatterien größer 500 g als auch Monochargen von EoL-LIB erfasst. Über den tatsächlichen Zustand der zurückgenommenen Batterien lagen bislang jedoch nur begrenzte Erkenntnisse vor. Vor diesem Hintergrund wurden drei Sortierkampagnen bei der Battery Damage Service GmbH (BDS) in Langelsheim (Harz) im Juli 2025, Oktober 2025 und Januar 2026 durchgeführt, um die Zusammensetzung und den Zustand der gesammelten Batterien systematisch zu untersuchen.

Ziel der Untersuchung war es, den Stoffstrom und den Zustand der Powertoolbatterien zu ermitteln, indem die gewichtsmäßige Zusammensetzung der gelben Fässer untersucht wurde. Um den Zustand der Powertoolbatterien zu analysieren wurden spezifische Parameter wie Zellchemie, Nutzungsdauer, Hersteller und Ladezustand (SoC) erfasst.

Die Methodik orientierte sich an den Vorgaben der LAGA PN 98 zur Probenahme fester Abfälle. Bei einer jährlichen Sammelmenge von rund 30.270 Fässern wurden mindestens 109 Fässer aus 19 unterschiedlichen Rücknahmestellen untersucht, um eine statistisch valide Stichprobe zu gewährleisten. Jedes Fass wurde zunächst gewogen und anschließend in verschiedene Fraktionen sortiert, darunter Powertool-, Laptop-, Staubsauger- und Handyakkus sowie sonstige Batterien und Fehlwürfe. Von den Powertoolbatterien wurde das Gewicht und die Spannung jeweils einzeln erfasst und jede Batterie fotografisch dokumentiert. Die übrigen Fraktionen wurden gruppenweise erfasst. Zusätzlich wurden relevante Angaben wie Hersteller, Herstellungsjahr, Kapazität und Nennspannung dokumentiert, sofern diese auf dem Typenschild angegeben waren.

Die erhobenen Daten wurden ausgewertet, um Zusammenhänge zwischen Batteriealter, Zellchemie, Hersteller und Ladezustand zu analysieren. Der Ladezustand wurde anhand des Verhältnisses von gemessener Spannung zur Nennspannung bestimmt (siehe Tabelle 3.9).

Tabelle 3.9: Verhältnis von gemessener Spannung zu Nennspannung, ab der die Batterie als tiefentladen gilt.

Zellchemie	Kriterium für Tiefentladung (gem. Spannung/Nennspannung)
Li-Ion	< 69 %
NiCd	< 75 %
NiMH	< 75 %

Ergebnisse

Das Gesamtgewicht der untersuchten Fässer betrug 4.364 kg, wovon 1.238 kg auf Powertoolbatterien entfielen. Der Rest der erfassten Gesamtmasse bestand aus dem Fasseigengewicht, Füllmaterial, anderen Batterien aus Elektrokleingeräten und Fehlwürfen. Außerdem befanden sich auch andere LIB in den Fässern, wie z.B. Pouchzellen aus Handys und Laptops, oder Modellbauakkus. Je Fass wurden durchschnittlich 20 Powertoolbatterien erfasst. Insgesamt ergibt sich ein Massenanteil der Powertoolbatterien von 28 Gew.-% am Gesamtinhalt der Fässer.

Bei der Zellchemie der Powertoolbatterien wurde zwischen NiCd, Li und NiMH unterschieden. Insgesamt überwogen LIB mit mehr als der Hälfte des sortierten Gewichts, bei einem geringen Teil war die verwendete Zellchemie nicht ersichtlich (siehe Abbildung 3.7).

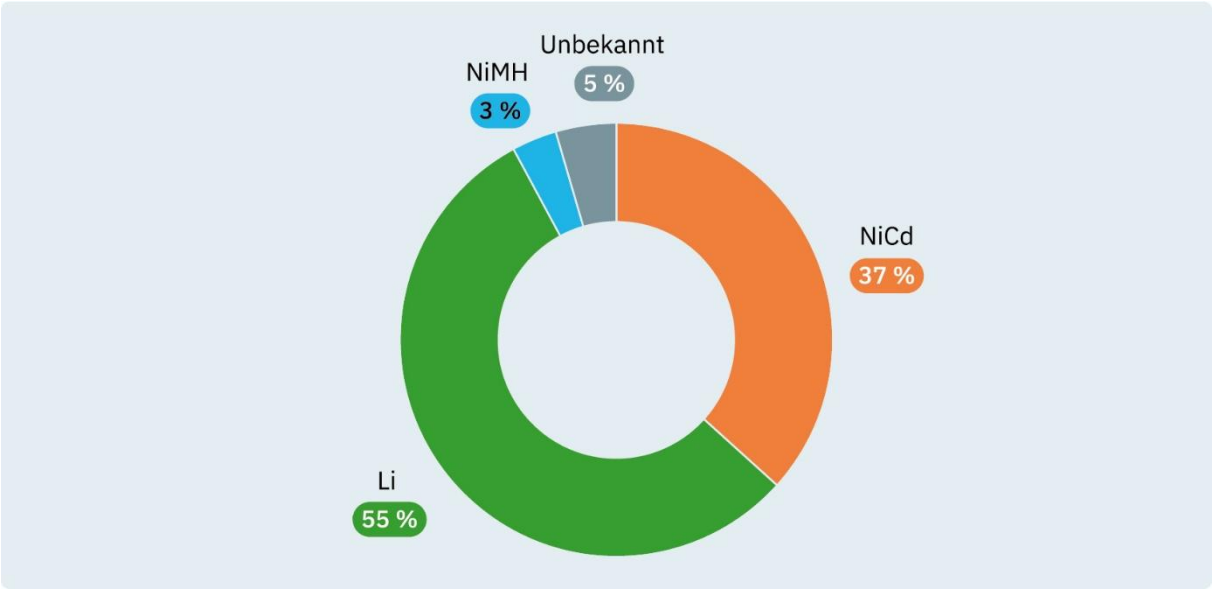


Abbildung 3.7: Anteile der Zellchemien von Powertool-LIB in Gew.-%.

Die Zusammensetzung der Fässer variierte jedoch stark. Während einige Fässer nahezu ausschließlich Powertoolbatterien enthielten, bestanden andere fast vollständig aus Fehlwürfen, wie beispielsweise Alkali-Rundzellen, Bleibatterien oder Pouchzellen. Zudem waren Unterschiede zwischen den einzelnen Sortierkampagnen erkennbar: So dominierten bei der ersten Sortierung überwiegend NiCd-Batterien, während bei der zweiten Sortierung hauptsächlich LIB-Batterien festgestellt wurden.

In Bezug auf die Hersteller wies Makita den größten Anteil auf (30 Gew.-%), gefolgt von Robert Bosch Powertools GmbH (11 Gew.-%). Darüber hinaus wurde eine große Anzahl kleiner beziehungsweise unbekannter Hersteller identifiziert (siehe Abbildung 3.8). Auffällig war zudem, dass viele Nachbauten von Makita-Akkus in den Fässern vorhanden waren.

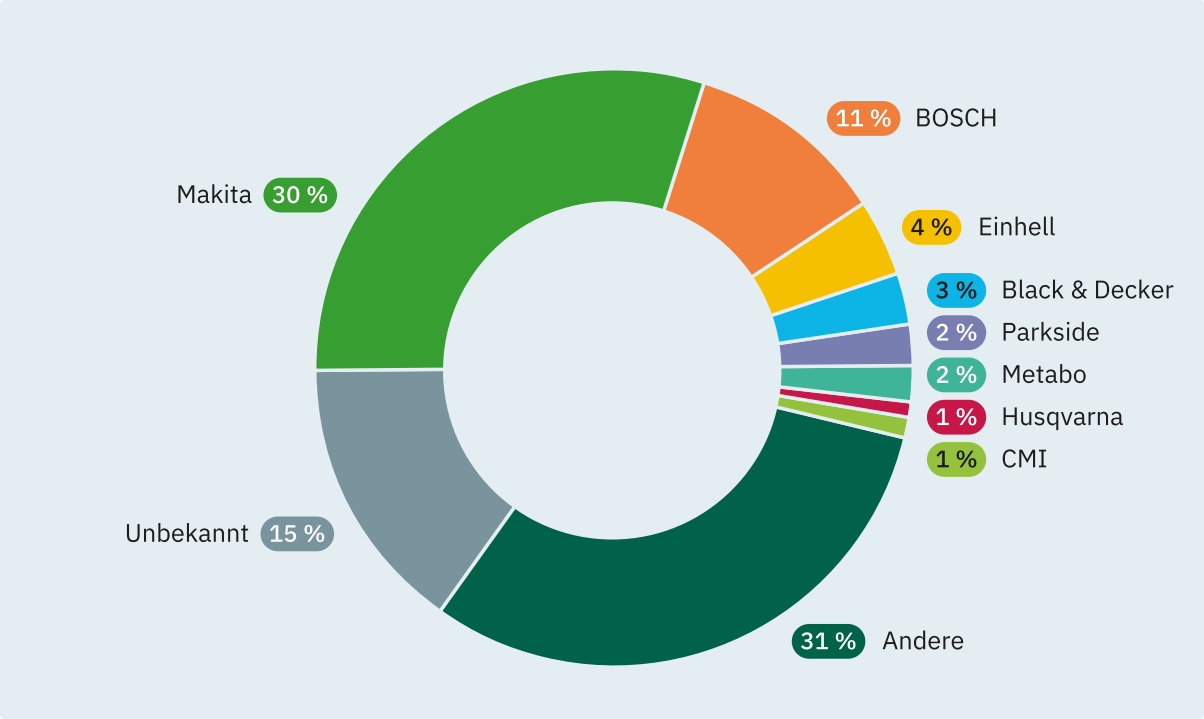


Abbildung 3.8: Anteilige Verteilung der Hersteller von Powertoolbatterien nach Anzahl.

Das Herstellungsjahr konnte nur bei 25 % der Powertoolbatterien ermittelt werden, wobei besonders bei älteren NiCd-Batterien das Herstellungsdatum fehlte. Hier war das durchschnittliche Herstellungsjahr 2015, womit sich eine mittlere Nutzungsdauer (Herstellung bis Rücknahme) von etwa 10 a ergibt. Auch hier variierten die Daten zwischen den Sortierungen: Während bei der ersten Sortierung eine durchschnittliche Nutzungsdauer von 12 a festgestellt wurde, betrug diese bei der zweiten Sortierung lediglich 7,5 a. Dies lässt ebenfalls auf eine starke Heterogenität unter den Fässern schließen. Auffällig war zudem, dass ein Teil der Powertoolbatterien noch deutlich älter als 10 a waren. Das älteste ermittelte Herstellungsjahr war 1989. Ältere Batterien wiesen meistens eine NiCd-Chemie auf, während neuere Batterien ausschließlich Li-Chemie enthielten (siehe Abbildung 3.9). Ein Grund für die Abnahme der NiCd-Batterien im Abfallstrom kann das Verbot für NiCd-Batterien ab 2017 sein.

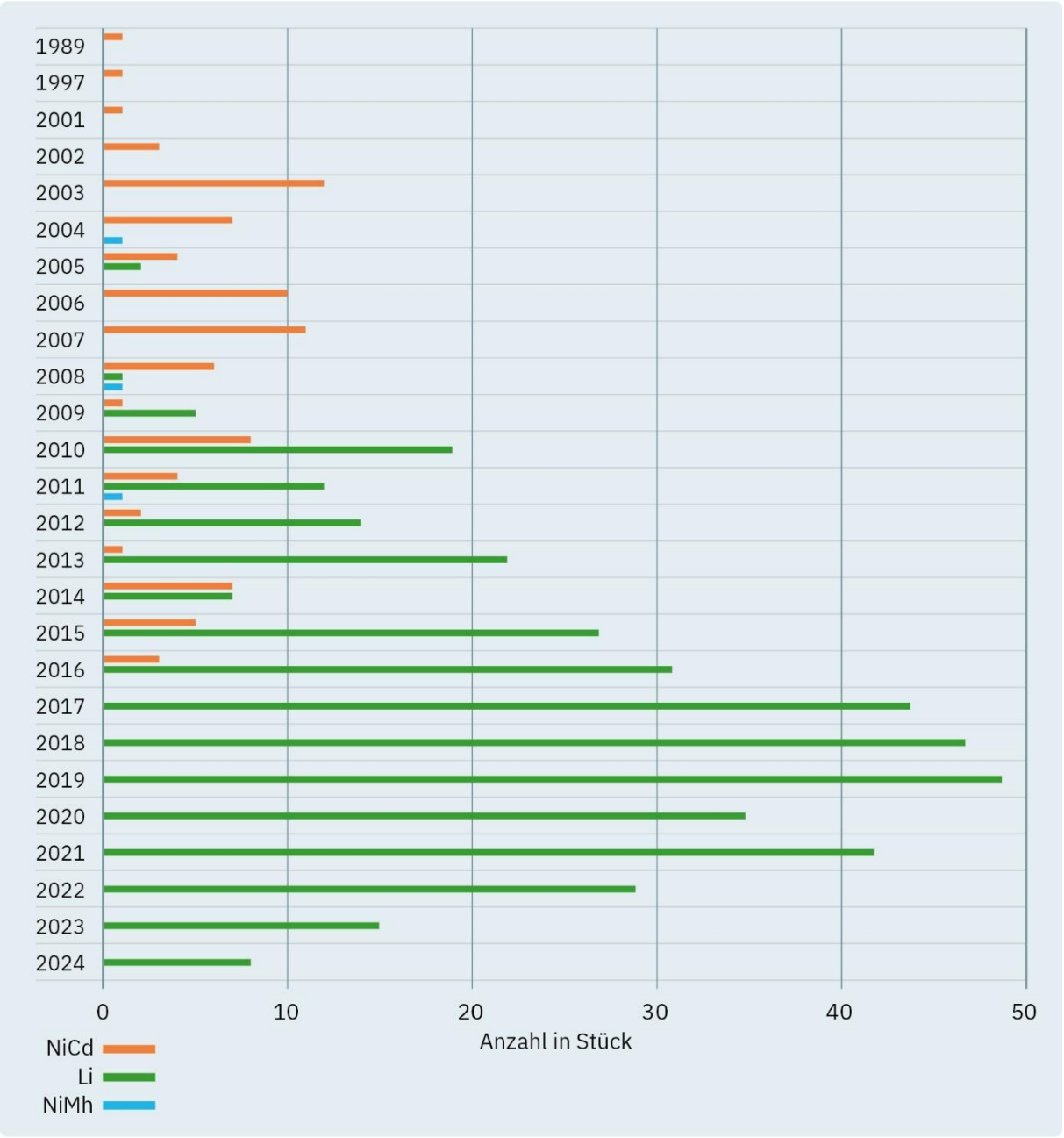


Abbildung 3.9: Anzahl sortierter Batterien sortiert nach Herstellungsjahr und Zellchemien, insgesamt.

Die Analyse des Ladezustands (SoC) zeigte, dass insgesamt rund 70 % der Powertoolbatterien tiefentladen waren. Der Anteil tiefentladener NiCd-Batterien war dabei höher als bei LIB, was auf deren geringere Selbstentladung zurückzuführen ist. Zudem ließ sich ein Zusammenhang zwischen Batterieralter und SoC feststellen: Neuere Batterien wiesen im Durchschnitt einen höheren Ladezustand auf (siehe Abbildung 3.10).

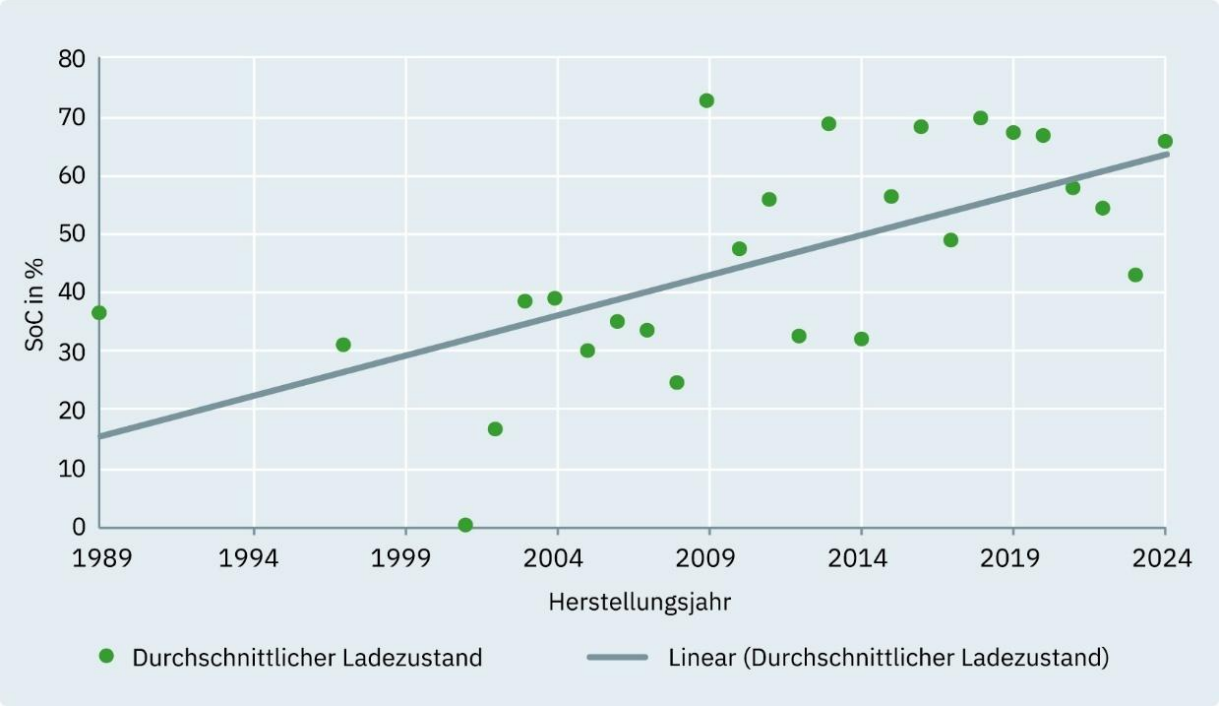


Abbildung 3.10: SoC in % nach Herstellungsjahr, über alle untersuchten Elektrochemien verteilt.

Bei manchen Batterien konnte der Einsatzbereich anhand des Typenschildes ermittelt werden (privat oder gewerblich). Für die Batterien, bei denen dies erkennbar war, zeigte sich eine Verteilung von etwa 30 % Batterien aus dem privaten Gebrauch und 70 % aus dem gewerblichen Einsatz. Auffällig ist der Unterschied in der Nutzungsdauer: Während Batterien aus dem privaten Bereich im Durchschnitt eine Nutzungsdauer von etwa 8 a aufwiesen, lag die durchschnittliche Nutzungsdauer der gewerblich eingesetzten Batterien bei rund 4 a und damit nur etwa halb so hoch.

Der Massenanteil der Powertool-Batterien von 28 % in den gelben Fässern zeigt, dass diese zwar einen bedeutenden Anteil haben, die Fässer jedoch auch in hohem Maße mit anderen Batterien sowie Fehlwürfen befüllt sind. Die starke Heterogenität des Stoffstroms lässt sich durch das unterschiedliche Rückgabe- und Sortierverhalten an den einzelnen Rücknahmestellen erklären.

Die Analyse der Zellchemien bestätigt einen generellen Strukturwandel hin zu Li-Ionen-Batterien, welcher durch das NiCd-Verbot ab 2017 noch verstärkt wurde. Allerdings sind weiterhin relevante Anteile an NiCd-Batterien im Umlauf, die sich im Massenstrom für das Recycling bemerkbar machen. In den kommenden Jahren ist mit einer Abnahme des NiCd-Anteils und einer Zunahme des Li-Ionen-Anteil zu rechnen.

Die ermittelte durchschnittliche Nutzungsdauer von 10 Jahren zeigt, dass Powertool-Batterien insgesamt lange im Umlauf bleiben. Die genauere Analyse der Batterien der Einsatzgebiete (privat vs. Gewerblich) zeigt jedoch, dass die Nutzungsdauer stark vom Nutzungsumfeld abhängt. Gewerblich verwendete Batterien erleben eine deutlich höhere Belastung und intensivere Nutzung, wodurch sich deren signifikant geringere Nutzungsdauer erklären lässt.

Der Ladezustand der Batterien ist ein relevantes Kriterium für die nachgelagerten Verwertungswege. Obwohl ein hoher Anteil (70 %) der untersuchten Powertool-Batterien tiefentladen waren, war vor allem unter den Li-Ionen-Batterien ein bedeutender Anteil (50%) nicht tiefentladen. Dies deutet darauf hin, dass Potenzial für Second-Life bzw. ReUse-Anwendungen besteht, sofern eine geeignete Vorsortierung und Bewertung des Zustands erfolgt. Der Zusammenhang zwischen Batteriealter und Ladezustand zeigt außerdem, dass jüngere Batterien grundsätzlich besser für den ReUse geeignet sind.

3.3 Wiederverwendung und Verwertung

Kernbotschaft und Praxisbezug

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass ein signifikanter Anteil der Powertoolbatterien sich aus technischer Sicht wieder als Gebrauchtprodukt in Verkehr bringen ließe. Eine wirtschaftlich tragfähige Durchführbarkeit dieser Wiederinstandsetzung für eine „Second-Life“-Anwendung erscheint derzeit allerdings als nicht umsetzbar.
Bei der Sortierung sollte, sofern Absatzwege geklärt sind, die gezielte Separierung bestimmter Powertoolbatterien Berücksichtigung finden.
Die Integration einer Testung, als neuer Prozessschritt, ermöglicht dabei zusätzlich eine Tiefentladung der Batterien, wodurch deren Handhabung und Recycling vereinfacht werden.
Besondere Herausforderungen bestehen in der rechtlichen und sicherheitstechnischen Unsicherheit bei der Wiederinverkehrbringung getesteter oder wiederinstandgesetzter Batterien sowie im hohen Koordinationsaufwand mit den jeweiligen OEMs für jedes Elektrowerkzeug-System und jeden Gerätetyp. Die Wiederverwendung von Elektrowerkzeug-Batterien nach Wiederinstandsetzung oder Wiederaufarbeitung erscheint aus technischer Sicht realisierbar und wirtschaftlich tragfähig. Die unmittelbare Umsetzung wird jedoch durch rechtliche Komplexität verhindert.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die von der BDS GmbH durchgeführten Untersuchungen zur „Second-Life“-Eignung von EoL-Powertoolbatterien dargestellt. Anschließend folgt eine Darstellung der von der ERLOS GmbH vorgenommenen Verwertungsversuche mittels mechanischer Vorbehandlung.

3.3.1 Untersuchungen zur „Second-Life“-Eignung

Die Wiederinstandsetzung und stoffliche Verwertung gebrauchter Batterien gewinnt vor dem Hintergrund steigender Rohstoffpreise und wachsender Nachhaltigkeitsanforderungen zunehmend an wirtschaftlicher und ökologischer Bedeutung. Insbesondere Powertoolbatterien stellen aufgrund ihrer standardisierten Bauform und ihrer vergleichsweise hohen Restkapazität ein erhebliches Wiederinstandsetzungspotenzial dar.
Im folgenden Kapitel werden der Ablauf und die Ergebnisse des Arbeitspakets 3 „Wiederverwendung und Verwertung“ von Powertoolbatterien präsentiert. Im Mittelpunkt steht die Entwicklung eines Konzepts zur systematischen Prüfung, Sortierung und Weiterverarbeitung gebrauchter LIB, Nickel-Metallhydrid- (NiMH) sowie Nickel-Cadmium-Batterien (NiCd).
Das entwickelte Verfahren orientiert sich an der abfallwirtschaftlichen Hierarchie laut KrWG und priorisiert damit die Vorbereitung zur Wiederverwendung durch Wiederinstandsetzung vor der stofflichen Verwertung.

Der Schwerpunkt des vorliegenden Arbeitspakets liegt darauf den Anteil wiederinstandsetzbare Batterien zu maximieren und den Recyclingprozess für nicht wiederinstandsetzbare Einheiten zu optimieren. Die entwickelte Prozesskette umfasst die Schritte Sortierung, Prüfung, Klassifizierung sowie Wiederinverkehrbringung oder Recyclingzuführung.

Material & Methoden

Stichprobencharakterisierung

Die untersuchte Stichprobe umfasste insgesamt 265 gebrauchte Powertoolakkumulatoren aus zwei unterschiedlichen Materialflüssen. Der Materialfluss der Robrt Bosch Powertools GmbH wurde aus dem eigenen Rücknahmesystem zur Verfügung gestellt, während der andere aus dem Rücknahmesystem der GRS Service GmbH stammt.

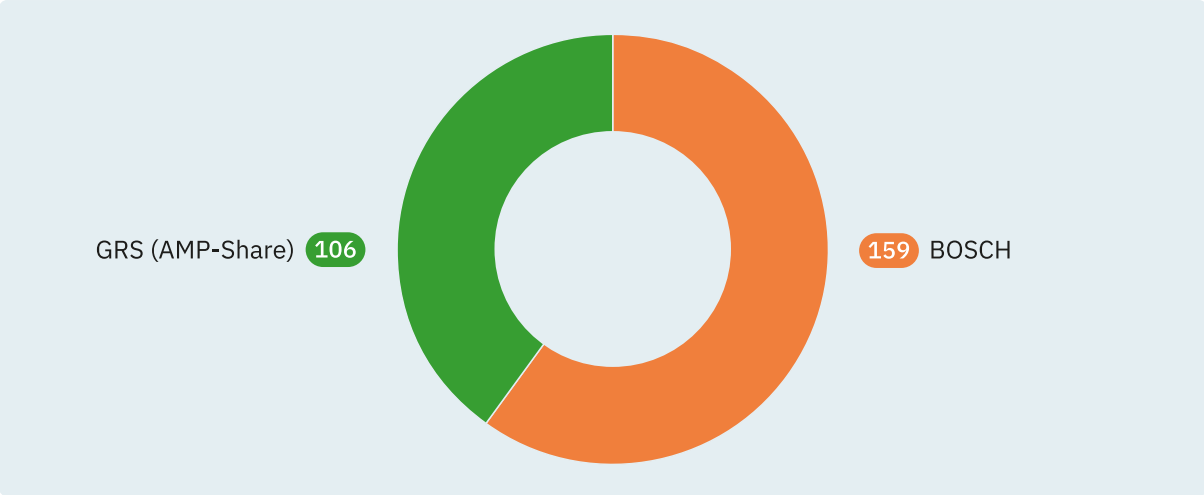


Abbildung 3.11: Herkunft der Wiederinstandgesetzten Batterien (n=265).

Die Akkumulatoren wurden als unsortierte Mischfraktion in Sammelbehältern angeliefert und entstammen dem regulären Entsorgungskreislauf. Über den vorherigen Nutzungszeitraum und die Lagerbedingungen liegen keine gesicherten Informationen vor. Die technischen Merkmale der untersuchten Stichprobe sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 3.10: Technische Merkmale der untersuchten Stichprobe.

Parameter	Spezifikation
Nennspannung	18 V
Zellkonfiguration	5 Zellen in Reihenschaltung (5s) bis zu 3 Zellen Parallel (3p)
Zellformat	Zylindrisch, 18650
Zellchemie	Lithium-Ionen (Li-Ion)
Nennkapazität	2,0 Ah – 15,0 Ah (Powertool abhängig)
Zulässiger Spannungsbereich	$U_{\min} = 14{,}5$ V bis $U_{\max} = 21{,}0$ V
Einzelzellspannung	2,9 V (entladen) bis 4,2 V (geladen)

Die technischen Grenzwerte basieren auf den Herstellerangaben der Firma Robert Bosch Powertools GmbH und wurden als Referenz für die Bewertung aller Prüflinge herangezogen.

Prüfverfahren

Das Prüfverfahren unterteilte sich in verschiedene Schritte. Im ersten Prüfschritt erfolgt eine systematische Begutachtung des äußeren Zustands anhand definierter Schadensbilder in drei Prüfbereichen. Die Bewertungskriterien sind in der folgenden Tabelle zu sehen.

Tabelle 3.11: Bewertungskriterien bei visueller Vorprüfung.

Prüfbereich	Bewertungskriterien
Gehäuse	Brüche, Risse, Kratzer, Verschmutzungen
Ladezustandsanzeige	Funktionsfähigkeit der LEDs und Bedienelemente
Kontakte	Mechanische Beschädigungen, Korrosion, Oxidation

Die Bewertung erfolgte in den Kategorien A (neuwertig), B (gebrauchsspurig) und C (stark abgenutzt). Akkumulatoren mit schwerwiegenden Beschädigungen wurden aus dem Wiederverwendungspfad ausgeschlossen.
Die Klemmenspannung wurde mittels eines kalibrierten Digitalmultimeters im unbelasteten Zustand gemessen. Die Klassifikation erfolgte anhand der folgenden Spannungsbereiche (siehe Tabelle 3.12).

Tabelle 3.12: Bewertungskategorien und Spannungsbereiche für EoL-batterien.

Kategorie	Spannungsbereich	Bewertung
Potenziell nutzbar	$14{,}5\ \text{V} \leq U \leq 21{,}0\ \text{V}$	Weiterführung zu C3/C4
Entladung erforderlich	$U > 21{,}0\ \text{V}$	Kontrollierte Entladung vor Prüfung
Tiefentladen	$U < 14{,}5\ \text{V}$	Weiterführung zu C3 (Einzelzellprüfung)
Absolut tiefentladen	$U < 4{,}0\ \text{V}$	Ausschluss, Zuführung zum Recycling

Akkumulatoren mit unklarem Zustand wurden fachgerecht demontiert. Die Einzelzellspannungen wurden nach Trennung der Zellverbinder separat gemessen und dokumentiert (siehe C3). Die Bewertung erfolgte anhand des zulässigen Einzelzellspannungsbereichs von 2,9V–4,2V. Es werden folgende Parameter je Akkumulator definiert:

- Akkumulator-ID (fortlaufende Kennung)
- Gesamtmasse (in g)
- Gesamtspannung (in V)
- Einzelzellspannungen (Zellen 1–5, in V)

Die Kapazitätsbestimmung erfolgte durch dreifache Zyklisierung unter konstanten Strom-Spannungs-Bedingungen (CC-CV-Verfahren). Die Prüfparameter sind in Tabelle definiert.

Tabelle 3.13: Prüfparameter für Zyklierungsverfahren.

Parameter	Wert	Beschreibung
Anzahl Zyklen	3	Vollständige Lade-/Entladezyklen
$U_{\mathbf{min}}$	14,5 V	Entladeschlussspannung
$U_{\mathbf{max}}$	21,0 V	Ladeschlussspannung
$I_{\mathbf{Entladung}}$	18 A	Entladestrom
$I_{\mathbf{Ladung}}$	10 A	Ladestrom

Die gemessene Kapazität C_{gem} ergibt sich aus der Integration des Entladestroms über die Zeit. Aus den drei Zyklen wird der arithmetische Mittelwert gebildet.

Kennwertberechnung

State of Health (SoH)

Der State of Health beschreibt das Verhältnis der gemessenen Kapazität zur Nennkapazität und wurde wie folgt berechnet:

$$\text{SoH} = \frac{C_{\text{gem}}}{C_{\text{nenn}}} * 100\ \%$$

Dabei bezeichnet:

- C_{gem}: Gemessene Kapazität (Mittelwert aus 3 Zyklen, in Ah)
- C_{nenn}: Nennkapazität laut Herstellerangabe (in Ah)

Klassifikation (Grading)

Die Einstufung in Qualitätsklassen erfolgte anhand des ermittelten SoH-Werts gemäß dem in Tabelle dargestellten Schema.

Tabelle 3.14: Qualitätsklassen für EoL-Batterien anhand von SoH-Bereichen.

Klasse	SoH-Bereich	Verwendung
A	$\geq 80\ \%$	Uneingeschränkte Wiederverwendung
B	$\geq 70\ \%$	Wiederverwendung mit Einschränkungen
C	$\geq 60\ \%$	“Second-Life”-Anwendungen
Recycling	$<60\ \%$	Zuführung zum Recyclingpfad

Die Gesamtbewertung der analysierten Akkumulatoren ergibt sich aus der Kombination des messtechnisch ermittelten SoH und der visuellen Bewertung gemäß der Gradingmatrix (siehe Tabelle 3.15). Eine Liste mit Geräten und Hilfsmitteln, die für die Durchführung des Prüfverfahrens notwendig ist, befindet sich im Anha

Konzept zur Wiederinstandsetzung

Das Konzept zur Wiederinstandsetzung von EoL-Batterien wurde im Rahmen des Projektes erarbeitet und ist in Abbildung dargestellt. Es setzt sich aus insgesamt 6 Abschnitten mit 11 Unterabschnitten zusammen. Diese werden im weiteren Verlauf tiefergehend erläutert.

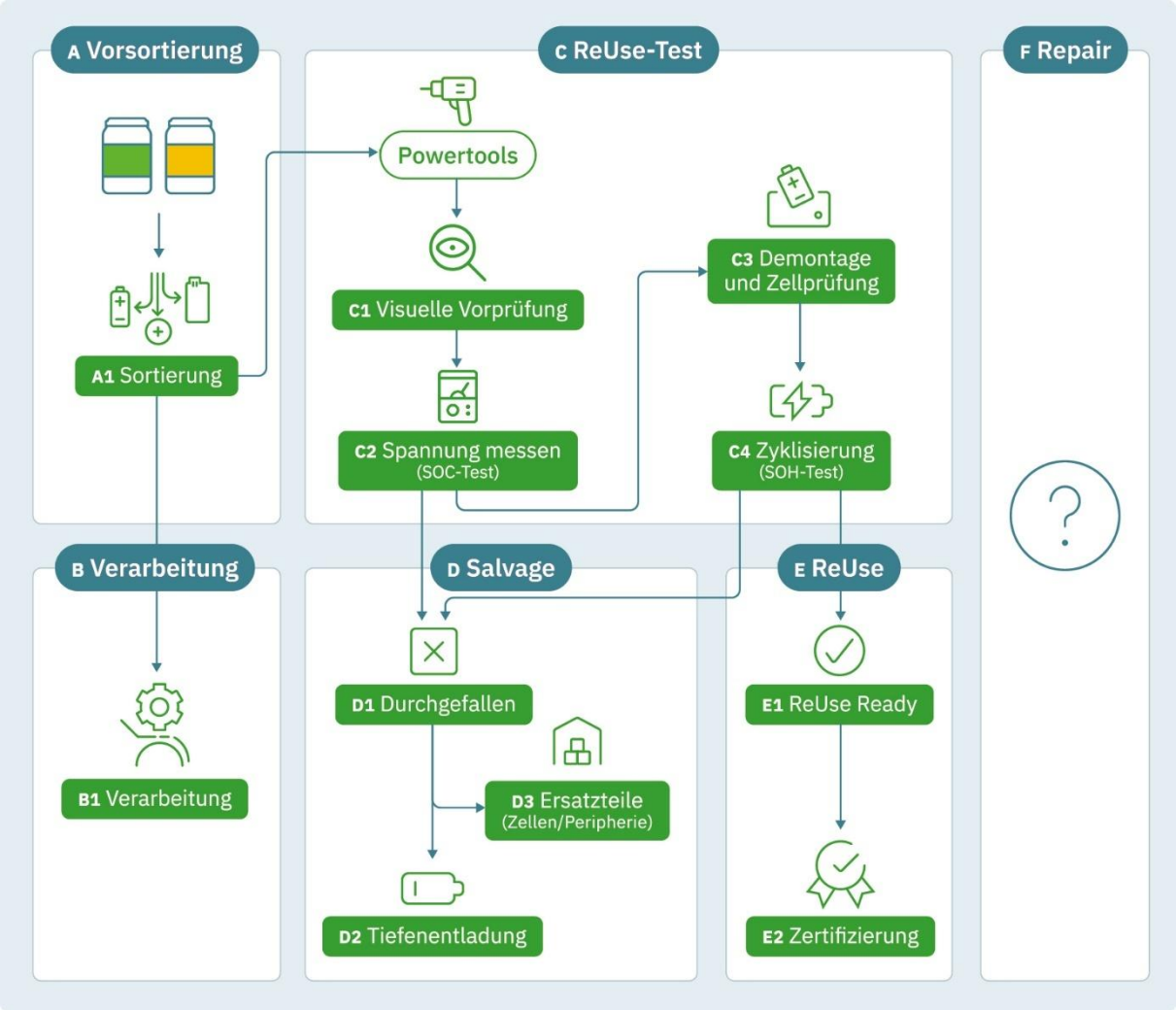


Abbildung 3.12: Prozessübersicht zur Wiederverwendung und Verwertung von Powertoolbatterien.

A – Vorsortierung: Im ersten Schritt (A1) werden die angelieferten Batterien aus dem Sammelbehälter sortiert und nach Materialtyp separiert. Nicht als Powertoolbatterien klassifizierte Einheiten werden direkt der Verarbeitung (B1) zugeführt.

B – Verarbeitung: Batterien, die nicht für den ReUse-Test geeignet sind, durchlaufen den Verarbeitungsprozess (B1) und werden dem entsprechenden Recyclingverfahren zugeführt.

C – ReUse-Test: Powertoolbatterien durchlaufen eine vierstufige Prüfkette. Zunächst erfolgt eine visuelle Vorprüfung (C1), gefolgt von einer Spannungsmessung (C2, SoC-Test). Batterien mit unklarem Zustand werden demontiert und einer Einzelzellprüfung unterzogen (C3), bevor abschließend eine Zyklisierung zur Kapazitätsbestimmung (C4, SOH-Test) durchgeführt wird.

D – Salvage: Batterien, die den ReUse-Test nicht bestehen, werden dem Salvage-Prozess zugeführt. Dabei werden durchgefallene Einheiten (D1) einer kontrollierten Tiefentladung (D2) unterzogen

und anschließend recycelt. Verwertbare Komponenten wie Zellen und Peripheriebauteile werden als Ersatzteile (D3) rückgewonnen.

E – ReUse: Batterien, die alle Prüfstufen erfolgreich durchlaufen, erhalten die ReUse-Ready-Klassifizierung (E1) und werden anschließend zertifiziert (E2) und zur Wiederinverkehrbringung freigegeben.

F – Repair: Der Reparaturprozess ist als optionaler Pfad dargestellt und befindet sich noch in der Konzeptionsphase.

Vorsortierung

A1 Sortierung



Abbildung 3.13: links: Angelieferter Sammelbehälter mit unsortiertem Batteriematerial; rechts: Powertool-Akku Robert Bosch Powertools GmbH vorsortiert.

Im ersten Prozessschritt erfolgt die Separierung von Powertoolbatterien aus der angelieferten Mischfraktion. Die angelieferten Sammelbehälter enthalten neben Powertoolbatterien häufig weitere Materialien, die zunächst aussortiert werden müssen.

Die Sortierung orientiert sich methodisch an der GRS-Sortieranalyse und umfasst drei Hauptkategorien:

- **Elektroschrott (E-Schrott):** Elektronische Bauteile und Gerätefragmente, die nicht dem Batterierecycling zugeführt werden können.
- **Gerätespezifische Batterien:** Batterien aus anderen Anwendungsbereichen wie Laptopakkus, Knopfzellen oder ähnliche Energiespeicher, die gesonderten Verwertungswegen zugeführt werden.
- **Powertoolbatterien:** Die Zielkategorie des vorliegenden Verfahrens. Diese Batterien werden nach zwei Kriterien weiter differenziert:
  - Chemische Zusammensetzung:
    - Nickel-Cadmium (NiCd)
    - Nickel-Metallhydrid (NiMH)
    - Lithium-Ionen (Li)
  - Entladezustand:
    - Tiefenentladene Batterien
    - Nicht entladene Batterien

Die Unterscheidung nach Entladezustand ist insbesondere bei LIB relevant, da nicht entladene Batterien ein erhöhtes Sicherheitsrisiko darstellen und spezielle Handhabungsmaßnahmen erfordern.

Verarbeitung

B1 Verarbeitung

Die systematische Vorsortierung ermöglicht eine effiziente Weiterverarbeitung der Materialien über definierte Verwertungswege. Nach Abschluss der Sortierung erfolgt die typenspezifische Zuführung zu den entsprechenden Recyclingprozessen:

- **E-Schrott:** Zuführung zum spezialisierten Elektroaltgeräterecycling
- **NiMH-Batterien:** Nickel-Metallhydrid-spezifisches Recyclingverfahren
- **NiCd-Batterien:** Nickel-Cadmium-spezifisches Recyclingverfahren
- **LIB (nicht entladen):** Recyclingverfahren mit vorgeschalteter Entladung
- **LIB (entladen):** Direktes Lithium-Batterierecycling

ReUse Test

C1 Visuelle Vorprüfung

Der erste Prüfschritt umfasst eine systematische Erfassung und Einschätzung des visuellen Zustands der Batterie. Die Begutachtung erfolgt anhand definierter Schadensbilder in drei Prüfbereichen:

- **Gehäuse:** Die äußere Hülle der Batterie wird auf strukturelle Integrität und Oberflächenbeschaffenheit untersucht. Relevante Schadensbilder umfassen:
  - Brüche oder Risse im Gehäusematerial
  - Kratzer und oberflächliche Beschädigungen
  - Verschmutzungen (Staubablagerungen, klebrige Flüssigkeiten, sonstige Rückstände)
- **Ladestandsanzeige:** Die integrierte Statusanzeige wird auf Funktionsfähigkeit und mechanische Unversehrtheit geprüft. Dabei werden folgende Aspekte bewertet:
  - Zustand der Anzeigeabdeckung (Beschädigungen, Trübungen)
  - Funktionsfähigkeit der Bedienelemente (Knöpfe, Taster)
  - Funktionsfähigkeit der optischen Anzeige (LEDs)
- **Kontakte:** Die elektrischen Anschlusskontakte stellen eine sicherheitskritische Komponente dar und werden besonders sorgfältig inspiziert. Mögliche Schadensbilder sind:
  - Mechanische Beschädigungen (gebrochen, verbogen)
  - Korrosionserscheinungen (Oxidation, Verfärbungen)

Batterien mit schwerwiegenden Beschädigungen in einem der drei Prüfbereiche werden aus dem ReUse-Prozess ausgeschlossen und dem Salvage- oder Recyclingverfahren zugeführt.

Tabelle 3.15 Gradingmatrix zur Klassifikation von Powertool-Akkumulatoren anhand des SoH und des visuellen Zustands.

		State of Health			
		≥ 80 %	≥ 70 %	≥ 60 %	< 60 %
Visueller Zustand	Gehäuse (A)	A	B	C	♻
	Gehäuse (B)	B	B	C	♻
	Gehäuse (C)	C	C	C	♻
	Gehäuse gebrochen oder verschmutzt	🔧 ♻	🔧 ♻	🔧 ♻	♻
	Ladest.-Anz. (i. O.)	A	B	C	♻
	Kontakte (i. O.)	A	B	C	♻

C2 Spannungsmessung
Die Spannungsmessung bildet das zentrale quantitative Prüfkriterium zur Bewertung des Batteriezustands. Im Rahmen der Untersuchung wurden insgesamt 265 Batterien geprüft, davon 159 Robert Bosch Powertools GmbH-Batterien sowie 106 AMP-Share-Batterien aus dem Rücknahmesystem der GRS Service GmbH.

Die Bewertung der gemessenen Spannungswerte erfolgt auf Grundlage der technischen Datenblätter der Firma Robert Bosch Powertools GmbH. Der nominale Spannungsbereich einer funktionsfähigen 18-V-Batterie liegt zwischen 14,5 V (entladen) und 21 V (vollständig geladen). Diese Grenzwerte entsprechen einer Zellspannung von 2,9 V bis 4,2 V bei einer Konfiguration von fünf in Reihe geschalteten Zellen.

Auf Basis dieser Spezifikationen wurden die Batterien in folgende Kategorien klassifiziert:

Tabelle 3.16 Klassifikation geprüfter Powertool-Akkumulatoren anhand der gemessenen Klemmenspannung sowie Bewertung der Wiederverwendbarkeit.

Kategorie	Spannungs-bereich	Anteil der Gesamtstückzahl	Bewertung
Potenziell nutzbar	14,5 V – 21 V	38 %	Direkte Wiederverwendung möglich
Entladung erforderlich	> 21 V	27 %	Nach kontrollierter Entladung nutzbar
Tiefentladen	< 14,5 V	62 %	Weitere Prüfung erforderlich
Absolut tiefentladen	< 4 V	35 %	Irreversible Zellschädigung wahrscheinlich

*Die Kategorie „Absolut tiefentladen" ist eine Teilmenge der Kategorie „Tiefentladen"

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass lediglich 38 % der untersuchten Batterien direkt für eine Wiederverwendung geeignet sind. Bei 27 % der Batterien liegt die Spannung oberhalb des zulässigen Bereichs; diese erfordern eine kontrollierte Entladung vor der weiteren Verarbeitung.

Der hohe Anteil tiefentladener Batterien (62 %) weist auf längere Lagerzeiten oder unsachgemäße Handhabung im Entsorgungsprozess hin. Insbesondere absolut tiefentladene Batterien (< 4 V) zeigen mit hoher Wahrscheinlichkeit irreversible Zellschädigungen durch Kupferauflösung an der Anode und sind in der Regel nicht mehr für eine Wiederverwendung geeignet. Eine Übersicht über die Spannungsverteilung der getesteten Batterien befindet sich im Anhang in Abbildung A 3.

C3 Demontage & Zellprüfung
Bei Batterien mit unklarem Zustand erfolgt eine Demontage zur Einzelzellprüfung. Der SoC-Test definiert den nutzbaren Spannungsbereich zwischen 14,5 V und 21 V (entsprechend einer Zellspannung von 2,9 V bis 4,2 V). Das Ergebnis der Zellspannungsprüfung ist im Anhang in Abbildung A 4 finden. Beispielhaft zeigt Abbildung einen demontierten Powertool-Akkumulator.



Abbildung 3.14 Demontierter Powertool-Akkumulator mit freiliegenden Einzelzellen, entnommenen Befestigungsschrauben und handschriftlich dokumentierten Messwerten (Akkumulator-ID: 2.63).

C4 Zyklisierung

Abschließend erfolgt eine Zyklisierung zur Überprüfung der Kapazität und des Alterungszustands der Batteriezellen. Dieses Verfahren ermöglicht eine belastbare Aussage über die tatsächlich nutzbare Kapazität unter realen Betriebsbedingungen.

Prüfverfahren:

Die Zyklisierung umfasst drei vollständige Lade- und Entladezyklen. Aus den ermittelten Kapazitätswerten wird der arithmetische Mittelwert gebildet, um zufällige Messschwankungen zu minimieren und einen repräsentativen Kapazitätswert zu erhalten.

Testparameter:

Tabelle 3.17 Parametrierung des Zyklisierungsverfahrens zur Kapazitätsbestimmung im Prüfschritt C4

Parameter	Wert	Beschreibung
Anzahl Zyklen	3	Vollständige Lade-/Entladezyklen
U_min	14,5 V	Untere Abschaltspannung (Entladeschlussspannung)
U_max	21,0 V	Obere Abschaltspannung (Ladeschlussspannung)
I_Entladung	18 A	Entladestrom
I_Ladung	10 A	Ladestrom

Kapazitätsbestimmung:

Die gemessene Kapazität (Ah) wird aus der Integration des Entladestroms über die Zeit ermittelt. Aufgrund des gewählten Entladestroms von 18 A, der oberhalb des typischen Nennstroms liegt, ist von einer konservativen Bewertung der Kapazität auszugehen. Die tatsächlich nutzbare Kapazität bei geringeren Entladeströmen liegt voraussichtlich höher als der gemessene Wert.

Dieser Umstand ist auf den spannungsabhängigen Kapazitätsverlust bei hohen Entladeströmen zurückzuführen: Höhere Ströme verursachen größere Spannungsabfälle an den inneren Widerständen der Zelle, wodurch die Entladeschlussspannung früher erreicht wird.

Auf Grundlage der Zyklisierungsergebnisse erfolgt die Bestimmung des State of Health (SoH). Dieser Kennwert beschreibt das Verhältnis der gemessenen Kapazität zur nominalen Kapazität und dient als zentrales Kriterium für die Klassifizierung der Batterien.

Berechnung:

$$SoH = \frac{C_{gem}}{C_{nenn}} * 100\ \%$$

Dabei bezeichnet:

C_{gem} = gemessene Kapazität während der Zyklierung

C_{nenn} = vom Hersteller angegebene Nennkapazität

Klassifizierungssystem:

Die Batterien werden anhand des ermittelten SoH-Werts in vier Kategorien eingeteilt (siehe Tabelle 3.18).

Tabelle 3.18 Klassifikationsschema zur Einstufung gebrauchter Powertool-Akkumulatoren in Qualitätsklassen anhand des State of Health (Grading)

Kategorie	SoH-Bereich	Bewertung	Verwendung
A (grün)	≥ 80 %	Sehr gut	Uneingeschränkte Wiederverwendung
B (gelb)	≥ 70 %	Gut	Wiederverwendung mit Einschränkungen
C (orange)	≥ 60 %	Ausreichend	„Second-Life"-Anwendungen
Recycling	< 60 %	Ungenügend	Zuführung zum Recycling

Messergebnisse:

Die Anwendung des Klassifizierungssystems auf die untersuchten Batterien ergab die in Tabelle 3.19 dargestellten Ergebnisse. Insgesamt hatten 59 % der EoL-Batterien von Robert Bosch Powertools GmbH sowie 84 % der EoL-Batterien der GRS Service GmbH eine zu niedrige Spannung (< 14 V), um den SoH ermitteln zu können.

Tabelle 3.19 Verteilung der Qualitätsklassen nach Gradingschema für die Sortierklassen Robert Bosch Powertools GmbH und GRS Service GmbH (Prüfschritt C4, Teilstichprobe)

Kategorie	Sortierklasse Robert Bosch Powertools GmbH (n = 64)	Sortierklasse GRS (n = 19)
A	7 %	0 %
B	15 %	11 %
C	8 %	0 %
Recycling	11 %	5 %
Summe	41 %	16 %

Die Ergebnisse zeigen, dass bei den Robert Bosch Powertools GmbH-Batterien insgesamt 30 % der geprüften Einheiten (Kategorien A, B und C) für eine Wiederverwendung geeignet sind. Bei den Batterien aus dem System der GRS Service GmbH liegt dieser Anteil mit 11 % deutlich niedriger.
Der geringe Anteil der Kategorie A (≥ 80 %) weist auf einen fortgeschrittenen Alterungszustand der untersuchten Batterien hin. Dies ist auf die typische Nutzungsdauer vor der Entsorgung sowie mögliche Lagerungseffekte zurückzuführen.

Salvage

Batterien, die den ReUse-Test nicht bestehen, durchlaufen den Salvage-Prozess zur Komponentenrückgewinnung. Ziel dieses Prozesses ist die maximale Wertschöpfung aus nicht wiederinstandsetzbaren Batterieeinheiten durch systematische Demontage und Komponentenseparierung.

D1 Durchgefallen

Batterien, die sämtliche Prüfkriterien verfehlen und keine verwertbaren Einzelkomponenten aufweisen, werden direkt dem Recycling zugeführt. Dies betrifft insbesondere Einheiten mit folgenden Merkmalen:

- Schwerwiegende mechanische Beschädigungen des Gehäuses und der Zellen
- Korrosionsschäden an mehreren Komponenten
- Thermische Vorschädigungen (Verfärbungen, Verformungen)
- Elektrolytaustritt

Diese Batterien durchlaufen keine weitere Demontage, da der Aufwand für die Komponentenrückgewinnung den potenziellen Nutzen übersteigt.

D2 Tiefenentladung

Stark tiefentladene Batterien mit irreversibler Zellschädigung werden vor dem Recycling einer kontrollierten Tiefentladung unterzogen. Die vollständige Entladung dient der sicheren Handhabung im nachfolgenden Recyclingprozess und minimiert das Risiko thermischer Reaktionen. Der Prozess umfasst folgende Schritte:

1. Messung der Restspannung
2. Kontrollierte Entladung über definierte Lastwiderstände
3. Verifizierung der vollständigen Entladung (U < 1 V)
4. Dokumentation und Zuführung zum Recycling

D3 Ersatzteile

Aus nicht wiederinstandsetzbaren Batterien, die einzelne intakte Komponenten aufweisen, lassen sich Ersatzteile für Reparaturzwecke rückgewinnen. Die Rückgewinnbarkeit variiert je nach Komponententyp und ist in Tabelle aufgeführt.

Tabelle 3.20 Verteilung der Qualitätsklassen nach Gradingschema für die Sortierklassen Robert Bosch Powertools GmbH und GRS (Prüfschritt C4, Teilstichprobe)

Komponente	Rückgewinnbarkeit
Zellen	Sehr gut
Gehäuse	Gut
Kupferleiter	Schlecht
Elektronik	Schlecht

Verwendung rückgewonnener Komponenten:

- **Zellen:** Einsatz als Ersatzzellen bei der Reparatur (Prozess F) oder Verwendung in „Second-Life“-Anwendungen mit reduzierten Leistungsanforderungen
- **Gehäuse:** Nutzung als Ersatzgehäuse bei mechanisch beschädigten, aber elektrisch intakten Batterien

Die Rückgewinnung von Kupferleitern und Elektronikkomponenten hat sich aufgrund des hohen Demontageaufwands. der Fragilität der Bauteile und der geringen Standardisierung als wirtschaftlich nicht sinnvoll herausgestellt. Diese Komponenten werden daher dem Materialrecycling zugeführt.



Abbildung 3.15 Vollständig demontierter Powertool-Akkumulator mit beschrifteten Einzelzellen und sortierten Bauteilen (Akkumulator-ID: 1.40, Masse: 959 g, Gesamtspannung: 1,6 V).

„Second-Life“-Optionen

E1 ReUse Ready Deklaration

Batterien, die alle Prüfstufen erfolgreich durchlaufen, erhalten eine ReUse-Ready-Deklaration (siehe Abbildung 3.16). Dieses Zertifikat dokumentiert die Prüfergebnisse und bestätigt die Eignung der Batterie für eine erneute Verwendung in einer zweiten Nutzungsphase.



Abbildung 3.16 Powertool-Akkumulator mit handschriftlichem Prüfprotokoll vor der Zyklisierung (Akkumulator-ID: 2.59, Sortierklasse: Robert Bosch Powertools GmbH).

Ein Entwurf für ein Prüfprotokoll befindet sich in im Anhang in Abbildung A 1 und A2.

Eine Übersicht über den genauen Inhalt der ReUse-Ready-Deklaration befindet sich im Anhang in Tabelle A 4. Die Deklaration erfüllt mehrere Funktionen. Diese sind unter anderem:

- **Qualitätssicherung:** Nachvollziehbare Dokumentation der durchgeführten Prüfungen
- **Rückverfolgbarkeit:** Eindeutige Zuordnung der Batterie über die gesamte Nutzungsdauer
- **Transparenz:** Information des Endnutzers über den Zustand und die Leistungsfähigkeit
- **Haftungsabsicherung:** Nachweis der ordnungsgemäßen Prüfung vor Wiederinverkehrbringung

E2 Wieder Inverkehrbringung

Nach erfolgreicher Zertifizierung erfolgt die Freigabe zur erneuten Inverkehrbringung der Batterien auf dem Sekundärmarkt. Die wiederinstandgesetzten Batterien werden entsprechend ihrer gemessenen Kapazität und ihres Zustands kategorisiert und für unterschiedliche Anwendungsbereiche freigegeben.

Kategorisierung nach Kapazität:

Tabelle 3.21 Zuordnung von Qualitätsklassen zu Anwendungsbereichen auf Grundlage der relativen Restkapazität.

Kapazität (relativ zum Nennwert)	Grade	Anwendungsbereich
≥ 80 %	A	Professioneller Einsatz, hohe Leistungsanforderungen
80–70 %	B	Standardanwendungen im Heimwerkerbereich
70–60 %	C	„Second-Life"-Anwendungen mit reduzierten Anforderungen
< 60 %	Recycling	Vorbereitung der Batterien für die stoffliche Verwertung

Die wiederinstandgesetzten Batterien werden mit einer eindeutigen Kennzeichnung versehen, die folgende Informationen enthält:

- Hinweis auf den Status als wiederinstandgesetztes Produkt
- Referenz zur Identifikationsnummer der ReUse-Ready-Deklaration
- Angabe der gemessenen Kapazität
- Datum der Zertifizierung
- Evtl. QR-Code

Diese Kennzeichnung gewährleistet Transparenz gegenüber dem Endnutzer und ermöglicht eine informierte Kaufentscheidung.

Eine Markierung der Batterien mit einem QR-Code ist auch in diesem Prozessschritt möglich, jedoch nicht verpflichtend. Diese kann dann alle oben genannten Informationen beinhalten und das Prüfprotokoll mit hinterlegen. Gegenüber einem digitalen Produktpass kann bei einer solchen digitalen Markierung durch den Tester nur ein geringer Informationsumfang hinterlegt werden.

Wiederinstandsetzung

Batterien mit reparablen Defekten können durch den Austausch einzelner Komponenten - durch geschultes Fachpersonal - ihre volle Funktion wiedererlangen. Dieser Prozess ermöglicht die Wiederinstandsetzung von Batterien, die aufgrund einzelner defekten Komponenten den ReUse-Test nicht bestanden haben, jedoch über eine Mehrheit funktionsfähiger Bauteile verfügen.
Vor der Reparatur erfolgt eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit und technischen Machbarkeit. Folgende Kriterien bestimmen die Reparaturfähigkeit.

Tabelle 3.22: Entscheidungskriterien zur Bewertung der Reparaturwürdigkeit gebrauchter Powertool-Akkumulatoren.

Kriterium	Reparatur sinnvoll	Reparatur nicht sinnvoll
Anzahl defekter Zellen	≤ 2 von 5 Zellen	> 2 von 5 Zellen
Zustand BMS	Intakt	Defekt oder beschädigt
Gehäusezustand	Intakt oder leicht beschädigt	Schwere strukturelle Schäden
Kontakte	Intakt oder reinigbar	Gebrochen oder stark korrodiert

Der Reparaturprozess konzentriert sich auf den Austausch folgender Komponenten:

- **Einzelzellen:** Der Ersatz defekter Einzelzellen bildet den häufigsten Reparaturfall. Voraussetzung ist ein intaktes Batteriemanagementsystem. Die Ersatzzellen stammen aus dem Salvage-Prozess (D3) und müssen folgende Anforderungen erfüllen, da ansonsten ggf. Sicherheitsrisiken auftreten können:
  - Identischer Zelltyp (Kapazität, Spannungsbereich, Entladestrom)
  - Vergleichbarer Alterungszustand (SoH-Differenz < 10 %)
  - Erfolgreiche Einzelzellprüfung

Bei mechanischen Beschädigungen des Gehäuses ohne Beeinträchtigung der elektrischen Komponenten erfolgt ein Gehäusetausch. Die Ersatzgehäuse werden ebenfalls aus dem Salvage-Prozess bezogen.

- **Kontakte:** Oxidierte oder verschmutzte Kontakte können durch Reinigung oder Austausch instandgesetzt werden. Der Reparaturprozess gliedert sich in folgende Schritte:

1. **Demontage:** Fachgerechtes Öffnen des Batteriegehäuses
2. **Komponentenidentifikation:** Lokalisierung der defekten Bauteile
3. **Austausch:** Entfernen der defekten und Einsetzen der Ersatzkomponenten
4. **Zellverbindung:** Verschweißen der Zellverbinder (bei Zellentausch)
5. **Montage:** Zusammenbau und Verschluss des Gehäuses
6. **Funktionsprüfung:** Spannungsmessung und Kurztest

Nach Abschluss der Reparatur durchläuft die Batterie erneut die Prüfstufen C2 bis C4.

Tabelle 3.23: Prüfkriterien von Powertoolakkus nach den Reparaturen.

Prüfschritt	Anforderung
Spannungsmessung (C2)	Spannung im zulässigen Bereich (14,5 V–21 V)
Zellprüfung (C3)	Zellspannungsdifferenz < 0,1 V
Zyklisierung (C4)	SoH ≥ 60 %

Bei erfolgreichem Abschluss aller Prüfungen erhält die reparierte Batterie eine ReUse-Ready-Deklaration (E1) mit dem Zusatzvermerk „Refurbished". Die Klassifizierung und Wiederinverkehrbringung erfolgt analog zu den nicht reparierten Batterien gemäß dem Grading-System (E2).

Schlussfolgerung

Das vorliegende Kapitel dokumentiert ein systematisches Verfahren zur Vorbereitung zur Wiederverwendung und stofflichen Verwertung von Powertoolbatterien. Die entwickelte Prozesskette ermöglicht eine differenzierte Behandlung gebrauchter Batterien entsprechend ihres technischen Zustands.

Die Untersuchung von insgesamt 265 Batterien liefert die in Tabelle 3.24 dargestellten, zentralen Erkenntnisse.

Tabelle 3.24: Wiederverwendbarkeit von Powertool Akkus aus variierenden Materialströmen in % bezogen auf Stückzahl.

Prozessschritt	Ergebnis
Spannungsmessung	38 % potenziell nutzbar
Tiefentladung	62 % tiefentladen (< 14,5 V)
SoH-Bewertung (BOSCH, n=64)	30 % für Wiederinverkehrbringung geeignet
SoH-Bewertung (GRS, n=19)	11 % für Wiederinverkehrbringung geeignet

Wertschöpfungspotenzial:

Durch die systematische Prozesskette ergeben sich mehrere Wertschöpfungsebenen:

- **Wiederverwendung nach Wiederinstandsetzung:** Batterien der Kategorien A, B und C werden über den Sekundärmarkt wieder in Verkehr gebracht
- **Komponentenrückgewinnung:** Intakte Zellen und Gehäuse dienen als Ersatzteile für Reparaturen
- **Materialrecycling:** Nicht wiederinstandsetzbare oder reparierbare Batterien werden dem Recycling zugeführt.

Die Ergebnisse aus der analysierten Stichprobe zeigen, dass eine wirtschaftlich tragfähige Umsetzung des entwickelten Prüfverfahrens unter den gegebenen Rahmenbedingungen voraussichtlich nicht realisierbar ist. Der hohe Anteil tiefentladener Akkumulatoren (62 %) sowie die vergleichsweise geringen Wiederverwendungsquoten – insbesondere bei der GRS Service GmbH-Sortierklasse (11 %) – führen dazu, dass der personelle und apparative Aufwand der Prüfprozesskette den erzielbaren Erlös aus der Wiederverwendung in diesem Szenario (in Deutschland durchgeführte Prozesse mit deutschen Personalkosten) übersteigt.
Eine wirtschaftliche Skalierung des Verfahrens setzt daher entweder eine gezieltere Vorsortierung der eingehenden Materialströme, eine Automatisierung einzelner Prüfschritte oder eine Anpassung der Bezugskonditionen voraus. Ungeachtet der wirtschaftlichen Einschränkungen belegt das Verfahren die technische Machbarkeit einer systematischen Zustandsbewertung gebrauchter Powertool-Akkumulatoren und liefert eine fundierte Grundlage für weiterführende Optimierungsansätze.

3.3.2 Untersuchungen zur Verwertung

Um den Entscheidungsprozess für Loop 2 und Loop 3 weiter charakterisieren zu können wurden Analysen hinsichtlich der gewählten Recyclingansätze durchgeführt. Ziel war es, die Reinheit der zugeführten Zellchemie festzustellen, die für das nachgelagerte Recycling erforderlich ist.

Entladung

Die aus den vorgelagerten Entscheidungsprozessen erhaltenen Batterien wurden zunächst auf ihre optischen Eigenschaften hin untersucht, um festzustellen, wie sie für die weitere Verarbeitung entladen werden können. Für die Entladung der Batterien kam ein neues Nass-Entladekonzept zum Einsatz, da die Tiefenentladung (< 1 V) der Powertool-LIB meist durch das integrierte Batteriemanagementsystem verhindert wird. Hierbei kamen zwei verschiedene Wirkbäder zum Einsatz. Ein typisches NaCl-Bad und ein NaCl-Bad, dem Zinksalz in gewissen Konzentrationen zugesetzt wurde. Es wurde vermutet, dass die Zugabe von Zink die Korrosion während des Entladeprozesses reduziert, um die Reinheit der Batteriekomponenten zu erhalten. Die Spannung wurde zu Beginn des Entladungsprozesses und nach 24 Stunden gemessen. Die Zielspannung betrug < 1 V, laut Anlagenlieferant jedoch

lediglich < 2,1 V. Zudem wurde die Exothermie der Entladung über die Temperatur bestimmt, um etwaige Sicherheitsmaßnahmen zu entwickeln und Sicherheitsbedenken auszuschließen. Im Rahmen der Analyse wurde das bei der Entladung anfallende Abwasser auf alle potenziell relevanten Elemente hin untersucht, um die Art und Ausprägung der Wasserverunreinigung zu ermitteln. Die Entsorgung des Abwassers kann, je nach Verfügbarkeit, über eine unkritische, dezentrale Entsorgungsstelle erfolgen. Derzeit besteht jedoch noch Unkenntnis über die Standzeit des Abwassers, die für die Definition des Kaskadeneffekts der Spülung erforderlich ist.

Unabhängig vom gewählten Recyclingverfahren bietet die vorherige Entladung der Batterien erhebliche Vorteile für den gesamten Verarbeitungsprozess. Die Entladung wirkt sich positiv auf folgende Aspekte aus:

- **Transport:** Reduziertes Gefahrenpotenzial bei Lagerung und Beförderung
- **Handhabung:** Vereinfachte Prozessführung durch geringere Sicherheitsanforderungen
- **Sicherheit:** Minimierung des Brandrisikos und Vermeidung thermischer Durchgehreaktionen
- **Anlagenverschleiß:** Geringere Belastung der Recyclinganlagen durch weniger HF Entstehung und Hitzestellen

Verfahrenstechnisch fand die Entladung in einem 3-Becken-Kaskadendesign statt. Es setzte sich aus einem NaCl (+ Zn)-Wirkbad, einem H_2O-Spülbad und einem abschließenden Abtropfbad zusammen. Das gesamte Design ist in das Abluftsystem des Unternehmens integriert und gewährleistet somit eine robuste und prozesssichere Verfahrenstechnik. Des Weiteren wurde die gemeinsame Entladung von Akkus mit ähnlicher Zusammensetzung getestet, um die Effizienz bzw. Degression des gesamten Recyclingloops zu erhöhen. Gemäß der vorgestellten Konzeption wäre das Design folglich dazu imstande, sowohl die Mischchargen, die aus dem Entscheidungsprozess "Sortierbetrieb" zugeführt werden, für Loop 3 bei Bedarf zu entladen als auch Reinchargen vor der mechanischen Behandlung zu entladen. Darüber hinaus ist das System nicht anfällig für etwaige Fehlsortierungen.

Komponentenanalyse

Um zu entscheiden, welche Reinheit die Batteriecharge für die weitere Verarbeitung in Loop 2 und Loop 3 aufweisen muss, damit sie über das gewählte Nass-Entladungsverfahren vollständig tiefenentladen werden kann, wurde eine Komponentenanalyse exemplarisch an zehn BOSCH-Powertool Batterien durchgeführt. Die vorliegende Untersuchung zielte darauf ab, die Möglichkeit der gemeinsamen Verarbeitung von LIB-Powertools ähnlicher Zusammensetzung zu evaluieren. Die gemeinsame Verarbeitung der Akkus könnte eine Degression der mechanischen Vorbehandlung zur Folge haben. Die Zusammensetzung bildet die Grundlage für die Ableitung von Aussagen bezüglich der Machbarkeit des nachgelegten Recyclingsloops. Diese Erkenntnis ist von Interesse, da eine sortenreine Gewinnung der schwarzen Masse gemäß dem Chemismus als unwirtschaftlich erscheint.

Ergebnisse für die Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems für Loop 2 und Loop 3

Die optischen Untersuchungen der Batterien nach der Entladung mit dem neuen Nass-Entladekonzept zeigen, dass das gewählte Verfahren für die Entladung von Powertool-LIB mit ähnlicher Kathodenzusammensetzung durchaus geeignet ist. Es konnte eine Entladung von < 1 V innerhalb eines Zeitraums von 24 Stunden beobachtet werden. Die Tiefenentladung stellt einen entscheidenden Schritt für die Recyclingprozesse dar, da ansonsten die Sicherheitsrisiken bzw. die Prozessstabilität signifikant beeinträchtigt werden können. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die Zugabe von Zinksalzen zum Wirkbad eine signifikante Reduktion des Korrosionsangriffs bewirkte. Die Exothermie während der Entladung wies zwischen den beiden verwendeten Lösungen keinen signifikanten Unterschied auf. Es konnte ein Temperaturanstieg von ca. 25 % beobachtet werden, wobei die tatsächlichen Werte zumeist bei 4–5 °C lagen. Aufgrund des niedrigen, einstelligen Temperaturanstiegs sind keine weiteren besonderen Sicherheitsmaßnahmen zur Eindämmung eventueller thermischer Risiken erforderlich.

Die Komponentenanalyse ergab, dass der Anteil an Wertstoffen in der untersuchten schwarzen Masse etwa 60–70 Gew.-% beträgt. Darüber hinaus wurde der Anteil an weiteren wirtschaftlich interessanten Komponenten wie Batteriemanagementsystem, Kupfer, Eisen und Aluminium als unbedeutender Anteil des Gewichts verordnet. Darüber hinaus ergab die Analyse, dass die Materialien von Interesse, wie beispielsweise Cobalt, Nickel, Lithium, Mangan und Aluminium, in ähnlichen Anteilen im Elektrodenmaterial der NMC- und NCA-Chemie enthalten sind. Die Analyse der Komponenten ergab, dass die Zusammensetzung des Elektrodenmaterials der NMC- und NCA-Chemie in ähnlicher Größenordnung für Cobalt und Mangan liegt. Hinsichtlich des Gehalts an Nickel weist die NCA-LIB einen signifikant höheren Anteil auf, der nahezu dem Doppelten entspricht. Ein eher zu vernachlässigender Anteil macht das Aluminium in der Elektrode (ca. 1 Gew. %) aus. Im Hinblick auf die Hydrometallurgie ist die Unterschiedlichkeit der Zusammensetzung nicht ausschlaggebend für die Effizienz dieses Verfahrens. Vielmehr ist der Grad an Verunreinigungen durch Plastikrückstände, organische Elektrolytbestandteile und andere Bauteile der Batterie entscheidend. Das Metallextraktionsverfahren zeichnet sich durch eine hohe Selektivität aus. Es konnte festgestellt werden, dass dem Recycling Loop 2 eine Mischcharge von NMC- und NCA-Batterien zugeführt werden darf. Gegebenenfalls ist auch eine Zuführung von LMO/LCA-Batterien möglich.

3.4 Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems

Kernbotschaft und Praxisbezug

Die Identifikation von optimalen Entscheidungspunkten entlang der Entsorgungskette für EoL-Powertoolbatterien ist essenziell, um eine Ausschleusung von EoL-NMC-LIB für eine mögliche „Second-Life“-Anwendung oder hochwertige Verwertung zu erzielen. Als Entscheidungshilfetool wurden Entscheidungsbäume ausgewählt, da diese allen Akteuren entlang der Entsorgungskette von EoL-Powertoolbatterien einfach zugänglich sind und eine hohe Praxistauglichkeit aufweisen. Ebenso können sie dazu angewendet werden, eine webbased APP zu programmieren, die über Bilderkennung gewissen äußere Merkmale abgleicht und darauf aufbauend optimale Entscheidungen trifft. Als wichtigste Punkte entlang der Entsorgungskette von EoL-Powertool LIB wurde die Sammelstelle, der Sortierbetrieb sowie der Betrieb zur Wiederinstandsetzung identifiziert.

In diesem Abschnitt wird das gewählte Vorgehen zur Darstellung relevanter Entscheidungsprozesse entlang der Entsorgungskette von EoL-NMC-LIB erläutert. Zudem werden drei Ergebnisse vorgestellt, die aus der Zusammenführung der Erkenntnisse der vorangegangenen Arbeitspakete hervorgegangen sind.

3.4.1 Entwicklung der Entscheidungsprozesse

Zu Projektbeginn war vorgesehen, ein multikriterielles Bewertungssystem (Multikriterienmatrix) zur Bewertung unterschiedlicher EoL Strategien für Powertool LIB zu entwickeln. Ziel war es, ökologische, technische, rechtliche und ökonomische Kriterien systematisch zu gewichten und daraus Handlungsempfehlungen für unterschiedliche Akteure entlang der Entsorgungskette abzuleiten.

Im Verlauf des Projektes zeigte sich jedoch, dass eine solche Matrix zwar theoretisch geeignet ist, in der praktischen Anwendung jedoch nur eingeschränkt nutzbar wäre. Die Gründe hierfür lagen insbesondere in

- der Heterogenität der beteiligten Stakeholder (Sammelstellen, Sortierbetriebe, Wiederinstandsetzer, Recycler, OEMs, OfH),
- den unterschiedlichen Entscheidungskompetenzen und Informationsständen entlang der Entsorgungskette sowie
- der hohen Variabilität der Eingangsmaterialien (Zellchemie, Bauform, Zustand, Ladezustand, Herkunft).

Eine einheitliche Multikriterienmatrix hätte vorausgesetzt, dass alle Akteure über vergleichbare Daten, Bewertungsmaßstäbe und Entscheidungsspielräume verfügen. Diese Annahme erwies sich im Projektkontext als nicht realistisch.

Vor diesem Hintergrund wurde das methodische Vorgehen weiterentwickelt und an die identifizierten Praxisanforderungen angepasst. Anstelle einer zentralen Multikriterienmatrix wurden akteursspezifische Entscheidungsbäume entwickelt, die entlang der realen Entsorgungskette ansetzen und konkrete Entscheidungssituationen abbilden.

Die Entscheidungsbäume erfüllen dabei dieselbe Funktion wie die ursprünglich vorgesehene Multikriterienmatrix: Sie strukturieren Entscheidungsprozesse, berücksichtigen relevante Kriterien (z. B. Zell-chemie, äußerer Zustand, Ladezustand, Identifizierbarkeit, rechtliche Zulässigkeit) und führen zu einer systematischen Zuordnung von Batterien zu geeigneten End of Life Strategien (Loop 1–3).

Durch die Wahl von Entscheidungsbäumen konnte die Praxistauglichkeit, Nachvollziehbarkeit und Übertragbarkeit des Entscheidungshilfesystems deutlich erhöht werden. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) profitieren von einer niedrigschwelligen, schrittweisen Entscheidungslogik, die ohne komplexe Datenerhebung oder Bewertungsmodelle angewendet werden kann.

Ein Entscheidungsbaum ist eine grafische Darstellung von Entscheidungsprozessen in Form eines baumartigen Diagramms, das hierarchische Entscheidungen, Optionen und mögliche Ergebnisse strukturiert abbildet (Haufe Akademie, 2025). Im Projekt wurde kein klassischer Entscheidungsbaum verwendet, sondern eine an den Entscheidungsbaum angelehnter Entscheidungsprozess kreiert. Die verwendeten Symbole unterscheiden sich daher von den klassischen Entscheidungsbäumen, die in der Entscheidungsfindung in Unternehmen eingesetzt wird. Ebenso findet keine Wahrscheinlichkeitszuordnung für die einzelnen Entscheidungszweige statt.

Folgende Begrifflichkeiten die im Rahmen von Entscheidungsbäumen häufig verwendet werden, werden im Folgenden Abschnitt anhand von (Haufe Akademie, 2025) definiert.

- **Entscheidungsknoten** bezeichnen interne Knoten, an denen eine Entscheidung oder ein Test stattfindet, oft als Rechtecke dargestellt. Sie unterscheiden sich von Zufallsknoten (rund), die Unsicherheiten modellieren.
- **Entscheidungszweige** sind die Verbindungen zwischen Knoten, die Optionen, Bedingungen oder Konsequenzen darstellen, meist als Linien oder Pfeile. Sie tragen oft Wahrscheinlichkeiten oder Kosten.

Die Entscheidung, ob eine Batterie für Loop 1 „Wiederinstandsetzung“ geeignet ist oder dem Loop 2 „Stoffliche Verwertung als Rohstoff der Kathodenherstellung“ oder Loop 3 „Stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff“ zugeführt werden sollte, kann an unterschiedlichen Stellen in der Entsorgungskette getroffen werden. Diese relevanten Prozesse sind in der folgenden Abbildung in grün dargestellt. Je nach optischem bzw. äußeren und technischem bzw. inneren Zustand der Batterie kann eine Bewertung der Eignung für eine der drei Loops mit oder ohne Werkzeug oder technischen Hilfsmitteln erfolgen. Teilweise reicht das bloße menschliche Auge aus, um eine erste Einordnung hinsichtlich der Eignung zu treffen. Je weiter man jedoch den Entscheidungsbaum nach unten geht oder auch Entscheidungsbäume betrachtet, die nach der Sammelstelle entlang der Entsorgungskette zum Einsatz kommen, wird der Einsatz von Messwerkzeug oder speziellen Sensoren notwendig.

Abbildung gibt einen Überblick über den Lebenszyklus und die zu erwartende Entsorgungskette nach Erreichen des ersten EoL. Im Folgenden werden, die in Abbildung dargestellten Loops ausführlich beschrieben.

Definition Loop 1 „Wiederinstandsetzung“

Das EoL einer Batterie tritt nach der ersten Nutzungsphase auf. Es wird durch einen technischen Defekt oder durch sinkende und letztendlich nicht mehr ausreichende Kapazität der Batterie erreicht. Der Verbraucher gibt die EoL-Batterie an einer designierten Sammelstelle ab. Nicht ordentlich entsorgte Batterien werden in diesem Schaubild nicht beachtet. An der Sammelstelle durchläuft die Batterie eine erste optische Prüfung. Nach erfolgreicher Prüfung und Identifikation wird die Batterie einem Betrieb für Wiederinstandsetzung zugeführt und dort auf ihre technischen Parameter hin überprüft. Andere Zuführungswege existieren nicht. Theoretisch wäre eine Zuführung aus einem Sortierbetrieb möglich, allerdings erscheint eine Koordination des Transports zwischen Sortierbetrieb und Wiederinstandsetzungsbetrieb als zu komplex. Weiterhin wurden NMC-LIB, die einem Sortierbetrieb zugeführt werden, optimalerweise schon an der Sammelstelle auf ihre optische Tauglichkeit geprüft. Wenn die Batterie während des Wiederinstandsetzungsprozesses, mit oder ohne Manipulation am Gehäuse oder der Technik, mit den geforderten SOLL-Parametern für Wiederinstandsetzung übereinstimmt, kann die Batterie in eine zweite Nutzungsphase überführt werden. Der Zyklus der Wiederinstandsetzung und Nutzung kann hier möglicherweise öfter durchlaufen werden, wenn Batterieersatzteile oder Wirtschaftlichkeit gegeben sind. Loop 1 ist in Abbildung in Gelb dargestellt.

Definition Loop 2 „Stoffliche Verwertung als Rohstoff der Kathodenherstellung“

Die für dieses Projekt gewählte Loop 2 beschreibt einen mehrstufigen Recyclingprozess, der mit der Entladung der Batterie beginnt. Zuführungswege zu Loop 2 bestehen aus Batterien, die an der Sammelstelle als NMC-LIB mit optisch niedriger Qualität identifiziert werden, oder im Sortierbetrieb als Reinfraktion mit niedriger Qualität anfallen oder aber im Betrieb zur Wiederinstandsetzung technische SOLL-Parameter verfehlen und deshalb einer Verwertung zugeführt werden müssen. Nach erfolgreicher Entladung durchläuft die Batterie eine mechanische Vorbehandlung. Hierbei kommt es zu einer Zerkleinerung der Batterie sowie zu einer Separierung der einzelnen Batteriebestandteile. Dies führt zu einer erhöhten Reinheit der Ausgangsfraktionen, was zur Verbesserung der Prozessstabilität in der Hydrometallurgie beiträgt. Nach erfolgreichem hydrometallurgischem Recycling könnten die gewonnenen Sekundärrohstoffe in der Kathodenproduktion eingesetzt werden, sofern die geforderten Qualitäten erfüllt werden. Neben EoL-Batterien kann auch Produktionsausschuss in diesen Loop eingebracht werden, da dieser genau definiert ist und die hohen Anforderungen an das Inputmaterial des hydrometallurgischen Prozesses erfüllt. Daraus hergestelltes Rezyklat kann direkt in die Batterieproduktion wieder eingebracht werden. Alternativ zu Loop 2 wird derzeit weltweit auch an „Direktem Recycling“ geforscht. Es wird bisher im industriellen Maßstab allerdings nicht eingesetzt und deshalb in diesem Szenario auch nicht weiter betrachtet. Loop 2 ist in Abbildung in Orange dargestellt.

Definition Loop 3 „Stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff“

Im Unterschied zu Loop 2, bei dem ein hydrometallurgischer Prozess zum Einsatz kommt, wird in Loop 3 ein robuster und wenig selektiver pyrometallurgischer Prozess angewendet. Als pyrometallurgischer Prozess kommen Niedrigtemperatur Pyrolyse, Hochofenprozesse, Elektrolichtbogen- oder Schachtofenprozesse sowie sogenannte „Whole-Battery-Smelting“-Prozesse (dt. Ganze-Batterie-Schmelze) zum Einsatz. Der pyrometallurgische Ansatz ist insbesondere für Batterien oder Batteriefraktionen relevant, die nicht die erforderliche Qualität bzw. Reinheit für eine hydrometallurgische Verwertung aufweisen. Ein Zuführungsweg zu diesem Loop besteht nur aus dem Sortierbetrieb. Dies ist dadurch bedingt, dass alle nicht hochqualitativen und nicht identifizierbaren Batterien aus der Sammelstelle im Sortierbetrieb ausgeschleust werden. Hier entscheidet sich durch Einsatz von

passender Sensorik, ob eine Batterie in eine Reinfraktion zugeordnet werden kann, die in Loop 2 verwertet wird, oder in der Mischfraktion verbleibt und in Loop 3 endet. Vor Durchführung einer pyrometallurgischen Verwertung ist es möglich eine Entladung und mechanische Zerkleinerung durchzuführen, jedoch ist es aufgrund der Robustheit des Prozesses nicht notwendig. Je höher allerdings die angestrebte Reinheit des Outputmaterials aus dem Prozess sein soll, desto eher ist eine vorherige Entladung und mechanische Behandlung zu empfehlen. In Pyrolyse-Prozessen ist ebenfalls aufgrund von Sicherheitsrisiken und Prozessstabilität eine vorherige Entladung und Zerkleinerung der Batteriepacks zu empfehlen. Sicher ist, dass bei einer fehlenden mechanischen Vorbehandlung die Schlackemenge im Prozess tendenziell höher ist und damit eine Schlackeaufbereitung notwendig wird. Durch die Anwendung von Loop 3 können auch heterogene oder verunreinigte Materialströme verwertet und dem Stoffkreislauf als Sekundärrohstoff zugeführt werden. Sekundärrohstoffe aus Loop 3 werden auf dem Sekundärrohstoffmarkt angeboten und können für verschiedene Anwendungen außerhalb des Batteriebereichs eingesetzt werden. Die Qualität des Sekundärrohstoffs ist tendenziell etwas niedriger als Sekundärrohstoffe aus Loop 2. Loop 3 ist in Abbildung in Rot abgebildet.

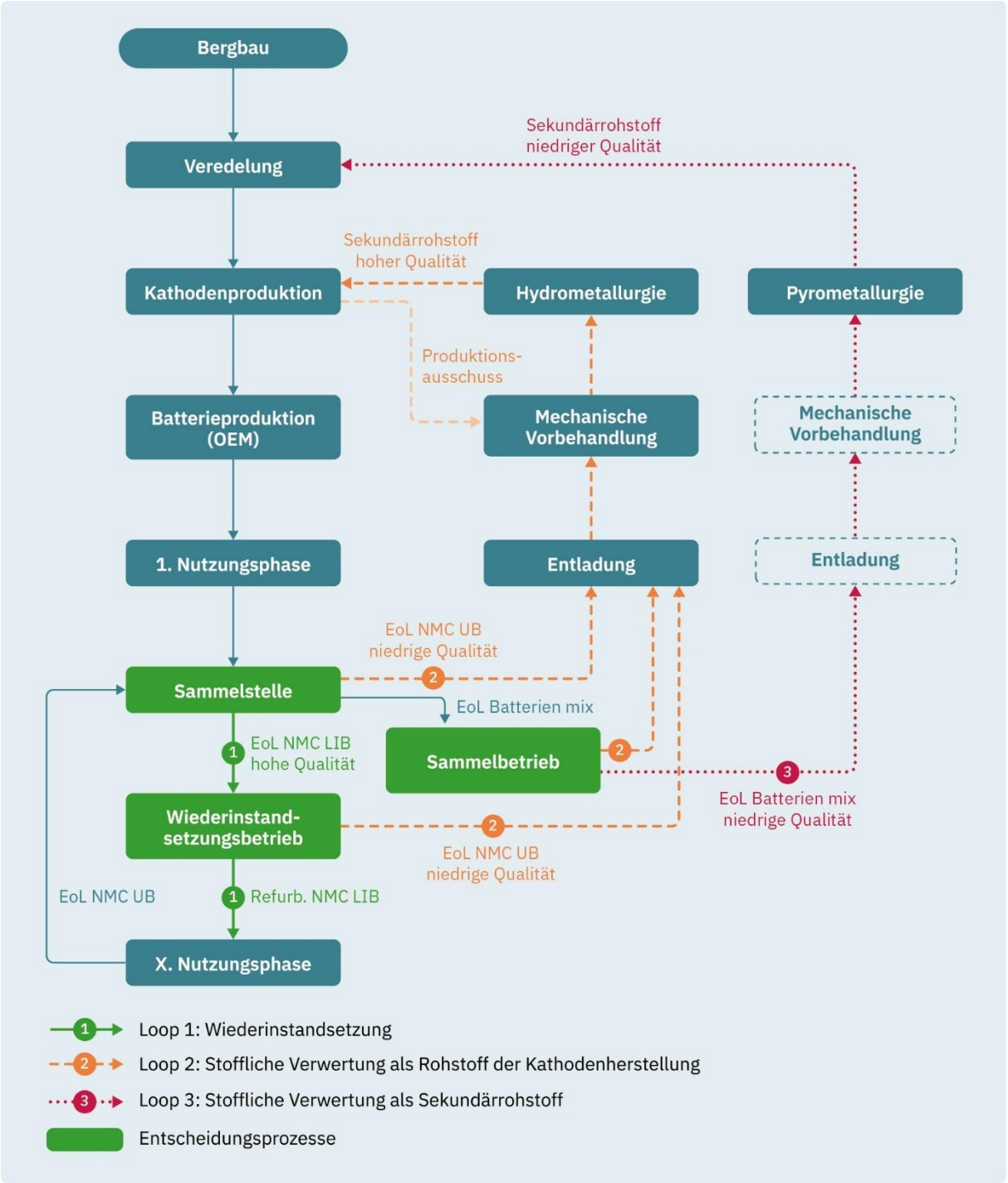


Abbildung 3.17: Übersicht des Lebenszyklus, der Entsorgungsketten (Loop 1 in Gelb, Loop 2 in Orange und Loop 3 in Rot) sowie relevanter Entscheidungsprozesse (in Grün).

Entscheidungsprozess „Sammelstelle“

Eine erste Möglichkeit eine Entscheidung über die EoL-Strategie zu treffen, besteht nach der Sammlung der Batterie (siehe Abbildung). Hier geben Endverbraucher ihre defekte oder nicht mehr benötigte Batterien an der Sammelstelle ab. Zur Unterscheidung, für welches Loop eine Batterie geeignet ist, spielt es keine Rolle, ob sie aus einer B2C- oder einer B2B-Anwendung stammt. Jedoch lassen sich gewisse Unterschiede zur Heterogenität, dem zu erwartenden SOH sowie der Datenverfügbarkeit herausarbeiten, die bei der Abgabe von Batterien aus B2C- oder B2B-Anwendungen zu erwarten sind (siehe Tabelle 3.25).

Tabelle 3.25: Zu erwartende Unterschiede bei abgegebenen EoL-Batterien.

Bewertungskriterium	EoL-Batterie aus B2C Anwendung	EoL-Batterie aus B2B Anwendung
Heterogenität der abgegebenen Batterien	Sehr hohe Heterogenität der abgegebenen Batterien mit unterschiedlichen Größen, Chemien, Alterstufen; dementsprechend hoher sortieraufwand	Klar definierte, homogene Flottenware mit einheitlichen Batterietypen und Powertool-Plattformen.
Erwartbarer SOH	Durchschnittlich eher niedriger SOH zu erwarten, teilweise tiefenentladen und beschädigt	Durchschnittlich eher höherer SOH zu erwarten, weniger Tiefenentladungen, höhere zyklische Alterung
Datenverfügbarkeit bzw. Dokumentationsunterlagen	Keine oder unvollständige Herkunftsinformationen	Eher vollständige Begleitpapiere, Stücklisten oder Mengen-/Typenangaben

Die Sammelstelle kann nach Abgabe in einem Thekenmodell anhand äußerer Merkmale der Batterie entscheiden, ob sie für eine direkte Wiederverwendung bzw. eine Wiederinstandsetzung durch einen Dienstleiser geeignet ist oder einem der beiden Recycling-Loops zugeführt werden sollte. Neben der Steigerung der Reinheit der nachfolgenden Stoffströme sorgt die Sortierung auch dafür, dass Transportkosten reduziert werden können.
Abbildung 3.18 zeigt den Entscheidungsbaum, der für die Sammelstelle erarbeitet wurde. Die Entscheidungsknoten und die Entscheidungszweige sind in der folgenden Tabelle 3.26 tiefergreifend erläutert.

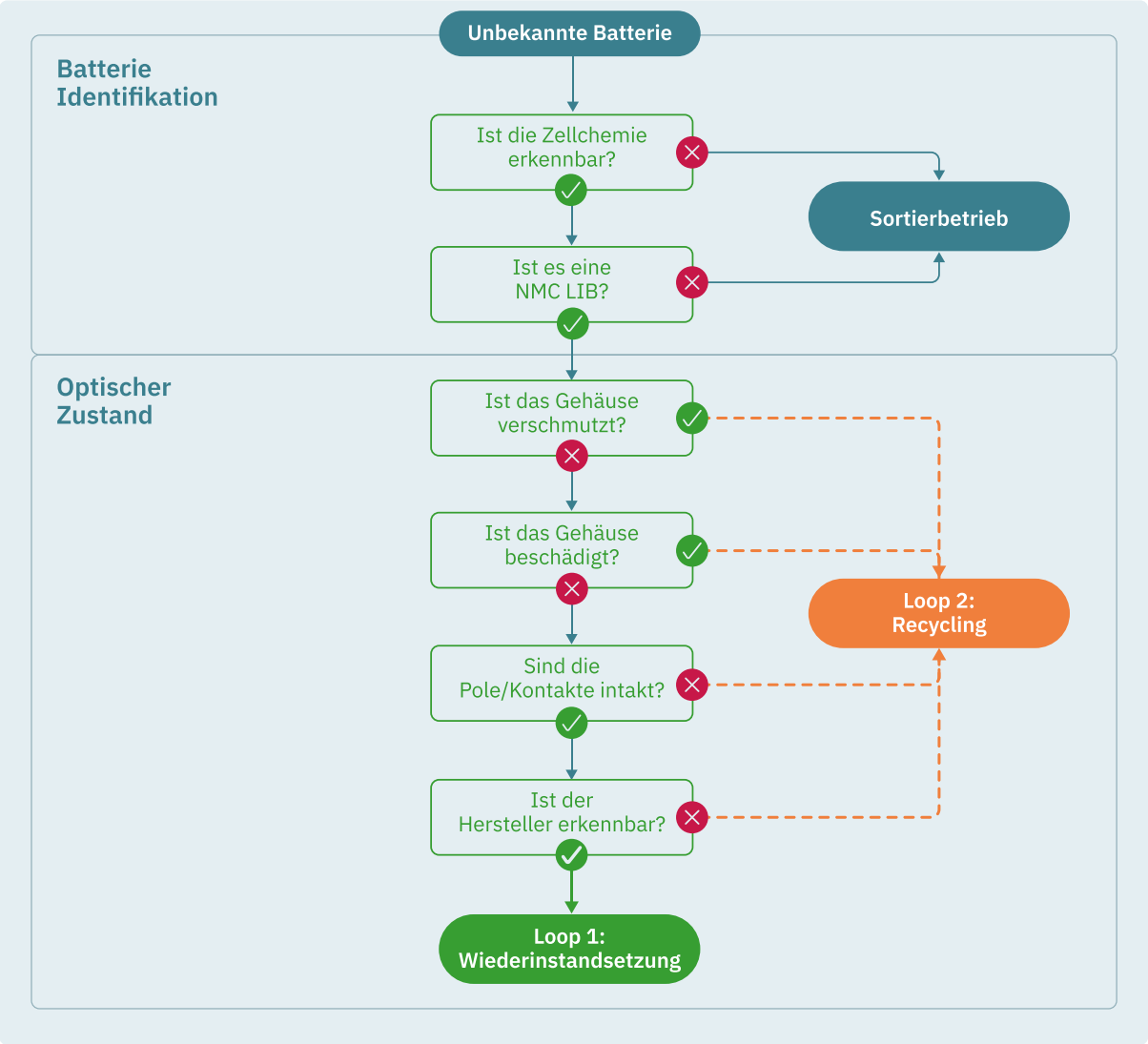


Abbildung 3.18: Entscheidungsbaum für Sammelstellen. Zur Identifizierung und Separierung von NMC-LIB von Endverbrauchern aus B2C oder B2B-Anwendung.

Maßgeblich entscheidend für die Einordnung ist der äußere Zustand der Batterie sowie die Informationen, die auf der Außenhülle der Batterie angebracht sind. Nach Durchlaufen des Entscheidungsbaums entstehen drei verschiedene Fraktionen an der Sammelstelle:

- *Mischfraktion – „Sortierbetrieb“:* Die Mischfraktion besteht aus unidentifizierbaren Batterien und Batterien, die keine NMC-LIB sind. Diese gehen im Anschluss zu einem Sortierbetrieb, wo sie weiter aufgetrennt werden.
- *Reinfraktion NMC – „Loop 2-Recycling“:* Die identifizierbaren NMC-LIB gehen in Loop 2, wo sie aufgrund ihrer Sortenreinheit einem hydrometallurgischen Recycling zugeführt werden.
- *Reinfraktion NMC – „Loop 1-Wiederinstandsetzung“:* Die identifizierbaren NMC-LIB, die eine hohe Qualitätskriterien erfüllen, gehen in Loop 1 und werden bei einem Wiederinstandsetzungsbetrieb weiteren Tests unterzogen.

Tabelle 3.26: Entscheidungskriterien des Entscheidungsbaums für die Sammelstelle und ergänzende Erläuterungen.

Entscheidungsknoten	Erläuterung des Entscheidungsknotens
Ist die Zellchemie erkennbar?	Eine zeiteffiziente Identifikation von NMC-LIB ist nur dann möglich, wenn die Zellchemie ohne Einsatz von Sensortechnik eindeutig festgestellt werden kann, beispielsweise durch ein Label oder eine Markierung am Batteriegehäuse.
Ist es eine NMC-LIB?	Da die Wiederinstandsetzung ausschließlich NMC-LIB aus Elektrowerkzeugen betrifft, ist es besonders wichtig, diesen Batterietyp eindeutig zu bestimmen.
Ist das Gehäuse verschmutzt?	Eine erhebliche Verschmutzung, beispielsweise durch Feinstaub infolge von Schleifprozessen, stellt ein Ausschlusskriterium dar. Ist ein Gehäuse stark verunreinigt, ist der erforderliche Aufwand für eine gründliche Reinigung oder einen Austausch in der Regel zu hoch, um den neuwertigen Zustand wirtschaftlich wiederherzustellen.
Ist das Gehäuse beschädigt?	Bei erheblicher Beschädigung des Gehäuses ist es wahrscheinlich, dass auch die Batterie selbst Schaden genommen hat. Ein Austausch des Gehäuses wäre aktuell wirtschaftlich nicht sinnvoll, sodass diese Batterie nicht mehr aufgearbeitet werden kann.
Sind die Pole bzw. Kontakte intakt?	Ein deutlich erkannter Schaden an den Polen weist auf eine Beschädigung oder einen erhöhten Verschleiß der Batterie hin. Da ein Austausch der Pole derzeit als unwirtschaftlich einzustufen ist, kann eine solche Batterie nicht wieder instandgesetzt werden.
Ist der Hersteller erkennbar?	Da sich das Projekt auf die Aufarbeitung von NMC-LIB von Robert Bosch Powertools GmbH konzentriert, ist es äußerst wichtig, dass neben der Batteriechemie auch der Hersteller der Batterie eindeutig bestimmt werden kann.

3.4.2 Entscheidungsprozess „Sortierbetrieb“

Wenn eine LIB aufgrund fehlender Markierung oder Labelung nicht mit dem bloßen Auge identifizierbar ist, wird sie zu einem Sortierbetrieb transportiert. Hier durchläuft sie den in Abbildung 3.19 dargestellten Entscheidungsprozess. Da die Batterie an der Sammelstelle rein visuell nicht identifizierbar war, wird im Sortierbetrieb eine sensorgestützte Technologie zur Identifikation eingesetzt. Auszüge aus den Technologien, die in der Sortierung angewendet werden, sind im Kapitel „Technik und Wissenschaft“ dargestellt.

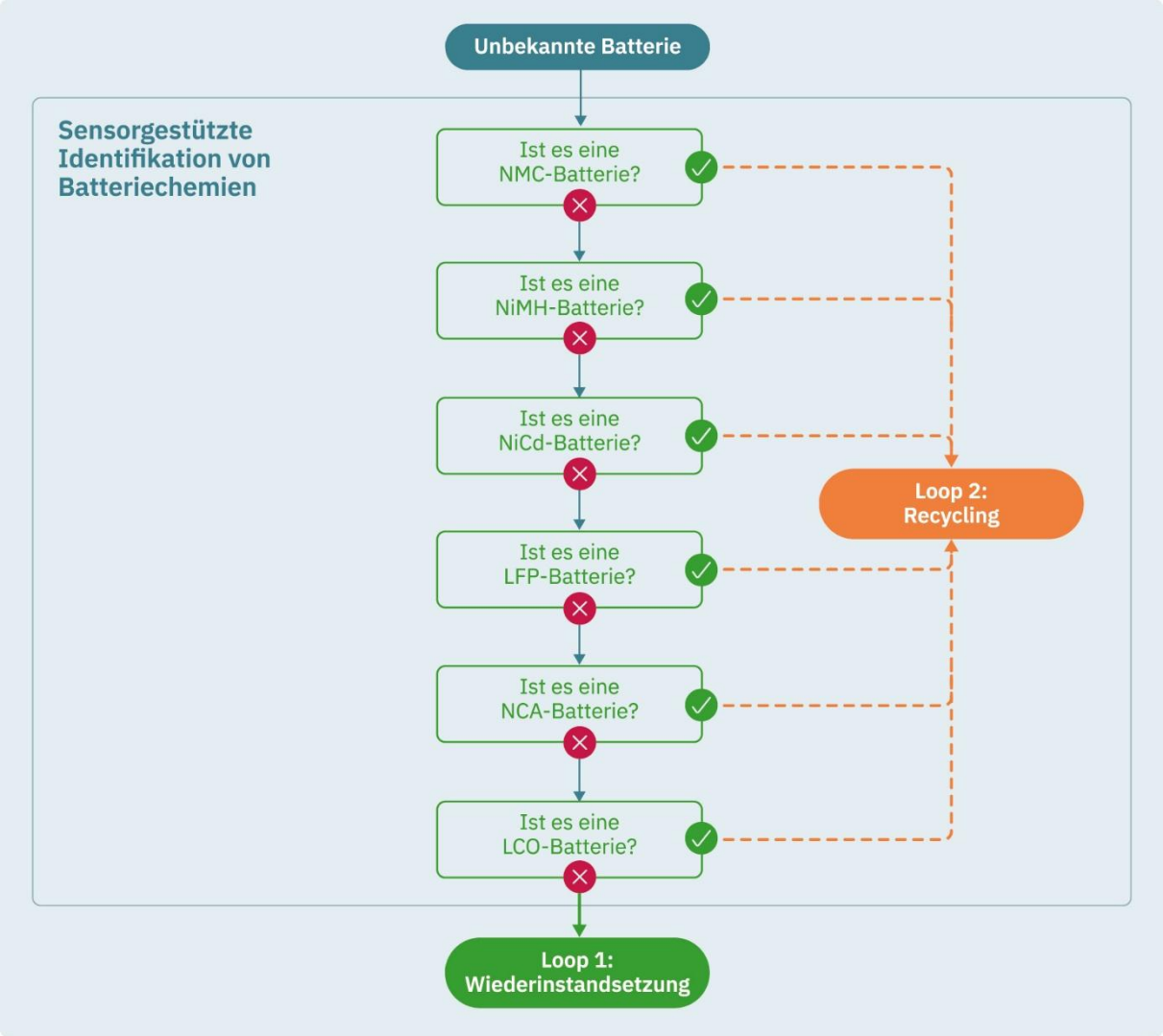


Abbildung 3.19: Entscheidungsbaum für Sortierbetriebe. Zur Identifizierung und Separierung von NMC-LIB von Sammelstellen.

Abbildung 3.19 zeigt einen Entscheidungsbaum, der mit Hilfe von sensorgestützter Technologie durchlaufen werden kann. Jeder Entscheidungsknoten steht für ein Aggregat, welches die jeweilige Batteriechemie eindeutig identifizieren kann. Die Sortierung kann nacheinander in einem Prozess erfolgen oder auf ein und derselben Linie im Batchbetrieb, wenn das betreffende Sortieraggregat auf die Sortierung von unterschiedlichen Batterietypen eingestellt werden kann. Als Ergebnis entstehen im Sortierbetrieb hochreine Batteriefraktionen, die, wenn vorhanden, einem Loop 2 „Stoffliche Verwertung als Rohstoff der Kathodenherstellung“ zugeführt werden können. Alle Batterien, die im Sortierbetrieb nicht identifiziert werden können, werden am Ende der Sortierkette dem Loop 3 „Stoffliche Verwertung als Sekundärrohstoff“ zugeführt.

Aufbauend auf diesen hochspezialisierten Sortierprozessen ist es essenziell, dass die einzelnen Entscheidungsknoten optimal aufeinander abgestimmt sind, um sowohl eine präzise Identifikation als auch eine effiziente Separierung der unterschiedlichen Batterietypen sicherzustellen. Die Integration neuer sensorgestützter Technologien eröffnet dabei zusätzliche Möglichkeiten, Batterieströme noch gezielter den entsprechenden Verwertungswegen zuzuführen und Verluste wertvoller Rohstoffe zu minimieren. Im weiteren Verlauf wird in Tabelle 3.27 detailliert erläutert, welche Entscheidungskriterien an den jeweiligen Knoten Anwendung finden und wie diese den weiteren Weg der Batterie im Sortierprozess bestimmen.

Tabelle 3.27: Entscheidungskriterien des Entscheidungsbaums für den Sortierbetrieb und Erläuterungen zu den Entscheidungswegen.

Entscheidungsknoten	Erläuterung des Entscheidungsknotens
Ist es eine NMC-Batterie?	Die eindeutige Identifizierung von NMC-LIB im Rahmen des Sortierprozesses ermöglicht die Gewinnung einer hochreinen Fraktion. Diese kann zur Herstellung von Sekundärmaterial verwendet werden, welches Primärmaterial bei der Produktion von Kathoden ersetzt.
Ist es eine NiMH-Batterie?	Die eindeutige Identifikation von NiMH-Batterien während des Sortierprozesses führt zur Gewinnung einer hochreinen Fraktion. Diese kann zur Produktion von Sekundärmaterial eingesetzt werden kann, welches Primärmaterial in der Kathodenproduktion ersetzt.
Ist es eine NiCd Batterie	Die eindeutige Identifikation von NiCd-Batterien im Sortierprozess ermöglicht die Gewinnung einer hochreinen Fraktion, die als Sekundärmaterial zur Substitution von Primärmaterial in der Kathodenproduktion verwendet werden kann. Aufgrund des hohen Cadmiumgehalts und dessen umweltschädlichen Potenzials ist es essenziell, diese Batterien zuverlässig zu erkennen und so eine Kontamination anderer Batteriestoffströme zu verhindern.
Ist es eine LFP-Batterie?	Eine eindeutige Identifikation von LFP-LIB während des Sortierprozesses führt zur Gewinnung einer hochreinen Fraktion. Diese kann zur Produktion von Sekundärmaterial eingesetzt werden kann, welches Primärmaterial in der Kathodenproduktion ersetzt. Aufgrund des verwendeten Eisens in dieser Zellchemie ist es wichtig diese aus dem NMC Strom rauszuhalten um den späteren Hydrometallurgischen Prozess nicht zu stören.
Ist es eine NCA-Batterie?	Eine eindeutige Identifikation von NCA-Batterien während des Sortierprozesses führt zur Gewinnung einer hochreinen Fraktion, die zur Produktion von Sekundärmaterial eingesetzt werden kann, welches Primärmaterial in der Kathodenproduktion ersetzt.
Ist es eine LCO-Batterie?	Eine eindeutige Identifikation von LCO-Batterien während des Sortierprozesses führt zur Gewinnung einer hochreinen Fraktion, die zur Produktion von Sekundärmaterial eingesetzt werden kann, welches Primärmaterial in der Kathodenproduktion ersetzt. Alle Batterien, die im letzten Identifikationsschritt nicht identifizierbar sind, gehen als Mischfraktion in die pyrometallurgische Verwertung.

3.4.3 Entscheidungsprozess „Wiederinstandsetzung“

Betriebe zur Wiederinstandsetzung von Batterien können ein zukunftsträchtiges Geschäftsmodell darstellen, sofern sich Marktakteure – darunter Hersteller, Organisationen für Herstellerverantwortung (OfH) sowie die Wiederinstandsetzungsbetriebe selbst – auf Regelungen einigen, wie die Wiederinstandsetzung von LIB markenschutzrechtlich korrekt umgesetzt werden kann. Ebenso sollten die entsprechenden Prozesse haftungsschutzrechtlich sauber sein und regelkonform in Sinne der BattVO bzw. des BattDG (CE-Kennzeichnung; Batteriepass; EPR-Pflichten etc.).

Aus fachlicher Sicht besteht die Möglichkeit, dass OEMs ihre Batterien selbst einem „Second-Life“ zuführen oder spezialisierte Servicedienstleister mit der Wiederinstandsetzung oder Wiederaufarbeitung damit beauftragen. Die OEMs könnten die instand gesetzten Batterien anschließend über ihre eigenen Vertriebswege als „Re-Batterien“ unter der eigenen Marke erneut auf den Markt bringen. Sie würden demnach die Markenkontrolle behalten, eine einheitliche Qualität sicherstellen sowie einen Durchgriff auf BMS-Daten sowie die Garantiepolitik behalten.

Da OfH bestrebt sind, die Abfallhierarchie und Vorgaben innerhalb der EU-BattVO hinsichtlich Quoten für „Second-Life“ oder stofflicher Verwertung einzuhalten – der zufolge die Vorbereitung zur Wiederverwendung der stofflichen Verwertung vorzuziehen ist –, entspricht die Wiederinstandsetzung von Batterien, die aufgrund des Entledigungswillens der Endnutzer als Abfall gelten, genau diesem Ansatz. Zudem würde eine solche Wiederinstandsetzung die zu entrichtenden Gebühren der OEMs reduzieren, da weniger Batterien einer stofflichen Verwertung zugeführt werden müssten.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass OEMs akzeptieren, wenn instand gesetzte Batterien unter der Marke des wiederinstandsetzenden Betriebes in den Markt zurückgeführt werden. Diese Aktivitäten würden im Sinne der Kreislaufwirtschaft, der Abfallhierarchie und rechtlicher Vorgaben der EU-BattVO erfolgen, und die OEMs würden indirekt profitieren – beispielsweise durch geringere Gebühren für die von ihnen in Verkehr gebrachten Batterien. Da die „Second-Life“-LIB unter der Marke des Wiederinstandsetzers in Umlauf gebracht würden, wären OEMs zudem von der Produkthaftung befreit. Eventuelle Defekte könnten nicht ihrer Marke zugeschrieben werden. Ob ein solches Vorgehen markenschutzrechtlich zulässig ist, müsste geprüft werden. Ebenfalls wäre ein Co-branding möglich, bei dem die Batterie das Label des OEMs behält, allerdings eine klare Kennzeichnung „refurbished“ erhält.

Herausfordernd bleibt in diesem Zusammenhang die sogenannte Selbstkannibalisierung der Nachfrage: Re-Batterien, die unter einer Fremdmarke auf den Markt gelangen, könnten die Nachfrage nach neuen Batterien der OEMs reduzieren. Denkbar wäre, dass Wiederinstandsetzungsbetriebe eine „Lizenzgebühr“ an OEMs entrichten, um potenzielle Absatzrückgänge bei Neuware zu kompensieren. Es ist aber davon auszugehen, dass der Anteil von Re-Batterien im Vergleich zu neuer Ware lediglich einen sehr geringen Prozentsatz des Gesamtmarktes ausmachen dürfte. Zu beachten ist zudem, dass ein „Second-Life“-Ansatz für Produkte eher dazu führt, dass neue, preissensiblere Nutzergruppen erschlossen werden, als das der Absatz an Neuware merklich zurückgeht (Cooper & Gutowski, 2017).

Im Folgenden ist ein Entscheidungsbaum für Betriebe zur Wiederinstandsetzung dargestellt. Wenn die Batterie durch die Sammelstelle als wiederinstandsetzbar kategorisiert und der passende Hersteller identifiziert wurde, wird zunächst der SoC überprüft, bevor eine Ermittlung des SOH durchgeführt wird.

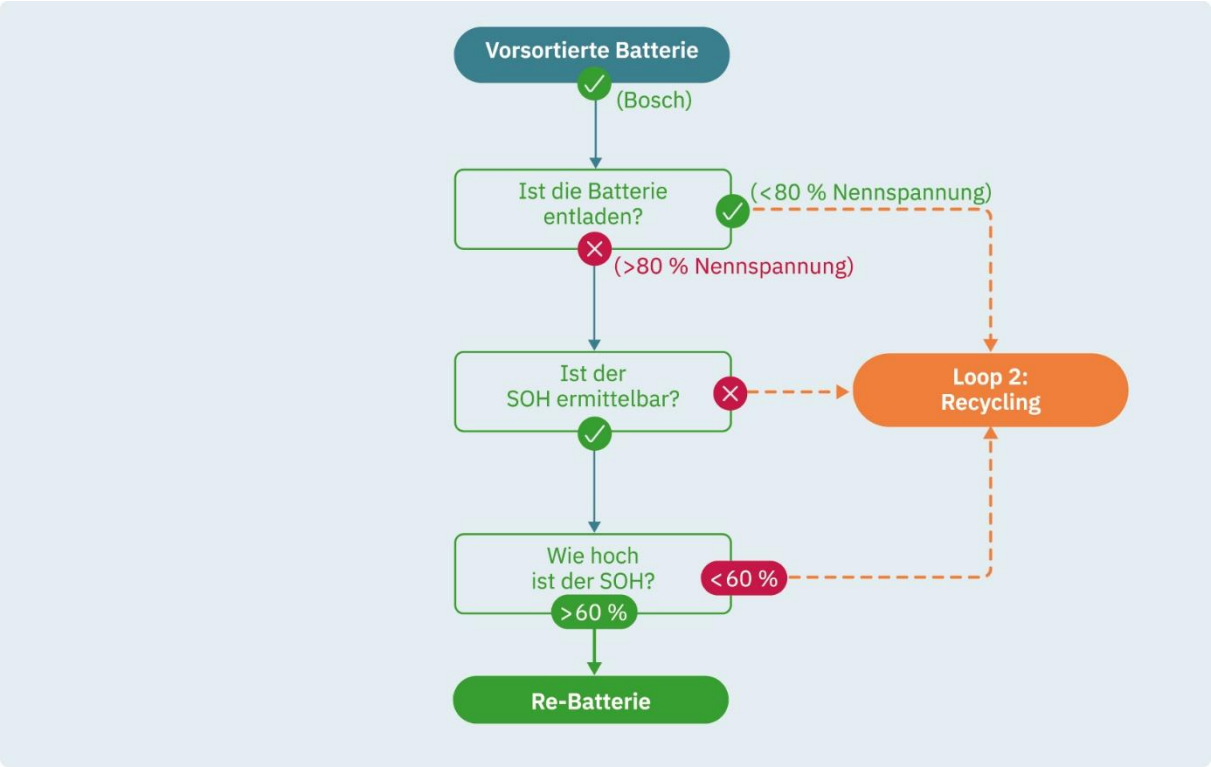


Abbildung 3.20: Entscheidungsbaum für Betriebe zur Wiederinstandsetzung. Zur Identifizierung von NMC-LIB aus Sammelbetrieben, die zur Wiederverwendung geeignet sind.

Ein erweiterter Entscheidungsbaum für Betriebe zur Wiederinstandsetzung von Batterien, die keine vorsortierten Batterien angeliefert bekommen, sondern eine Mischfraktion, befindet sich im Anhang in Abbildung A 5. Hier muss der Wiederinstandsetzungsbetrieb Schritte der optischen Analyse der Batterie selbst durchführen, was in einem alternativen Szenario von der Sammelstelle durchgeführt wird.

Die folgende Tabelle 3.28 stellt die gewählten Entscheidungsknoten in Betrieben zur Wiederinstandsetzung detailliert vor. Sie wurden während der Demontagetests entwickelt, die in Kapitel 3.3 vorgestellt wurden.

Tabelle 3.28: Entscheidungskriterien des Entscheidungsbaums für den Wiederinstandsetzungsbetrieb und Erläuterungen zu den Entscheidungswegen.

Entscheidungsknoten	Erläuterung des Entscheidungsknotens
Ist die Batterie entladen? (<80 % Nennkapazität)	Eine LIB gilt dann als tiefentladen, wenn die Zellkapazität deutlich unter die vom Hersteller spezifizierte Entladeschlussspannung fällt. Sinkt die Zellspannung dauerhaft unter ca. 80 % der Nennkapazität, ist in der Regel von irreversiblen Schäden auszugehen, wodurch eine wirtschaftliche Wiederinstandsetzung nicht mehr möglich ist.
Ist der SOH ermittelbar?	Nur wenn der SOH über eine Zyklisierung ermittelbar ist, kann eine Batterie uneingeschränkt wiederinstandgesetzt werden. Grundlage zur Ermittlung des SOH ist, dass die SOLL-Kapazität aus Herstellerangaben bekannt ist, die Spannung des Batteriepacks in einem vorgegebenen Spannungsbereich liegt (14,5-21 V) und die Kontakte des zu testenden Batteriepacks intakt sind (ohne Korrosion, ohne mechanische Beschädigung).
Wie hoch ist der SOH?	Nur, wenn der SOH im SOLL-Bereich von 80 % liegt, kann eine Batterie uneingeschränkt wiederinstandgesetzt werden. Werte unter 80 % führen zu Einschränkungen in der Nutzbarkeit.

4 Handlungsempfehlung

Kernbotschaft und Praxisbezug

Die Anwendung akteursspezifischer Entscheidungsbäume entlang der realen Entsorgungskette wird als zentrales Instrument zur Umsetzung des Entscheidungshilfesystems empfohlen. Die Projektergebnisse zeigen, dass Entscheidungsbäume Entscheidungen dort, wo sie faktisch getroffen werden, ermöglichen.
Sie fördern eine klare Zuordnung von EoL-Powertoolbatterien zu geeigneten EoL-Strategien und stellen damit eine niedrigschwellige Anwendung ohne komplexe Datenmodelle dar. Dies führt zu einer hohen Praxistauglichkeit für KMU.

Die nachfolgende Handlungsempfehlung richtet sich an KMU sowie weitere Akteure entlang des Powertoolbatterie-Lebenszyklus – insbesondere Sammelstellen, Sortierbetriebe, Wiederinstandsetzungsbetriebe, Recyclingunternehmen, OEMs und OfH.

Ziel ist es, aufzuzeigen,

- welche konkreten Vorteile sich aus der Anwendung des entwickelten Entscheidungshilfesys-tems ergeben,
- wie das System praktisch umgesetzt werden kann,
- wie es auf andere Zellchemien und Batteriearten übertragbar ist und
- welche Weiterentwicklungs- und Optimierungspotenziale sich für die zukünftige EoL Verwertung von LIB ergeben.

Diese Ziele werden in den folgenden Abschnitten der Handlungsempfehlung erläutert.

Konkrete Vorteile für KMU

Die Anwendung des im Projekt entwickelten Entscheidungshilfesystems bietet insbesondere für KMU entlang der Batteriewertschöpfungskette erhebliche Vorteile. Zentrales Merkmal des Systems ist seine hohe Praxistauglichkeit, da es auf akteursspezifischen Entscheidungsbäumen basiert, die reale Entscheidungsprozesse entlang der Entsorgungskette abbilden. Im Vergleich zu komplexen, zentralen Bewertungsinstrumenten ermöglicht dieser Ansatz eine strukturierte Entscheidungsfindung ohne den Einsatz aufwendiger Datenmodelle oder die Notwendigkeit einer umfassenden Gewichtung ökologischer, technischer und ökonomischer Kriterien.

Für KMU ergibt sich daraus insbesondere eine deutliche Reduzierung der Komplexität bei der Bewertung von EoL-Strategien. Entscheidungen können auf Basis klar definierter Kriterien wie Identifizierbarkeit der Zellchemie, äußerem Zustand, Ladezustand oder sicherheitsrelevanten Merkmalen getroffen werden. Dies senkt den Schulungs- und Implementierungsaufwand erheblich und erlaubt es auch Unternehmen mit begrenzten personellen und technischen Ressourcen, das Entscheidungshilfesystem zuverlässig anzuwenden. Gleichzeitig erhöht die klare Struktur der Entscheidungsbäume die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der getroffenen Entscheidungen, was insbesondere im Hinblick auf rechtliche Anforderungen und Dokumentationspflichten von Bedeutung ist.

Darüber hinaus profitieren KMU von einer erhöhten Investitions- und Planungssicherheit. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass insbesondere Loop 1 (Wiederverwendung bzw. Wiederinstandsetzung) nur für einen begrenzten Anteil der anfallenden Powertoolbatterien wirtschaftlich sinnvoll ist. Durch die frühzeitige und systematische Zuordnung von Batterien zu geeigneten

EoL-Strategien können unwirtschaftliche Prüf- und Aufarbeitungsprozesse vermieden werden. Dies ermöglicht es KMU, ihre Geschäftsmodelle realistisch auszurichten und Investitionen gezielt auf diejenigen Prozessschritte zu konzentrieren, die unter den gegebenen Rahmenbedingungen tatsächlich tragfähig sind.

Auch für spezifische Beteiligte der Batteriewertschöpfungskette ergeben sich klare Vorteile aus der Anwendung des Entscheidungshilfesystems:

- Sammelstellen können durch eine einfache visuelle Vorsortierung die Qualität der nachgelagerten Stoffströme erhöhen und gleichzeitig Sicherheits- und Brandrisiken reduzieren.
- Sortierbetriebe profitieren von einer verbesserten Trennung nach Zellchemien und einer höheren Stoffstromreinheit, was die Stabilität und Effizienz nachgelagerter Recyclingprozesse erhöht.
- Recyclingunternehmen wiederum erhalten klar definierte Inputqualitäten für die jeweiligen Verwertungsloops, was insbesondere für hydrometallurgische Prozesse von zentraler Bedeutung ist.
- Für OEMs und Organisationen für Herstellerverantwortung bietet das Entscheidungshilfesystem die Möglichkeit, ihre Pflichten im Rahmen der erweiterten Herstellerverantwortung zielgerichtet und effizient zu erfüllen, ohne selbst operativ in alle Stufen der Entsorgungskette eingreifen zu müssen.

Die systematische Zuordnung von Batterien zu geeigneten Verwertungswegen unterstützt eine regelkonforme Umsetzung der Abfallhierarchie und trägt dazu bei, hochwertige Recyclingpfade zu stärken, während gleichzeitig unwirtschaftliche oder risikobehaftete „Second-Life“-Ansätze vermieden werden.

Insgesamt trägt das Entscheidungshilfesystem dazu bei, Entscheidungsprozesse entlang der Entsorgungskette zu strukturieren, Schnittstellen zwischen den beteiligten Akteuren zu klären und die Wirtschaftlichkeit sowie Sicherheit der End-of-Life-Verwertung von Lithium-Ionen-Batterien aus Powertools zu verbessern. Insbesondere für KMU stellt es damit ein praxisnahes Instrument dar, um sich unter den bestehenden rechtlichen und marktlichen Rahmenbedingungen aktiv und fundiert in die Batteriekreislaufwirtschaft einzubringen.

Praktische Umsetzung des Systems

Die praktische Umsetzung des entwickelten Entscheidungshilfesystems erfolgt entlang der realen Entsorgungskette von EoL-LIB aus Powertools und setzt an denjenigen Akteuren an, bei denen relevante Weichenstellungen tatsächlich getroffen werden. Zentrales Element ist dabei die Anwendung akteursspezifischer Entscheidungsbäume, die eine strukturierte, schrittweise Zuordnung von Batterien zu geeigneten EoL-Strategien ermöglichen.

Bereits an der Sammelstelle kann das Entscheidungshilfesystem eingesetzt werden, um eine erste qualitative Einordnung der abgegebenen Batterien vorzunehmen. Auf Basis einfach erfassbarer äußerer Merkmale – wie der Erkennbarkeit der Zellchemie, des allgemeinen Gehäusezustands oder des Zustands der Kontakte – lassen sich Batterien frühzeitig unterschiedlichen Stoffströmen zuordnen. Hochwertige, eindeutig identifizierbare NMC-LIB mit unbeschädigtem Gehäuse können gezielt einer weiteren Prüfung zur Wiederinstandsetzung oder einem hochwertigen Recyclingpfad (Loop 2) zugeführt werden. Nicht identifizierbare, stark beschädigte oder sicherheitskritische Batterien werden hingegen konsequent ausselektiert und an Sortierbetriebe oder direkt an robuste Recyclingprozesse weitergeleitet (Loop 3). Durch diese frühe Entscheidung wird die Qualität nachgelagerter Stoffströme erhöht, während gleichzeitig Sicherheitsrisiken und unnötige Transportaufwände reduziert werden.

Im Sortierbetrieb ermöglicht das Entscheidungshilfesystem eine weitergehende Differenzierung der Batterien unter Einsatz technischer Identifikations- und Sortierverfahren. Hier werden die Entscheidungsbäume genutzt, um Batterien anhand ihrer Zellchemie und ihres Zustands systematisch in Rein- und Mischfraktionen aufzuteilen. Reinfraktionen mit eindeutig identifizierter Zellchemie können

gezielt hochwertigen stofflichen Verwertungswegen zugeführt werden, bei denen eine hohe Materialreinheit erforderlich ist (Loop 2). Batterien oder Batteriefraktionen, die nicht eindeutig identifiziert werden können oder eine zu hohe Heterogenität aufweisen, werden einem robusteren Verwertungsweg zugeordnet (Loop 3). Die Anwendung des Entscheidungshilfesystems trägt damit dazu bei, die Prozessstabilität in nachgelagerten Recyclingverfahren zu erhöhen und die Effizienz der Rohstoffrückgewinnung zu verbessern.

Auch in Betrieben zur Wiederinstandsetzung kann das Entscheidungshilfesystem als strukturierende Entscheidungsgrundlage eingesetzt werden. Die im Projekt entwickelten Entscheidungsbäume führen schrittweise durch die Bewertung des Ladezustands, des Gesundheitszustands sowie des äußeren und inneren Zustands der Batterien. Auf diese Weise lässt sich frühzeitig feststellen, ob eine Batterie grundsätzlich für eine Wiederverwendung oder Wiederinstandsetzung geeignet ist oder ob sie einem Recyclingpfad zugeführt werden sollte.
Die Projektergebnisse zeigen, dass nur ein begrenzter Anteil der anfallenden Powertool-Batterien die technischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen für eine Wiederinstandsetzung erfüllt. Durch die systematische Anwendung des Entscheidungshilfesystems können Betriebe unwirtschaftliche Prüf- und Aufarbeitungsprozesse vermeiden und ihre Ressourcen gezielt auf geeignete Batterien konzentrieren.

Insgesamt zeigt die Anwendung des Entscheidungshilfesystems entlang der verschiedenen Stufen der Entsorgungskette, dass durch eine frühzeitige, strukturierte und akteursspezifische Entscheidungsfindung sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile erzielt werden können. Die Entscheidungsbäume ermöglichen eine klare Schnittstellenklärung zwischen den beteiligten Akteuren, reduzieren Fehlallokationen von Batterien zu ungeeigneten EoL-Strategien und schaffen die Grundlage für stabile, planbare und rechtssichere Verwertungsprozesse. Damit wird das Entscheidungshilfesystem zu einem zentralen Instrument für die praktische Umsetzung einer effizienten und zukunftsfähigen EoL-Verwertung von NMC-LIB aus Powertools.

Übertragbarkeit auf andere Zellchemien

Das im Rahmen des Projektes entwickelte Entscheidungshilfesystem ist bewusst so konzipiert, dass es nicht ausschließlich auf LIB aus Powertools mit NMC-Chemie beschränkt ist, sondern grundsätzlich auf andere Zellchemien und Batteriearten übertragen werden kann. Die Entscheidungslogik basiert nicht auf spezifischen materialtechnischen Kennwerten einzelner Zelltypen, sondern auf übergeordneten, entlang der Entsorgungskette relevanten Kriterien wie Identifizierbarkeit, äußerem und innerem Zustand, Sicherheitsrisiken, notwendiger Inputqualität für nachgelagerte Prozesse sowie der wirtschaftlichen und rechtlichen Umsetzbarkeit einzelner EoL-Strategien.

Diese Herangehensweise ermöglicht es, die entwickelten Entscheidungsbäume mit geringem Anpassungsaufwand auf weitere Lithium-Ionen-Zellchemien zu übertragen. Für Batterien auf Basis von LFP oder NCA bleiben die grundlegenden Entscheidungsschritte entlang der Sammelstelle, des Sortierbetriebs und der Wiederinstandsetzung identisch. Lediglich einzelne Entscheidungsknoten – beispielsweise zur Bewertung der wirtschaftlichen Attraktivität bestimmter Recyclingpfade oder zur Einschätzung sicherheitsrelevanter Eigenschaften – müssen an die jeweilige Chemie angepasst werden. Die Struktur des Entscheidungshilfesystems bleibt dabei unverändert erhalten.

Darüber hinaus ist das System auch auf andere Batteriearten übertragbar, etwa auf Industriebatterien oder Traktionsbatterien aus der Elektromobilität. In diesen Anwendungsfällen verschieben sich die Entscheidungspunkte teilweise von der Zellebene auf die Modul- oder Batteriepack-Ebene, während die grundlegende Logik weiterhin anwendbar bleibt. Ergänzend können zusätzliche Entscheidungsknoten integriert werden, beispielsweise zur Berücksichtigung vorhandener Zustandsdaten aus Batteriemanagementsystemen, spezifischer Sicherheitsanforderungen oder erweiterter

Dokumentations- und Nachweispflichten. Das Entscheidungshilfesystem bietet hierfür ausreichend Flexibilität, da neue Kriterien schrittweise ergänzt werden können, ohne die Gesamtstruktur zu verändern.

Ein wesentlicher Vorteil des gewählten Ansatzes liegt darin, dass die Entscheidungsbäume unabhängig von der jeweiligen Marktdynamik einzelner Zellchemien funktionieren. Veränderungen in der Materialzusammensetzung, etwa sinkende Kobaltanteile oder der zunehmende Einsatz kobaltfreier Batterien, beeinflussen zwar die wirtschaftliche Attraktivität einzelner Verwertungswege, erfordern jedoch keine grundlegende Neugestaltung des Entscheidungshilfesystems. Stattdessen können Anpassungen gezielt an denjenigen Stellen erfolgen, an denen sich veränderte Markt- oder Stoffstrombedingungen tatsächlich auswirken, beispielsweise bei der Auswahl zwischen hochwertigen Recyclingpfaden (Loop 2) und robusteren Verwertungsoptionen (Loop 3).

Insgesamt ermöglicht das entwickelte Entscheidungshilfesystem somit eine schrittweise Skalierung über den ursprünglich betrachteten Anwendungsfall hinaus. Es stellt eine belastbare Grundlage dar, um zukünftige Entwicklungen im Batteriemarkt, neue Zellchemien oder zusätzliche Batterieanwendungen systematisch in bestehende Entsorgungs- und Verwertungsstrukturen zu integrieren. Gerade für KMU bietet diese Übertragbarkeit einen entscheidenden Vorteil, da Investitionen in Schulung, Prozessverständnis und Organisationsstrukturen nicht bei jeder technologischen Weiterentwicklung grundlegend neu vorgenommen werden müssen, sondern auf einem stabilen, anpassungsfähigen Entscheidungssystem aufbauen können.

Weiterentwicklungs- und Optimierungspotentiale

Die Ergebnisse des Projekts zeigen, dass das entwickelte Entscheidungshilfesystem bereits unter den heutigen Rahmenbedingungen einen wesentlichen Beitrag zur Strukturierung und Verbesserung der EoL-Verwertung von LIB leisten kann. Gleichzeitig eröffnen sich auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse zahlreiche Ansatzpunkte für weiterführende Optimierungen und zukünftige Weiterentwicklungen, die sowohl die Effizienz der Entsorgungskette als auch die Wirtschaftlichkeit und Sicherheit der Verwertungsprozesse erhöhen können.

Ein zentrales Optimierungspotenzial liegt in der weiteren Standardisierung und Professionalisierung früher Entscheidungspunkte entlang der Entsorgungskette, insbesondere an Sammelstellen und in Sortierbetrieben. Die Projektergebnisse verdeutlichen, dass eine frühzeitige, qualitätsorientierte Vorsortierung maßgeblich zur Stabilisierung nachgelagerter Prozesse beiträgt. Durch gezielte Schulungs- und Qualifizierungsmaßnahmen für das Personal an Sammelstellen könnten Fehlwürfe reduziert, sicherheitskritische Batterien früher erkannt und hochwertige Stoffströme gezielt separiert werden. Ergänzend könnten einfache, standardisierte Leitfäden oder visuelle Entscheidungshilfen die Anwendung des Entscheidungshilfesystems weiter erleichtern.

Darüber hinaus bietet die schrittweise Digitalisierung des Entscheidungshilfesystems ein erhebliches Entwicklungspotenzial. Die im Projekt entwickelten Entscheidungsbäume eignen sich als Grundlage für digitale Anwendungen, etwa in Form einfacher Excel-Tools oder App-basierte Entscheidungshilfen. Eine solche Digitalisierung könnte die Dokumentation von Entscheidungen unterstützen, Schnittstellen zwischen den beteiligten Akteuren verbessern und langfristig eine bessere Datengrundlage für die Optimierung von Stoffströmen schaffen. Dabei ist insbesondere für KMU wichtig, dass digitale Lösungen modular aufgebaut und niedrigschwellig gestaltet sind, um hohe Implementierungs- und Betriebskosten zu vermeiden.

Eine App mit Fotofunktion könnte die Entscheidungsfindung hinsichtlich Wiederverwendung oder Recycling weitgehend automatisieren. Denkbar wäre der Einsatz von KI zur Identifizierung der Batterie anhand eines Fotos. Dabei könnte die Batterie automatisch anhand ihres äußeren Zustands bewertet werden. Ergänzend müsste lediglich die Spannung gemessen bzw. die Kapazitätsanzeige überprüft

werden, um festzustellen, ob der SoC noch für eine Wiederverwendung ausreicht. Die KI ließe sich mit einer Vielzahl von Batteriebildern trainieren, um eine zuverlässige Erkennung zu gewährleisten. Auf diese Weise ließe sich der Aufwand für die Identifikation und Bewertung deutlich reduzieren. Außerdem ermöglicht es eine simple Dokumentation und Speicherung der Batterieeigenschaften in einer Datenbank. Somit könnten Zeit und Kosten gespart werden, da weniger Personal nötig wäre.

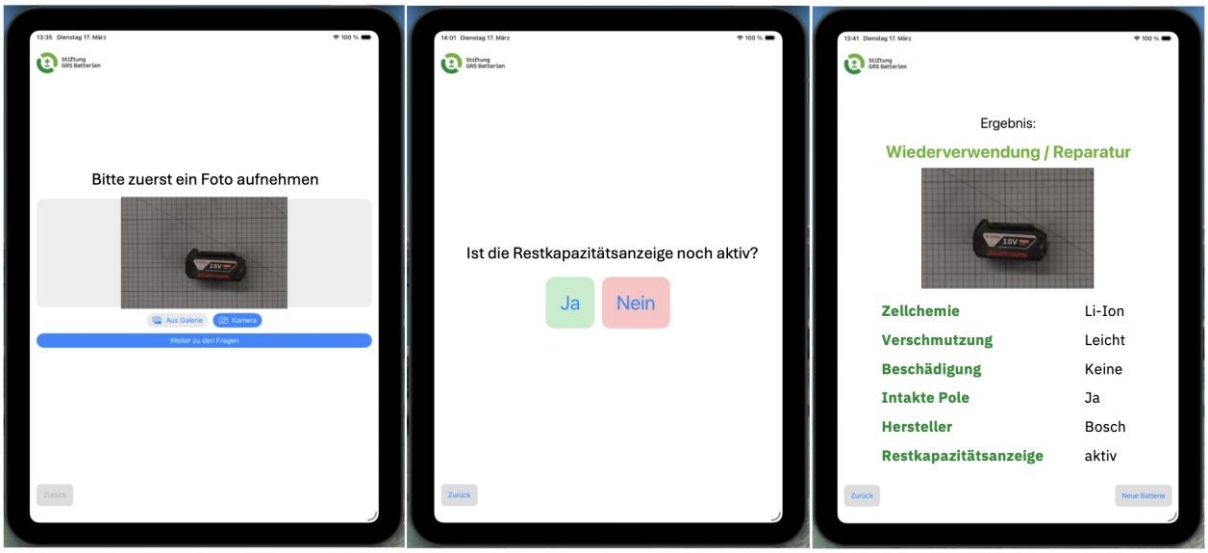


Abbildung 4.1: Beispiel für App-Oberfläche mit Fotofunktion und KI-Erkennung zur automatisierten Entscheidungs-findung.

Ein weiterer Ansatzpunkt für zukünftige Optimierungen liegt in der gezielten Weiterentwicklung von Sortier- und Identifikationstechnologien. Fortschritte in der sensorbasierten Erkennung von Zellchemien, Bauformen und Zustandsmerkmalen könnten die Genauigkeit und Geschwindigkeit von Sortierprozessen weiter erhöhen. In Kombination mit dem Entscheidungshilfesystem ließen sich dadurch Reinfraktionen mit höherer Qualität erzeugen, was insbesondere für hochwertige Recyclingpfade von Bedeutung ist (Loop 2). Gleichzeitig könnten robuste Verwertungswege (Loop 3) gezielter für solche Batterien genutzt werden, die den Anforderungen selektiver Prozesse nicht genügen.

Auch im Bereich der Wiederverwendung und Wiederinstandsetzung besteht weiteres Optimierungspotenzial, wenngleich die Projektergebnisse zeigen, dass dieser Pfad derzeit nur für einen begrenzten Anteil der anfallenden Powertoolbatterien wirtschaftlich tragfähig wäre. Zukünftige Verbesserungen könnten sich aus einer stärkeren Standardisierung von Batteriedesigns, einer besseren Zugänglichkeit von Zustandsdaten sowie aus angepassten rechtlichen Rahmenbedingungen ergeben. Das Entscheidungshilfesystem bietet hierfür eine geeignete Grundlage, da es eine klare Abgrenzung zwischen technisch machbaren, wirtschaftlich sinnvollen und rechtlich zulässigen ReUse-Optionen ermöglicht.

Langfristig eröffnet das Entscheidungshilfesystem zudem die Möglichkeit, neue regulatorische und technologische Entwicklungen schrittweise zu integrieren. Dazu zählen etwa digitale Produktpässe, verbesserte Kennzeichnungssysteme oder neue Recyclingverfahren. Durch die modulare Struktur der Entscheidungsbäume können zusätzliche Entscheidungsknoten ergänzt werden, ohne die bestehende Logik grundlegend zu verändern. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Weiterentwicklung des Systems im Einklang mit sich wandelnden Markt-, Technologie- und Rechtsrahmen.

Insgesamt zeigt sich, dass das entwickelte Entscheidungshilfesystem nicht als statisches Instrument zu verstehen ist, sondern als lern- und anpassungsfähiger Rahmen, der zukünftige Optimierungen und Innovationen in der EoL-Verwertung von NMC-LIB gezielt unterstützen kann. Insbesondere für KMU bietet dieser Ansatz die Möglichkeit, schrittweise in verbesserte Prozesse zu investieren, ohne sich

frühzeitig auf komplexe oder kostenintensive Systemlösungen festlegen zu müssen, und damit langfristig zur Stärkung einer effizienten und resilienten Batteriekreislaufwirtschaft beizutragen.

5 Fazit

Unter den aktuellen in diesem Bericht dargelegten Gegebenheiten und durchgeführten Versuchen ist bei ausreichenden Identifikations- und Sortiermöglichkeiten davon auszugehen, dass der überwiegende Anteil der anfallenden EoL-NMC-LIB aus Powertools zukünftig Loop 2 zugeführt werden kann. Loop 1 würde nach der derzeitigen Datenlage voraussichtlich den zweitgrößten Mengenanteil erhalten, während Loop 3 mengenmäßig den geringsten Anteil der EoL-NMC-LIB aufnehmen dürfte.

Die analysierten Daten zur direkten Wiederverwendung (R3 = Reuse) beziehungsweise Vorbereitung der Wiederverwendung durch Re-Strategien R4-R7 von EoL-NMC-LIB in „Second-Life"-Applikationen verdeutlichen, dass Loop 1 derzeit noch mit erheblichen Herausforderungen konfrontiert ist, die einer flächendeckenden Umsetzung entgegenstehen. Insbesondere bestehen signifikante Hürden hinsichtlich rechtlicher Rahmenbedingungen sowie der ökonomischen und praktischen Umsetzbarkeit. Die gesetzlichen Vorgaben nach ElektroG und BattDG erschweren es OEM, diesen Markt zu betreten und Loop 1 in das eigene Produktsortiment zu integrieren. Exemplarisch ist hervorzuheben, dass Abfälle ausschließlich an zertifizierte Entsorgungsfachbetriebe abgegeben werden dürfen. OEMs verfügen aufgrund ihrer primären Fokussierung auf die Produktfertigung nicht über das notwendige Fachwissen zur Erlangung entsprechender Zertifizierungen und weisen zudem Defizite im Bereich der fachgerechten Handhabung und Behandlung von Abfällen auf. Die erforderlichen Kompetenzen müssten extern eingekauft, ausgelagert oder durch eine grundlegende Transformation des Geschäftsmodells von einer linearen hin zu einer zirkulären Wirtschaft aufgebaut werden, um Lösungen im Rahmen von Loop 1 zu realisieren. Hinzu kommt, dass das aktuelle Produktdesign der Batterien unter anderem auf Robustheit und Sicherheit ausgelegt wurde und nicht auf Kreislauffähigkeit. Dies zeigt sich unter anderem an Verklebungen innerhalb des Akkus, aber auch an der Verwendung einer großen Materialvielfalt in der Akkugestaltung.
Darüber hinaus stellen auch technische Herausforderungen einen entscheidenden Faktor dar. Beispielsweise fehlen standardisierte Verfahren zur zuverlässigen Prüfung und Bewertung der Restkapazität sowie des Sicherheitszustands gebrauchter Batterien. Die Unsicherheit bezüglich Haftung und Garantieleistungen im Zusammenhang mit „Second-Life"-Produkten erschwert den Markteintritt zusätzlich. Weiterhin besteht ein Bedarf an effektiven Rückverfolgbarkeitssystemen, um Herkunft und Lebenszyklus der Batterien nachvollziehen zu können. Nicht zuletzt hemmt ein Mangel an klaren Normen und Standards für die Wiederverwendung von Batterien die Entwicklung skalierbarer Geschäftsmodelle in diesem Bereich.

Die für diese Studie durchgeführte Analyse der aktuellen Situation der Entsorgungsketten von EoL-NMC-LIB in Europa – insbesondere in Deutschland – zeigt, dass sich bisher deutlich auf die stoffliche Verwertung von EoL-NMC-LIB konzentriert wird. Diese Fokussierung wird in Loop 2 und Loop 3 der Studie adressiert. Der kontinuierliche Ausbau der Recyclingkapazitäten sowie die strategische Ausrichtung der Europäischen Kommission, beispielsweise durch die Batterieverordnung, unterstreichen die Bestrebungen, die Sammlung, Identifizierung und Verwertung von EoL-NMC-LIB innerhalb Europas weiter zu optimieren. Ziel dieser Maßnahmen ist es, die wirtschaftliche Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen in der Batterieproduktion gegenüber Drittstaaten zu reduzieren und die Wettbewerbsfähigkeit des europäischen Batteriesektors zu stärken, indem vermehrt wiedergewonnene Sekundärrohstoffe eingesetzt werden. Steigende Preise für primäre Batterierohstoffe begünstigen zudem ein hochwertiges Recycling mittels Hydrometallurgie zur Erzeugung von hochqualitativen Sekundärrohstoffen.

Um Abhängigkeiten von ausländischen Rohstoffmärkten zu reduzieren und europäische Souveränität im Batteriesektor zu stärken, wäre es jedoch erforderlich, dass OEM, deren Produktion bislang

außerhalb der EU stattfindet, ihre Fertigungsstätten in die Europäische Union verlagern. Dies würde auch zu einer Reduktion von Transportdistanzen sowie damit verbundene Kosten und zollrechtliche Hürden beim Rohstofftransport führen. Inwiefern dies ein realistisches Szenario darstellt, ist derzeit nicht absehbar. Der Wertschöpfungsgrad des Recyclings von NMC-LIB hängt maßgeblich sowohl von vorgelagerten Prozessschritten wie Sammlung, Transport und Sortierung als auch von der optimalen Kombination der eingesetzten Recyclingverfahren ab.

Die Untersuchung verdeutlicht zudem, dass durch die Einführung eines Batteriepasses beziehungsweise eines QR-Codes zur verbesserten Identifizierung von Powertoolbatterien in der EU sowie durch die Weiterentwicklung von Verfahren zur Identifikation der Zusammensetzung von Kathodenmaterial erhebliche Fortschritte erzielt werden könnten. Diese Entwicklungen tragen wesentlich zur weiteren Stärkung des Recyclings von EoL-NMC-LIB in der EU bei.

6 Ausblick

Aufbauend auf den Ergebnissen der durchgeführten Arbeitspakete können verschiedene Ansätze herausgearbeitet werden, wie sich die Entsorgungskette von NMC-LIB in Deutschland in der Zukunft gestalten und auch verändern könnte. Die Ansätze lassen sich grundlegend in drei Kategorien einordnen:

- Ansätze für herstellerindividuelle Stoffkreisläufe
- Ansätze für branchenspezifische Stoffkreisläufe
- Ansätze für alternative Strategien

Diese drei Ansätze werden im Folgenden präsentiert.

Ansätze für herstellerindividuelle Stoffkreisläufe

Herstellerindividuelle Stoffkreisläufe würde jeden einzelnen Inverkehrbringer, ob Hersteller und Einführer, dazu verpflichten, die Logistik zur Konsolidierung und Verwertung der in Verkehr gebrachten Batterien selbst zu organisieren. Dazu müssten Inverkehrbringer eigene Logistiksysteme etablieren, etwa durch Kooperationen mit offiziellen Sammelstellen (Werkstätten, Händlern, Wertstoffhöfen etc.). Endkunden könnten über ein Webportal sichere Versandverpackungen anfordern und den Rückversand an den Inverkehrbringern direkt initiieren.

Konsolidierte LIB könnten einer herstellereigenen Verwertungsanlage zugeführt werden, deren Prozesse optimal auf die EoL-Powertoolbatterien eingestellt sind. Die hergestellten hochqualitativen Sekundärrohstoffe könnten anschließend in der Produktion von neuen Batterien wiedereingesetzt werden oder einzelne Bauteile aus Demontageprozessen eine Wiederinstandsetzung erfahren. Vorteilhaft wäre, dass OEMs die Verantwortung für die Rohstoffe nicht abgeben und alles in ihrem eigenen Kreislauf behielten. Allerdings würde diese Vorgehensweise die OEMs, die sich bisher lediglich mit dem Upstream des Produktlebenszyklus beschäftigen, zwingen sich in Themen wie Reverse Logistik Systeme und stoffliche Verwertungsprozesse einzuarbeiten, was zu hohen Kosten und Ineffizienzen bei den OEMs führen würde. Ebenfalls ist fraglich, ob notwendige Massenströme, die zum wirtschaftlichen Betrieb von Recyclinganlagen notwendig sind über die Reverselogistiksysteme gedeckt werden könnten. Vor allem, wenn solche Systeme in mehreren Ländern parallel neu erschaffen werden müssen, stehen OEMs, vor großen Herausforderungen. Noch größer sind die Herausforderungen für OEMs mit niedrigen Marktanteilen oder Produkten für Nischenanwendungen. Neben steigenden Kosten für herstellerindividuelle Stoffkreisläufe ist auch der Administrative Aufwand für OEMs der mit der Organisation solcher Systeme einhergeht beträchtlich. OEMs wären verpflichtet Verträge mit allen Akteuren entlang der Entsorgungskette von Altbatterien zu schließen. Ebenso müssten OEMs die Berichtspflichten gegenüber den verantwortlichen Behörden übernehmen.
Als Alternative zum Eigenbetrieb könnten OEMs auch spezialisierte Dritte mit der Logistik und der Verwertung beauftragen. Dies würde den vertraglichen Aufwand auf Seiten der OEMs reduzieren, allerdings nicht alle Ineffizienzen ausräumen. Ebenso ist fraglich, inwiefern der Endverbraucher, je nach Ausgestaltung der herstellerindividuellen Stoffkreisläufe, mit den Rücknahmesystemen überfordert wäre (in Anlehnung an Agora Verkehrswende, 2025). Es wäre auch denkbar, dass einzelne Hersteller sich zusammenschließen und gemeinsam die Rücknahme und Verwertung ihrer Batterien organisieren. Es bestünden aber wahrscheinlich kartellrechtliche Vorbehalte gegenüber dieser Lösung, da Mitbewerber bei einem Zusammenschluss Informationen über Geschäftsvolumen bekämen (vgl. Agora Verkehrswende, 2025). Ein Zusammenschluss einzelner Inverkehrbringer würde Skaleneffekte

begünstigen, jedoch ähnliche Negativpunkte Punkte nach sich ziehen, als wenn ein einzelner Inverkehrbringer ein eigenes System betreibt.

Die Zuordnung der Batterien zum Hersteller in diesem Stoffkreislauf könnte über äußere Marker erfolgen, wie zum Beispiel über QR-Codes oder Etiketten im Rahmen der Kennzeichnungspflicht für Batterien (verpflichtend ab 18.02.2027 laut EU-BattVO für Industriebatterien, EV-Batterien, LV-Batterien; nicht für Gerätebatterien.). Dies würde eine klare Identifikation als auch die Rückverfolgbarkeit der Batterie sicherstellen und könnte gleichzeitig auch Informationen zur Batterie an den Endverbraucher liefern. Endverbraucher müssten durch Informationskampagnen oder beim Kauf bereitgestelltes Material über Rückgabemöglichkeiten aufgeklärt werden. Für gewerbliche Kunden könnten vertragliche Regelungen die Rückgabe am Ende der Lebensdauer verpflichtend machen. Zur Steigerung der Rückgabequote könnten Pfandsysteme oder Rabatte eingeführt werden. Nach der Rücknahme könnten die Batterien auf ihre „Second-Life“-Tauglichkeit in Loop 1 geprüft oder einem hochwertigen Recycling in Loop 2 zugeführt werden.

Ansätze für branchenspezifische Stoffkreisläufe

Bei einem branchenspezifischen Stoffkreislauf zur Rücknahme und Verwertung von EoL-NMC-LIB aus Powertools würden sektorspezifische Rücknahmestrukturen auf branchentypische Bedingungen abgestimmt. Für LIB aus Powertools bedeutet dies, dass diese an Sammelstellen kostenlos abgegeben werden können und abhängig davon von welchem Hersteller sie hergestellt wurden und welcher Batteriechemie sie angehören. Dies erhöht die Heterogenität des Abfallstroms und sorgt für mehr Sortieraufwand in Sortierbetrieben und Verwertern. Hersteller finanzieren dabei die komplette Entsorgungskette über Gebühren, die sie an Organisationen für Herstellerverantwortung zahlen. Organisationen für Herstellerverantwortung, übernehmen dann die erweiterte Herstellerverantwortung für die Inverkehrbringer. Die Skaleneffekte sind bei diesem Vorgehen wesentlich größer als bei herstellerindividuellen Systemen. Ebenso haben die Inverkehrbringer keine Aufwände in Bezug auf Berichtspflichten oder Vertragsangelegenheiten mit Akteuren entlang der Entsorgungskette von Batterien. Sie können sich vollkommen auf ihr eigentliches Geschäftsmodell entlang des Upstreams von LIB fokussieren. Sollten Hersteller beginnen eigene Recyclinganlagen oder „Second-Life“-Aktivitäten für ihre Batterien zu etablieren, könnten von den Organisationen für Herstellerverantwortung zurückgenommene und sortenrein sortierte Batterien den Herstellern zugeführt werden. Ansonsten würden die als Mischfraktion zurückgenommenen Batterien der regulären, bereits gut etablierten Entsorgungskette folgen und nach erfolgreicher Sortierung einem hochwertigen Recycling in Loop 2 zugeführt werden (in Anlehnung an Agora Verkehrswende, 2025).

Beispielhaft kann hier das Sammelsystem der GRS Service GmbH „GRS Powertools“ genannt werden, das Batterierücknahmen für derzeit 28 registrierte Hersteller organisiert (Stiftung elektro-altgeräte register [Stiftung ear], 2025). Eine Branchenlösung für Powertoolbatterien verbunden mit starker Aufklärung der Endnutzer zu Rückgabemöglichkeiten und Rücknahmewegen könnte laut Brüning et al. (2023) eine große Lenkungswirkung erzielen und eine gute Alternative zu einem Pfandsystem sein.

Ansätze für alternative und ergänzende Strategien

Neben den beiden zuvor beschriebenen Ansätzen herstellerindividuellen und branchenspezifischen Stoffkreisläufen, können weitere Ansätze identifiziert werden, die außerhalb der beschriebenen Konzepte liegen, welche allerdings als eine Unterstützung oder Ergänzung der beiden Systeme dienen könnten. Diese können in verschiedene Kategorien unterteilt werden:

- Inzentivierungsmechanismen und Pfand Systeme
- Digitale Plattformen und digitale Lösungen
- Mobile Rücknahmesysteme

Incentivierungsmechanismen und Pfand Systeme: Finanzielle Anreize und Pfandsysteme können Verbraucher motivieren, ihre Altbatterien zurückzugeben, um die Sammelquote zu erhöhen. Pfandsysteme könnten analog zu bestehenden Modellen für Autobatterien gestaltet werden, bei denen Kunden beim Kauf einer neuen Batterie einen Pfandbetrag zahlen, der bei Rückgabe der Altbatterie erstattet wird. Die Rückgabe könnte durch standardisierte Sammelboxen in Elektrofachmärkten oder Baumärkten erleichtert werden, die mit Sensoren ausgestattet sein können, um die Rückgabe zu registrieren und die Erstattung automatisch über ein digitales Zahlungssystem (z. B. QR-Code-Scan und mobile Payment-Apps) abzuwickeln. Für gewerbliche Kunden könnten vertraglich festgelegte Rückgabeprämien eingeführt werden, die mit ERP-Systemen (engl. Enterprise Resource Planning) verknüpft sind, um die Rückgabe zu dokumentieren und steuerliche Vorteile zu nutzen. Solche Systeme erfordern eine Schnittstelle zur Datenbank des Herstellers, um die Rückflüsse zu überwachen und die Einhaltung gesetzlicher Vorgaben (z. B. EU-Batterieverordnung) sicherzustellen. Ebenfalls würde durch den erhöhten Rücklauf von Batterien die Kritikalität von gewissen Rohstoffen reduziert werden, da mehr Inputmaterial für die Rohstoffrückgewinnung zur Verfügung stehen würde.
Kritiker der allgemeinen übergreifenden Pfandpflicht sehen bei der Reduzierung der Fehlwurfquote vor allem die Verbraucher in der Pflicht und raten daher zu stärkeren Aufklärungskampagnen. Weiterhin empfehlen sie lediglich die Einrichtung von freiwilligen Pfandsystemen, die auf einen Branchenbereich klar abgegrenzt sind, z.B. im Wachstumsmarkt der Industriebatterien als ein moderates Mittel, um eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu fördern. Die betroffenen Produkte sollten einfach identifizierbar sein, klar abgrenzbare Vertriebs- und Rücknahmestrukturen aufweisen, als auch enger Hersteller- und Vertreiber-Bindung unterliegen (Hobohm & Chryssos, 2021).
Eine Untersuchung in Deutschland zur Einführung für Pfandsysteme wurde 2023 von Brüning et al. im Rahmen einer Studie des Umweltbundesamtes durchgeführt. Dabei kamen die Autoren zum Ergebnis, dass die Einführung einer Pfandpflicht für LIB in Powertools innerhalb des Clusters „In Elektrowerkzeugen eingebaute Batterien, von Endnutzern problemlos entnehmbar“ zu einer Steigerung der gesammelten Mengen führen könnte. Stahl et al. (2021) identifizierten dazu ergänzend in einer Studie, dass die Einführung eines Pfandsystems eine Steigerung der Rücknahmemengen von 25 % in diesem Cluster erzielen könnte.
Brüning et al. (2023) identifizierten ein Lenkungsbedürfnis für das Cluster, um Fehlwürfe durch Endnutzer in andere Abfallströme zu vermeiden und Verluste von Batterien in den EAG-Abfallstrom zu reduzieren. Die Lenkungswirkung wäre allerdings auf das Cluster beschränkt und nur erzielbar, wenn die Endnutzerkenntnis über Rückgabemöglichkeiten und Rücknahmewege erhöht werden würde und das Pfand eine angemessene Höhe besäße. Bezogen auf das Cluster bzw. die Branchenlösung identifizieren die Autoren erhöhten Aufwand bei der Kennzeichnung der am Pfandsystem beteiligten Batterien, erhöhten Verwaltungsaufwand durch Einführung einer Clearingstelle sowie erhöhte Diebstahlgefahr von Batterien. Weitere Inzentivemaßnahmen neben einem Pfandsystem könnten zum Beispiel mögliche Rabatte auf den Neukauf von Batterien bei der Abgabe von einem alten Akku oder Bonuspunkte in einem extra dafür gestalteten Bonusprogramm sein.

Digitale Plattformen und digitale Lösungen: Digitale Plattformen und Lösungen können eine präzise Zuordnung von Batterien ermöglichen und die Rücknahmelogistik optimieren. Behilflich dabei können digitale Produktpässe (DPPs) sein, die ab 2027 gemäß der EU-Batterieverordnung bereits für andere Batterietypen verpflichtend sind. DPPs nutzen QR-Codes oder RFID-Tags auf Batterien, um Informationen wie Hersteller, Batteriechemie (z. B. NMC), Kapazität und Produktionsdatum zu speichern. Diese Daten werden in einer Blockchain-basierten Datenbank oder einer zentralen Cloud-Plattform gespeichert, um Rückverfolgbarkeit und Fälschungssicherheit zu gewährleisten. Endkunden könnten über eine mobile App den Rückgabeprozess initiieren, indem sie den QR-Code scannen und eine Rücknahme an einer nahegelegenen Sammelstelle oder per Versand organisieren. Solche Plattformen integrieren Programmierschnittstellen für Logistikdienstleister, die den Transport der Batterien zu zertifizierten Recyclingbetrieben koordinieren könnten. Automatisierte Sortieranlagen in

Recyclingzentren könnten die QR-Codes auch auslesen, um Batterien nach Chemie und Hersteller zu trennen, was den Sortieraufwand reduzieren und vereinfachen würde.

Mobile Rücknahmesysteme: Mobile Rücknahmesysteme können die Zugänglichkeit der Rückgabe, insbesondere in ländlichen Gebieten oder für gewerbliche Nutzer erhöhen. Mobile Sammelstationen bzw. Sammelmobile können in Form von speziell ausgestatteten Fahrzeugen oder temporären Containern realisiert werden, die mit feuerfesten und isolierten Sammelbehältern für LIB ausgestattet sind, um Sicherheitsrisiken wie Kurzschlüsse oder Brände zu minimieren. Diese Fahrzeuge sind mit GPS-Tracking und IoT-Sensoren verbunden, um die Füllstände der Sammelbehälter in Echtzeit zu überwachen und die Abhollogistik zu optimieren. Alternativ können Logistikdienstleister wie DHL oder UPS Abholservices anbieten, bei denen Kunden über eine App oder Webportal einen Abholtermin vereinbaren. Die speziellen Fahrzeuge würden die Batterien zu zentralen Sortierzentren transportieren, wo automatisierte Systeme (z. B. optische Sortierer oder Röntgenscanner) die Batterien nach Chemie und Zustand analysieren.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Massenanteile der vier wichtigsten Kathodenaktivmaterialien in Bezug auf die gesammelten Altbatterien im Jahr 2020. (RWTH Aachen Universität, BLB TU Braunschweig & VDMA, 2021) 8
Abbildung 3.2: Lebenszyklus von NMC-LIB. 8
Abbildung 3.3 Geografische Verteilung der globalen Batterie Lieferkette. (International Energy Agency, 2025; Fraunhofer ISI, 2025) 9
Abbildung 3.4: Prozessübersicht mechanischer und metallurgischer Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien nach Recycler. (Harper et al., 2019) 28
Abbildung 3.5: Prozess zur mechanischen Aufbereitung in Anlehnung an ERLOS Produktion und Montagen GmbH (gelb: Prozessschritte; blau: In-/Output). 29
Abbildung 3.6: Übersicht zu potenziellen Aufbereitungspfaden für LIB. (verändert nach Doose, Mayer, Michalowski und Kwade (2021)) 30
Abbildung 3.7: Anteile der Zellchemien von Powertool-LIB in Gew.-%. 35
Abbildung 3.8: Anteilige Verteilung der Hersteller von Powertoolbatterien nach Anzahl. 36
Abbildung 3.9: Anzahl sortierter Batterien sortiert nach Herstellungsjahr und Zellchemien, insgesamt. 37
Abbildung 3.10: SoC in % nach Herstellungsjahr, über alle untersuchten Elektrochemien verteilt. . 38
Abbildung 3.11: Herkunft der Wiederinstandgesetzten Batterien (n=265). 40
Abbildung 3.12: Prozessübersicht zur Wiederverwendung und Verwertung von Powertoolbatterien. 43
Abbildung 3.13: links: Angelieferter Sammelbehälter mit unsortiertem Batteriematerial; rechts: Powertool-Akku Robert Bosch Powertools GmbH vorsortiert. 44
Abbildung 3.14 Demontierter Powertool-Akkumulator mit freiliegenden Einzelzellen, entnommenen Befestigungsschrauben und handschriftlich dokumentierten Messwerten (Akkumulator-ID: 2.63). 47
Abbildung 3.15 Vollständig demontierter Powertool-Akkumulator mit beschrifteten Einzelzellen und sortierten Bauteilen (Akkumulator-ID: 1.40, Masse: 959 g, Gesamtspannung: 1,6 V). 50
Abbildung 3.16 Powertool-Akkumulator mit handschriftlichem Prüfprotokoll vor der Zyklisierung (Akkumulator-ID: 2.59, Sortierklasse: Robert Bosch Powertools GmbH). 51
Abbildung 3.17: Übersicht des Lebenszyklus, der Entsorgungsketten (Loop 1 in Gelb, Loop 2 in Orange und Loop 3 in Rot) sowie relevanter Entscheidungsprozesse (in Grün). 60
Abbildung 3.18: Entscheidungsbaum für Sammelstellen. Zur Identifizierung und Separierung von NMC-LIB von Endverbrauchern aus B2C oder B2B-Anwendung. 62
Abbildung 3.19: Entscheidungsbaum für Sortierbetriebe. Zur Identifizierung und Separierung von NMC-LIB von Sammelstellen. 64
Abbildung 3.20: Entscheidungsbaum für Betriebe zur Wiederinstandsetzung. Zur Identifizierung von NMC-LIB aus Sammelbetrieben, die zur Wiederverwendung geeignet sind. 68
Abbildung 4.1: Beispiel für App-Oberfläche mit Fotofunktion und KI-Erkennung zur automatisierten Entscheidungs-findung. 74
Abbildung A 1: Prüfprotokoll Seite 1. 100
Abbildung A 2: Prüfprotokoll Seite 2. 101
Abbildung A 3: Spannungsverteilung der geprüften AMP-Share Akkumulatoren. 102
Abbildung A 4: Einzelzellspannungen geprüfter Powertool-Akkumulatoren. 103
Abbildung A 5: Entscheidungsbaum für Betriebe zur Wiederinstandsetzung. 104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Übersicht der beteiligten Projektpartner. 3
Tabelle 2.2: Übersicht der Arbeitspakete und deren Inhalte. 4
Tabelle 2.3: Übersicht des zeitlichen Projektablaufs. 5
Tabelle 3.1: Übersicht von Eigenschaften von Powertool Gerätebatterien. 11
Tabelle 3.2: (Geplante) Batteriezellen Hersteller in Deutschland (Stand Oktober 2025). 12
Tabelle 3.3: Unternehmensstruktur der Elektrowerkzeug-Branche in Deutschland. 13
Tabelle 3.4: Batterie Recycling Standorte in Deutschland und Recyclingkapazitäten. 14
Tabelle 3.5: Übersicht der Sortiermöglichkeiten mit Vor- und Nachteilen. 20
Tabelle 3.6: Definition "Second-Life"-Strategien. 22
Tabelle 3.7: Übersicht der Anwendungsgebiete für „Second-Life“-LIB. 24
Tabelle 3.8: Gegenüberstellung unterschiedlicher Verwertungsverfahren für LIB. 26
Tabelle 3.9: Verhältnis von gemessener Spannung zu Nennspannung.. 35
Tabelle 3.10: Technische Merkmale der untersuchten Stichprobe. 40
Tabelle 3.11: Bewertungskriterien bei visueller Vorprüfung. 41
Tabelle 3.12: Bewertungskategorien und Spannungsbereiche für EoL-batterien. 41
Tabelle 3.13: Prüfparameter für Zyklierungsverfahren. 42
Tabelle 3.14: Qualitätsklassen für EoL-Batterien anhand von SoH-Bereichen. 42
Tabelle 3.15 Gradingmatrix zur Klassifikation von Powertool-Akkumulatoren. 45
Tabelle 3.16 Klassifikation geprüfter Powertool-Akkumulatoren. 46
Tabelle 3.17 Parametrierung des Zyklisierungsverfahrens zur Kapazitätsbestimmung. 47
Tabelle 3.18 Klassifikationsschema zur Einstufung gebrauchter Powertool-Akkumulatoren. 48
Tabelle 3.19 Verteilung der Qualitätsklassen nach Gradingschema für die Sortierklassen Robert Bosch Powertools GmbH und GRS Service GmbH (Prüfschritt C4, Teilstichprobe) 49
Tabelle 3.20 Verteilung der Qualitätsklassen nach Gradingschema für die Sortierklassen Robert Bosch Powertools GmbH und GRS (Prüfschritt C4, Teilstichprobe) 50
Tabelle 3.21 Zuordnung von Qualitätsklassen zu Anwendungsbereichen auf Grundlage der relativen Restkapazität. 52
Tabelle 3.22: Entscheidungskriterien zur Bewertung der Reparaturwürdigkeit gebrauchter Powertool-Akkumulatoren. 52
Tabelle 3.23: Prüfkriterien von Powertoolakkus nach den Reparaturen. 53
Tabelle 3.24: Wiederverwendbarkeit von Powertool Akkus aus variierenden Materialströmen in % bezogen auf Stückzahl. 54
Tabelle 3.25: Zu erwartende Unterschiede bei abgegebenen EoL-Batterien. 61
Tabelle 3.26: Entscheidungskriterien des Entscheidungsbaums für die Sammelstelle und ergänzende Erläuterungen. 63
Tabelle 3.27: Entscheidungskriterien des Entscheidungsbaums für den Sortierbetrieb und Erläuterungen zu den Entscheidungswegen. 66
Tabelle 3.28: Entscheidungskriterien des Entscheidungsbaums für den Wiederinstandsetzungsbetrieb und Erläuterungen zu den Entscheidungswegen. 69
Tabelle A 1: Übersicht recherchierter Artikel zum Thema "Erforschung neuer Prozesse" in chronologischer Reihenfolge zwischen 2015 und 2025. 91
Tabelle A 2: Übersicht recherchierter Artikel zum Thema "Optimierung etablierter Prozesse" in chronologischer Reihenfolge zwischen 2015 und 2025. 96
Tabelle A 3:Geräte und Hilfsmittel für Prüfverfahren. 98
Tabelle A 4: Enthaltene Parameter für die ReUse-Ready-Deklaration. 99

Abkürzungsverzeichnis

AAS	Atomabsorptionsspektroskopie
ADR	Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (frz. Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route)
Ah	Amperestunde (Kapazitätseinheit)
AP	Arbeitspaket
BMS	Batterie Management System
CC-CV	Konstantstrom-Konstantspannung-Verfahren (engl. Constant Current – Constant Voltage)
C_{gem}	Gemessene Kapazität
C_{nenn}	Nennkapazität (Herstellerangabe)
EoL	Lebensende (engl. End-of-Life)
EU	Europäische Union
EV	Elektrofahrzeug (engl. Electric Vehicle)
HF	Fluorwasserstoff (Flusssäure)
ICP-OES	Induktiv gekoppelter Plasma-Optischer Emissionsspektroskopie (engl. Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy)
IEA	Internationale Energieagentur (engl. International Energy Agency)
$I_{\text{Entladung}}$	Entladestrom
I_{Ladung}	Ladestrom
I_{max}	Maximaler zulässiger Strom
I_{min}	Minimaler zulässiger Strom
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LCO	Lithium-Kobaltoxid
LED	Leuchtdiode (Light Emitting Diode)
LFP	Lithium-Eisenphosphat
Li	Lithium / Lithium-Ionen
LIB	Lithium-Ionen-Batterie

LMO	Lithium-Manganoxid
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NIR	Nahinfrarotspektroskopie
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid
SEM-EDS	Rasterelektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (engl. Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)
SoC	Ladezustandskontrolle (engl. State of Charge)
SoH	Gesundheitszustand/Alterungszustand (engl. State of Health)
SVHC	Besonders besorgniserregende Stoffe (engl. Substances of very high concern)
$U_{\max}$	Obere Abschaltspannung (Ladeschlussspannung)
$U_{\min}$	Untere Abschaltspannung (Entladeschlussspannung)
XRD	Röntgenbeugung (engl. X-ray Diffraction)
XRF	Röntgenfluoreszenz (engl. X-ray Fluorescence)

Literaturverzeichnis

Advanced Rechargeable & Lithium Batteries Association (Hrsg.). (2025, Februar). *RECHARGE recommendations for the Clean Industrial Deal*. Verfügbar unter: https://rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2025/02/RECHARGE-Recommendations-on-the-Clean-Industrial-Deal_Feb-2025.pdf

Agora Verkehrswende (Hrsg.). (2025). Stoffkreisläufe für Antriebsbatterien. Rohstoffpotenziale des Batterierecyclings in der Automobilindustrie und -Optionen zur Erfüllung der erweiterten Herstellerver-antwortung in Europa. Studie gefördert durch Stiftung GRS Batterien. Verfügbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2025/Stoff-kreisl%C3%A4ufe_f%C3%BCr_Antriebsbatterien/131_Stoffkreisl%C3%A4ufe-f%C3%BCr-Antriebsbatterien.pdf

Bachér, J., Jenu, S. & Kajolinna, T. (2025). Identification of waste lithium-ion battery cell chemistry for recycling. *Waste Management (New York, N.Y.)*, *194*, 137–148. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.12.038

Bernhart, W., Hotz, T. & Koper, S. (Roland Berger GmbH, Hrsg.). (2023). *Second life and recycling: Enabling a circular battery economy*. Verfügbar unter: https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Second-life-and-recycling-Enabling-a-circular-battery-economy.html
Bockey, G., Deutskens, C. (Mitarbeiter) (PEM Motion GmbH, Hrsg.). (2025). Europe Battery Cell Production. Verfügbar unter: https://battery-news.de/en/europe-battery-cell-production/

Brüning, R., Wolf, J., Piehl, F., Löhle, S., Schmiedel, U. & Kerkhoff, M. (2023, Juni). *Prüfung der Einführung einer Pfandpflicht für lithiumhaltige Batterien und Akkumula-toren* (Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.). Dessau-Roßlau.

Cheng, A. L., Fuchs, E. R. H., Karplus, V. J. & Michalek, J. J. (2024). Electric vehicle battery chemistry affects supply chain disruption vulnerabilities. *Nature Communications*, *15*(1). https://doi.org/10.1038/s41467-024-46418-1

Cooper, D. R. & Gutowski, T. G. (2017). The Environmental Impacts of Reuse: A Review. Journal of Industrial Ecology, 21(1), 38–56.

Deutsche Bundesregierung. (2024). Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie. NKWS. Verfügbar unter: https://www.kreislaufwirtschaft-deutschland.de/fileadmin/user_upload/Mediathek/NKWS/nationale_kreislaufwirtschaftsstrategie_bf_final.pdf

Deutscher Bundestag. (2021). Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten - Elektro- und Elektronikgerätegesetz. ElektroG. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/elektrog_2015/

Deutscher Bundestag. (2021). Gesetz über die Bereitstellung von Batterien und Akkumulatoren auf dem Markt - Batteriegesetz. BattG. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/battg/

Deutscher Bundestag. (2023). Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter - Gefahrgutbeförderungsgesetz. GGBefG. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/gefahrgutg/BJNR021210975.html

Deutscher Bundestag. (2023). Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen - Chemikaliengesetz. ChemG. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/chemg/BJNR017180980.html

Deutscher Bundestag. (2023). Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherstellung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen - Kreislaufwirtschaftsgesetz. KrWG. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/

Deutscher Bundestag. Gesetz zur Durchführung der Verordnung (EU) 2023/1542 betreffend Batterien und Altbatterien - Batterierecht-Durchführungsgesetz. BattDG.

DIN EN IEC, 62281 (2024-03). Sicherheit von primären und sekundären Lithiumzellen und -batterien beim Transport.

Doose, S., Mayer, J. K., Michalowski, P. & Kwade, A. (2021). Challenges in Ecofriendly Battery Recycling and Closed Material Cycles: A Perspective on Future Lithium Battery Generations. *METALS*, *11*(2). https://doi.org/10.3390/met11020291

Dunn, J., Slattery, M., Kendall, A., Ambrose, H. & Shen, S. (2021). Circularity of Lithium-Ion Battery Materials in Electric Vehicles. *Environmental Science & Technology*, *55*(8), 5189–5198. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07030

Einhell Germany AG (Hrsg.). (2025, 11. Juli). *Akku-Recycling. Für eine nachhaltige Welt*. Verfügbar unter: https://www.einhell.de/akku-recycling/

Europäische Kommission. (2019, 11. Dezember). *Der europäische Grüne Deal. Erster klimaneutraler Kontinent werden*. Verfügbar unter: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de

Europäisches Parlament; Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2008/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. September 2008 über die Beförderung gefährlicher Güter im Binnenland. ADR. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32012L0019

Europäisches Parlament; Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (Neufassung) Text von Bedeutung für den EWR. WEEE-RL. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32012L0019

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

Europäisches Parlament; Rat der Europäischen Union. Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission.

Europäisches Parlament; Rat der Europäischen Union. Verordnung (EU) 2024/1252 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. April 2024 zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen und zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 und (EU) 2019/1020. CRAM. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202401252

European Commission - European Commission (Directorate-General for Financial Stability, Financial Services and Capital Markets Union (DG FISMA), Hrsg.). (2025, 10. Dezember). EU Taxonomy Navigator. Repair, refurbishment and remanufacturing. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/sustainable-finance-taxonomy/activities/activity/400/view

Fraunhofer. (2022). Umfeldbericht zum europäischen Innovationssystem Batterie 2022.

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Hrsg.). (2025). *Bedeutung der Länder für kritische Rohstoffe nach Land der Mine.* Verfügbar unter: https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/lithium-ionen-batterien-rohstoffe-quellen-weltweit-globaler-markt.html

Greenwood, M., Wentker, M. & Leker, J. (2021). A region-specific raw material and lithium-ion battery criticality methodology with an assessment of NMC cathode technology. *APPLIED ENERGY*, *302*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117512

Hans Böckler Stiftung. (2016). *Branchenanalyse Elektrowerkzeuge. Entwicklungstrends und Herausforderungen* (Study / Hans-Böckler-Stiftung, Nr. 343 (November 2016)). Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung. https://doi.org/147968

Haufe Akademie. (2025, 18. Dezember). Entscheidungsbaum: Definition und Anwendung. Verfügbar unter: https://www.haufe-akademie.de/blog/glossar/entscheidungsbaum/

Heimes, H. (2024). *Battery Atlas 2024. Shaping the European Lithium-Ion Battery Industry* (Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) of RWTH Aachen University, Hrsg.). RWTH Aachen University. Verfügbar unter: battery-atlas.eu

Hobohm, J. & Chryssos, G. (2021). Pfandsysteme - Ein geeigneter Lösungsweg zur Verbesserung der Rücknahme von Lithium-Altbatterien. Müll und Abfall, (3), 149–155.

Hunt, G. (1996, Januar). *Electric vehicle battery test procedures manual* (United States Advanced Battery Consortium (USABC) & Idaho National Engineering Laboratory (INEL), Hrsg.). Verfügbar unter: https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/battery/usabc_manual_rev2.pdf

International Energy Agency (Hrsg.). (2024). *EV Battery Supply Chain Sustainability*. Verfügbar unter: https://iea.blob.core.windows.net/assets/e75c9a13-3753-4677-933f-c7f9ae38cfdb/EVBatterySupplyChainSustainability.pdf

International Energy Agency (Hrsg.). (2024). *Batteries and Secure Energy Transitions.*

International Energy Agency (Hrsg.). (2025). *The global midstream and downstream battery supply chain*. Paris. Verfügbar unter: https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/the-global-midstream-and-downstream-battery-supply-chain-2024. Licence: CC BY 4.0

Kresse, C., Bastian, D., Bookhagen, B. & Frenzel, M. (2022). Lithium-Ionen-Batterierecycling.

Lee, H., Driscoll, E. H., Waters, K., Kendrick, E. & Sommerville, R. (2025). Pretreatment and Valorization of Critical Materials from Lithium-Ion Batteries Using Electrostatic and Magnetic Separation. *ADVANCED ENERGY AND SUSTAINABILITY RESEARCH*. https://doi.org/10.1002/aesr.202400366

McLoughlin, F. & Conlon, M. (2015, April). Secondary Re-Use of Batteries From Electric Vehicles for Building Integrated Photo-Voltaic (BIPV) applications. PV CROPS Technical Report (Technological University Dublin, Hrsg.).

Neef, C., Schmaltz, T. & Thielmann, A. (2021). *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Heraus forderungen für den Maschinen- und Anlagenbau* (Stiftung für den Maschinenbau, den Anlagenbau und die Informationstechnik, Hrsg.).

Patel, A. N., Lander, L., Ahuja, J., Bulman, J., Lum, J. K. H., Pople, J. O. D. et al. (2024). Lithium-ion battery second life: pathways, challenges and outlook. *Frontiers in Chemistry*, *12*. https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1358417

Potting, J., Hanemaaijer, A., Delahaye, R., Ganzevles, J., Hoekstra, R. & Lijzen, J. (2018). Circular economy: what we want to know and can measure. Framework and baseline assessment for monitoring the progress of the circular economy in the Netherlands. The hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.

Rauterberg, C. (2025). *Ein Jahr nach dem Baustart der Gigafactory: Arbeiten bei Northvolt gehen nur langsam voran, Projekte im Umfeld ruhen*. Verfügbar unter: https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Northvolt-bei-Heide-Was-gebaut-wird-und-was-nicht,northvolt628.html

Robert Bosch Power Tools GmbH (Hrsg.). (2025, 11. Juli). *Recycling. Aus Verantwortung für die Umwelt – über die Produktlebenszeit hinaus*. Verfügbar unter: https://www.bosch-professional.com/de/de/service/kundendienst/zusaetzliche-services/recyclingservice/?queryFromSuggest=true&userInput=recyc

Robert Bosch Power Tools GmbH (Hrsg.).. *ProCORE18V 12.0Ah Professional. Akkupack*. Verfügbar unter: https://www.bosch-professional.com/de/de/products/procore18v-12-0ah-1600A016GU

RWTH Aachen Universität; BLB TU Braunschweig; VDMA. (2021). *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien*. Frankfurt am Main.

Saxena, S., Le Floch, C., MacDonald, J. & Moura, S. (2015). Quantifying EV battery end-of-life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models. *JOURNAL OF POWER SOURCES*, *282*, 265–276. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.072

Soldan Cattani, N., Bajaber, A. & Heimes, H., Deutskens, C. (Mitarbeiter) (PEM Motion GmbH, Hrsg.). (2025). Europe Battery Recycling. Verfügbar unter: https://battery-news.de/en/europe-battery-recycling/

Stahl, H., Mehlhart, G., Gsell, M., Sutter, J., Dolega, P., Baron, Y. et al. (2021). *Assessment of Options to Improve Particular Aspects of the EU Regulatory Framework on Batteries. Final Report* (Europäische Kommission, Hrsg.). Luxemburg: Öko-Institut e.V; Ramboll; Umweltbundesamt Wien. Verfügbar unter: https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/78f09953-8c53-11eb-b85c-01aa75ed71a1/language-en

Stiftung elektro-altgeräte register (Hrsg.). (2025). *Verzeichnis der registrierten Hersteller und registrierten Bevollmächtigten nach dem BattG*. Verfügbar unter: https://www.ear-system.de/ear-verzeichnis/battghersteller.jsf#no-back

VDMA Batterieproduktion (Hrsg.). (2020). *Batterie-Produktionsmittel 2030. Roadmap*. Frankfurt am Main.

Vlad (Hrsg.). (2026, 23. Februar). Battery Reconditioning. Verfügbar unter: https://www.vlad.fr/en/content/11-Refurbishing

VoltR (Hrsg.). (2026, 23. Februar). Batteries lithium françaises et éco-responsables. Verfügbar unter: https://www.voltr.tech/en

Anhang

Tabelle A 1: Übersicht recherchierter Artikel zum Thema "Erforschung neuer Prozesse" in chronologischer Reihenfolge zwischen 2015 und 2025.

Autor, Herausgeber oder Institution	Jahr	Titel	Zeitschrift/Zeitung	DOI
Perdana, Indra; Aprilianto, Doni Riski; Fadillah, Farika Asna; Fadli, Riskal; Petrus, Himawan Tri Bayu Murti; Astuti, Widi; Muflikhun, Muhammad Akhsin; Nilasary, Hanida; Oktaviano, Haryo Satriya; Fathoni, Ferry; Raihan, Edo; Muzayanha, Soraya Ulfa	2025	Lithium recovery from mixed spent LFP-NMC batteries through atmospheric water leaching	Scientific Reports	10.1038/s41598-025-86542-6
Shoaei, Asal; Firoozi, Sadegh	2025	Recovery of lithium, cobalt and nickel from the spent NMC Li-ion battery by reduction roasting, selective leaching and precipitation	Waste Management (New York, N.Y.)	10.1016/j.wasman.2025.114749
Wang, Shuanghong; Tan, Guangsu; Li, Wenda; Yang, Shaoyu; Lu, Yang; Huang, Yi-Fan; Wang, Weiwei; Wang, Yuzhu; Xu, Chao	2025	Influence of Nickel-Content and Cycling Rate on the Phase Behavior of Layered Nickel-Rich Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries	ACS Applied Materials & Interfaces	10.1021/acsami.4c21038
Xu, Boren; Díez, Noel; Sevilla, Marta; Ferrer, María L.; Gutiérrez, María C.; Del Monte, Francisco	2025	Recycling and Reutilization of Metals Aided by Deep Eutectic Solvents: from NMC Cathodes of Spent Li-ion Batteries to Electrolytes for Supercapacitors	Chemsuschem	10.1002/cssc.202401128
Barros, Thiago V.; Notario, Vitor A.; Oliveira, Jose Augusto de; Bispo, Diego Fonseca;	2024	Recovery of lithium and cobalt from lithium cobalt oxide and lithium nickel manganese	Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)	10.1016/j.envpol.2024.124570

Autor, Herausgeber oder Institution	Jahr	Titel	Zeitschrift/Zeitung	DOI
Freitas, Lisiane Dos Santos; Jegatheesan, Veeriah; Cardozo-Filho, Lucio		cobalt oxide batteries using supercritical water		
Botelho, Jr., Amilton Barbosa; Da Silva, David Vasconcelos; Nunes de Oliveira Lima, Anastassia Mariah; Oliveira, Rafael Piumatti de; Gobo, Luciana Assis; Kumoto, Elio Augusto; Ferrarese, Andre; Soares Tenorio, Jorge Alberto; Romano Espinosa, Denise Crocce	2024	LAREX-Tupy Process: Recycling of Li-Ion Batteries from Electric Vehicles by Hydrometallurgical Route Towards Circular Economy		10.1007/978-3-031-50349-8_168
Fu, Yuanpeng; Dong, Xianshu; Ebin, Burçak	2024	Resource Recovery of Spent Lithium-Ion Battery Cathode Materials by a Supercritical Carbon Dioxide System	Molecules (Basel, Switzerland)	10.3390/molecules29071638
Karati, Anirudha; Gargh, Prashant P.; Paul, Sabyasachi; Das, Sourav; Shrotriya, Pranav; Nlebedim, Ikenna C.	2024	Materials recovery from NMC batteries with water as the sole solvent	Journal Of Environmental Management	10.1016/j.jenvman.2024.121710
Kim, Jeon; Nwe, Hsu Hsu; Yoon, Chong Seung	2024	Enhanced bioleaching of spent Li-ion batteries using A. ferrooxidans by application of external magnetic field	Journal Of Environmental Management	10.1016/j.jenvman.2024.122012
Zhang, Jie	2024	Economic benefit analysis of lithium battery recycling based on machine learning algorithm	Plos One	10.1371/journal.pone.0303933

Autor, Herausgeber oder Institution	Jahr	Titel	Zeitschrift/Zeitung	DOI
Davis, Krystal; Demopoulos, George P.	2023	Hydrometallurgical recycling technologies for NMC Li-ion battery cathodes: current industrial practice and new R&D trends	Rsc Sustainability	10.1039/d3su00142c
Fonseca, Nathan; Thummalapalli, Sri Vaishnavi; Jambhulkar, Sayli; Ravichandran, Dharneedar; Zhu, Yuxiang; Patil, Dhanush; Thippanna, Varunkumar; Ramanathan, Arunachalam; Xu, Weiheng; Guo, Shenghan; Ko, Hyunwoong; Fagade, Mofe; Kannan, Arunchala M.; Nian, Qiong; Asadi, Amir; Miquelard-Garnier, Guillaume; Dmochowska, Anna; Hassan, Mohammad K.; Al-Ejji, Maryam; El-Dessouky, Hassan M.; Stan, Felicia; Song, Kenan	2023	3D Printing-Enabled Design and Manufacturing Strategies for Batteries: A Review	Small (Weinheim An Der Bergstrasse, Germany)	10.1002/smll.202302718
Gmar, Soumaya; Muhr, Laurence; Lutin, Florence; Chagnes, Alexandre	2022	Lithium-Ion Battery Recycling: Metal Recovery from Electrolyte and Cathode Materials by Electrodialysis	Metals	10.3390/met12111859
Ilyas, Sadia; Ranjan Srivastava, Rajiv; Singh, Vinay K.; Chi, Ruan; Kim, Hyunjung	2022	Recovery of critical metals from spent Li-ion batteries: Sequential leaching, precipitation, and cobalt-nickel separation using Cyphos IL104	Waste Management (New York, N.Y.)	10.1016/j.wasman.2022.10.005
Jiao, Miaolun; Zhang, Qi; Ye, Chenliang; Liu, Zhibo; Zhong, Xiongwei; Wang, Junxiong; Li,	2022	Recycling spent LiNi1-x-yMnxCoyO2 cathodes to bifunctional NiMnCo catalysts for zinc-air batteries	Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of America	10.1073/pnas.2202202119

Autor, Herausgeber oder Institution	Jahr	Titel	Zeitschrift/Zeitung	DOI
Chuang; Dai, Lixin; Zhou, Guangmin; Cheng, Hui-Ming				
Wang, Tao; Luo, Huimin; Fan, Juntian; Thapaliya, Bishnu P.; Bai, Yaocai; Belharouak, Ilias; Dai, Sheng	2022	Flux upcycling of spent NMC 111 to nickel-rich NMC cathodes in reciprocal ternary molten salts	Iscience	10.1016/j.isci.2022.103801
Zhou, Yiwei; Chen, Zhuo; Chen, an; Zhang, Jingwei; Wu, Xingjiang; Xu, Jianhong	2022	Comprehensive recovery of NCM cathode materials for spent lithium-ion batteries by microfluidic device	Separation And Purification Technology	
dos Santos, M. P.; Aldaya Garde, Ivan Aritz; Bassoto Ronchini, Carolina Magda; Cardozo Filho, Lucio; Meireles de Souza, Guilherme Botelho; Francisco Abbade, Marcelo Luis; Regone, Natal Nerimio; Jegatheesan, Veeriah; Oliveira, Jose Augusto de	2021	A technology for recycling lithium-ion batteries promoting the circular economy: The RecycLib	Resources Conservation And Recycling	
Lombardo, Gabriele; Ebin, Burçak; Steenari, Britt-Marie; Alemrajabi, Mahmood; Karlsson, Ingrid; Petranikova, Martina	2021	Comparison of the effects of incineration, vacuum pyrolysis and dynamic pyrolysis on the composition of NMC-lithium battery cathode-material production scraps and separation of the current collector	Resources, Conservation And Recycling	10.1016/j.resconrec.2020.105142
Windisch-Kern, Stefan; Holzer, Alexandra; Wiszniewski, Lukas; Raupenstrauch, Harald	2021	Investigation of Potential Recovery Rates of Nickel, Manganese, Cobalt, and Particularly Lithium from NMC-Type Cathode Materials (LiNixMnyCozO2) by Carbo-Thermal	Metals	10.3390/met11111844

Autor, Herausgeber oder Institution	Jahr	Titel	Zeitschrift/Zeitung	DOI
		Reduction in an Inductively Heated Carbon Bed Reactor		
Wang, Wen-Yu; Yang, Hong-Chi; Xu, Ren-Bin	2020	High-Performance Recovery of Cobalt and Nickel from the Cathode Materials of NMC Type Li-Ion Battery by Complexation-Assisted Solvent Extraction	Minerals	10.3390/min10080662
Pant, Deepak; Dolker, Tenzin	2017	Green and facile method for the recovery of spent Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC) based Lithium-ion batteries	Waste Management (New York, N.Y.)	10.1016/j.wasman.2016.09.039
Hanisch, Christian; Loellhoeffel, Thomas; Diekmann, Jan; Markley, Kely Jo; Haselrieder, Wolfgang; Kwade, Arno	2015	Recycling of lithium-ion batteries: a novel method to separate coating and foil of electrodes	Journal Of Cleaner Production	10.1016/j.jclepro.2015.08.026

Tabelle A 2: Übersicht recherchierter Artikel zum Thema "Optimierung etablierter Prozesse" in chronologischer Reihenfolge zwischen 2015 und 2025.

Autor, Herausgeber oder Institution	Jahr	Titel	Zeitschrift/Zeitung	DOI
Rosso, Laura; Alcaraz, Lorena; Rodríguez-Largo, Olga; López, Félix A.	2025	Purification of Li2CO3 Obtained through Pyrometallurgical Treatment of NMC Black Mass from Electric Vehicle Batteries	Chemsuschem	10.1002/cssc.202401722
Stallmeister, Christin; Mehl, Niklas; Friedrich, Bernd	2025	Microwave thermal treatment of industrial NMC 622 lithium-ion battery shredder and its influence on reaction products compared to conventional pyrolysis	Journal Of Environmental Management	10.1016/j.jenvman.2025.124616
Ahuis, Marco; Aluzoun, Anas; Keppeler, Miriam; Melzig, Sebastian; Kwade, Arno	2024	Direct recycling of lithium-ion battery production scrap – Solvent-based recovery and reuse of anode and cathode coating materials	Journal Of Power Sources	10.1016/j.jpowsour.2023.233995
Barros, Thiago V.; Oliveira, Jose Augusto de; Dos Santos, Mirian Paula; Bispo, Diego Fonseca; Freitas, Lisiane Dos Santos; Jegatheesan, Veeriah; Cardozo-Filho, Lucio	2024	Assessment of an eco-efficient process for the optimization of metal recovery in lithium cobalt oxide and lithium nickel manganese cobalt oxide batteries	Chemosphere	10.1016/j.chemosphere.2024.143209
Blumenthal, Georg von	2024	Recycling von Batterie-Rohstoffen	Citplus	

Autor, Herausgeber oder Institution	Jahr	Titel	Zeitschrift/Zeitung	DOI
Sales, Jeneson Medeiros de Aquino; Botelho Junior, Amilton Barbosa; Gobo, Luciana Assis; Kumoto, Elio Augusto; Espinos, Denise Crocce Romano; Tenorio, Jorge Alberto Soares	2024	Precipitation of manganese by ozone from hydrometallurgical recycling process of lithium-ion batteries	Journal Of Cleaner Production	10.1016/j.jclepro.2023.140099
van de Ven, Johannes J. M. M.; Yang, Yongxiang; Abrahami, Shoshan T.	2024	A closer look at lithium-ion batteries in E-waste and the potential for a universal hydrometallurgical recycling process	Scientific Reports	10.1038/s41598-024-67507-7
Zou, Yuanmin; Chernyaev, Alexander; Ossama, Muhammad; Seisko, Sipi; Lundström, Mari	2024	Leaching of NMC industrial black mass in the presence of LFP	Scientific Reports	10.1038/s41598-024-61569-3
Prazanova, Anna; Koci, Jan; Mika, Martin Havlik; Pilnaj, Dominik; Plachy, Zbynek; Knap, Vaclav	2023	Pre-Recycling Material Analysis of NMC Lithium-Ion Battery Cells from Electric Vehicles	Crystals	10.3390/cryst13020214
Lombardo, Gabriele; Ebin, Burçak; St J Foreman, Mark R.; Steenari, Britt-Marie; Petranikova, Martina	2020	Incineration of EV Lithium-ion batteries as a pretreatment for recycling - Determination of the potential formation of hazardous by-products and effects on metal compounds	Journal Of Hazardous Materials	10.1016/j.jhazmat.2020.122372

Tabelle A 3:Geräte und Hilfsmittel für Prüfverfahren.

Gerät/Hilfsmittel	Verwendungszweck
Digitalmultimeter (kalibriert)	Spannungsmessung (C2, C3)
Batterietester/Zyklisiergerät	Kapazitätsbestimmung (C4)
Elektronische Last	Entladung mit konstantem Strom
Labornetzteil (CC-CV)	Ladung mit konstantem Strom / Spannung
Präzisionswaage	Massenbestimmung
Handwerkzeug (Schraubendreher, Zangen)	Demontage

Tabelle A 4: Enthaltene Parameter für die ReUse-Ready-Deklaration.

Parameter	Beschreibung
Identifikationsnummer	Fortlaufende, eindeutige Kennung zur Rückverfolgbarkeit
U_min	Minimale Spannung während der Zyklisierung / bzw. die Tiefenentladungsspannung
U_max	Maximale Spannung während der Zyklisierung
I_min	Maximaler Entladestrom
I_max	Maximaler Ladestrom
Batterietyp	Herstellerbezeichnung und chemische Zusammensetzung
Nenn Kapazität	Ursprüngliche Kapazität laut Herstellerangabe
U_z max	Maximale Zellspannung
U_z min	Minimale Zellspannung
Imb.	Voltageimbalance
Kapazität (Ah)	Gemessene Kapazität aus der Zyklisierung (Mittelwert)
Visueller Zustand	Bewertung gemäß Vorprüfung (C1)

Battery Damage Service GmbH | Rebenring 33 | 38106 Braunschweig

BDS Battery Damage Service GmbH

Pruefzertifikat ***(technisches Muster, 1 Seite)***

Zertifikat-Nr.: BDS-Bosch-2025_GBA1.25

Datum: 12.12.2025

1) Pruefgegenstand

Feld	Angabe
Akkumulator-/Akkupack-ID	GBA1.25
System/Plattform	GBA
Hersteller (Powertool)	Bosch
Zellchemie (falls bekannt)	NMC
Nennspannung	18V
Nennkapazitaet	5 Ah
Herkunft / Anlieferzustand	Boschanalyse 1

2) Prüfdatum und Methodik (kurz)

Datum Prüfung	12.12.2025
Prüfkonzept	EASLi Grade System
Sichtzustand vor Zyklisierung	Dreckig leicht abgenutzt

3) Messergebnisse (relevant)

Messgröße	Wert	Einheit / Kommentar
Klemmspannung (vor Zyklisierung)	16,5 V	V
Restkapazität (aus Zyklisierung)	70%	%
Absolute Restkapazitaet (optional)	3,5 Ah	Ah/Wh
Ergebnis SoH/Grading	B	A: Sehr gut B: Gut C: Ausreichend

4) Zelltest

Nr.	Fraktion	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	Ah nenn	Ah real	U_max	U_min	U_imb
1.25	Boschanalyse 1	3,4	3,4	3,4	3,3	3,3	5	3,6	0,44	0,28	0,16

Hinweis (Bezug auf die Prüfung): Die Bewertung erfolgte zum Zeitpunkt der Prüfung anhand der dokumentierten Messgrößen und des festgestellten visuellen Zustands. Die eingestufte Klemmspannung sowie die abgeleitete Restkapazität (aus der Zyklisierung) bilden die Grundlage für die Qualitätsklassifizierung (SoH/Grading) und die daraus resultierende Zuordnung für weitere Nutzung. Etwaige spätere zusätzliche Alterungs-, Lade- oder Transportschäden können das Ergebnis verändern, für eine anderweitige Verwendung ist daher gegebenenfalls eine erneute technische Prüfung erforderlich. Abweichungen oder besondere Auffälligkeiten sind im zuständigen Mess- und Prüfprotokoll zu dokumentieren

Ort: Langelsheim Datum: 12.12.2025

_____

BDS Battery Damage Service GmbH

BDS Battery Damage Service GmbH

Battery Damage Service GmbH · Rebenring 33 · 38106 Braunschweig · Deutschland
HR-Nr.: HRB 209558 · USt.-ID: DE346542750 · Steuer-Nr.: 346542750 · EORI: DE390576765097536
Geschäftsführung: Lukas Block

Bankverbindung: Braunschweigische Landessparkasse NORD L/B
IBAN: DE97 2505 0000 0201 7047 07 · BIC: NOLADE2HXXX1 · Konto: 201 7047 07 · BLZ: 25050000

Abbildung A 1: Prüfprotokoll Seite 1.

Battery Damage Service GmbH | Rebenring 33 | 38106 Braunschweig

Pruefzertifikat ***(technisches Muster, 2 Seite)***

Zertifikat-Nr.: BDS-Bosch-2025_GBA1.25

Datum: 12.12.2025



Prüfparameter:	
Nr.	1.25
Sortierkampagne	Bosch Analyse 1
U_min	14,5
U_max	21
I_min	18
I_max	10
Akku Bez.	GBA
Nenn-Ah	5

Battery Damage Service GmbH · Rebenring 33 · 38106 Braunschweig · Deutschland
HR-Nr.: HRB 209558 · USt.-ID: DE346542750 · Steuer-Nr.: 346542750 · EORI: DE390576765097536
Geschäftsführung: Lukas Block

Bankverbindung: Braunschweigische Landessparkasse NORD L/B
IBAN: DE97 2505 0000 0201 7047 07 · BIC: NOLADE2HXXX1 · Konto: 201 7047 07 · BLZ: 25050000

Abbildung A 2: Prüfprotokoll Seite 2.

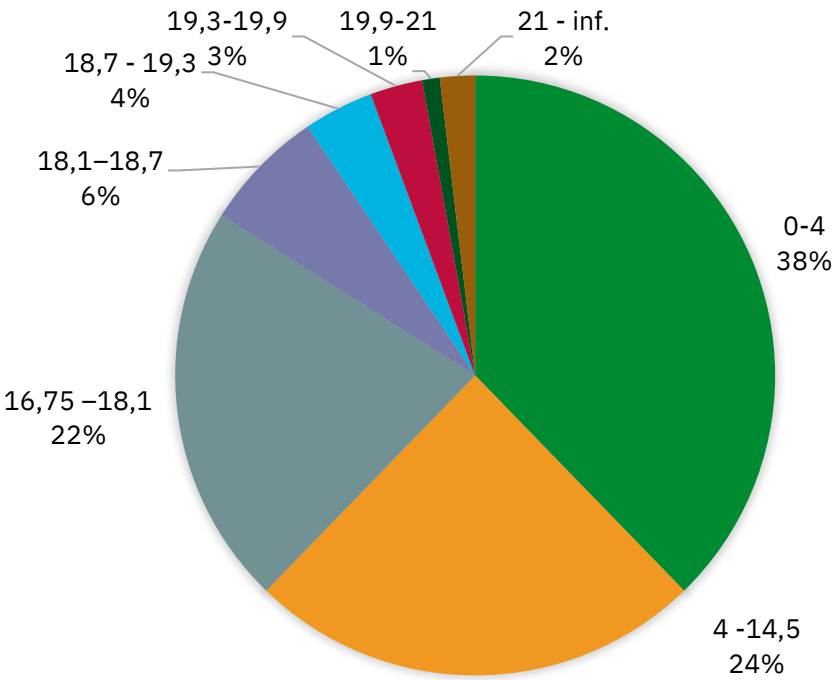


Abbildung A 3: Spannungsverteilung der geprüften AMP-Share Akkumulatoren nach Spannungsklassen in V (n = 106).

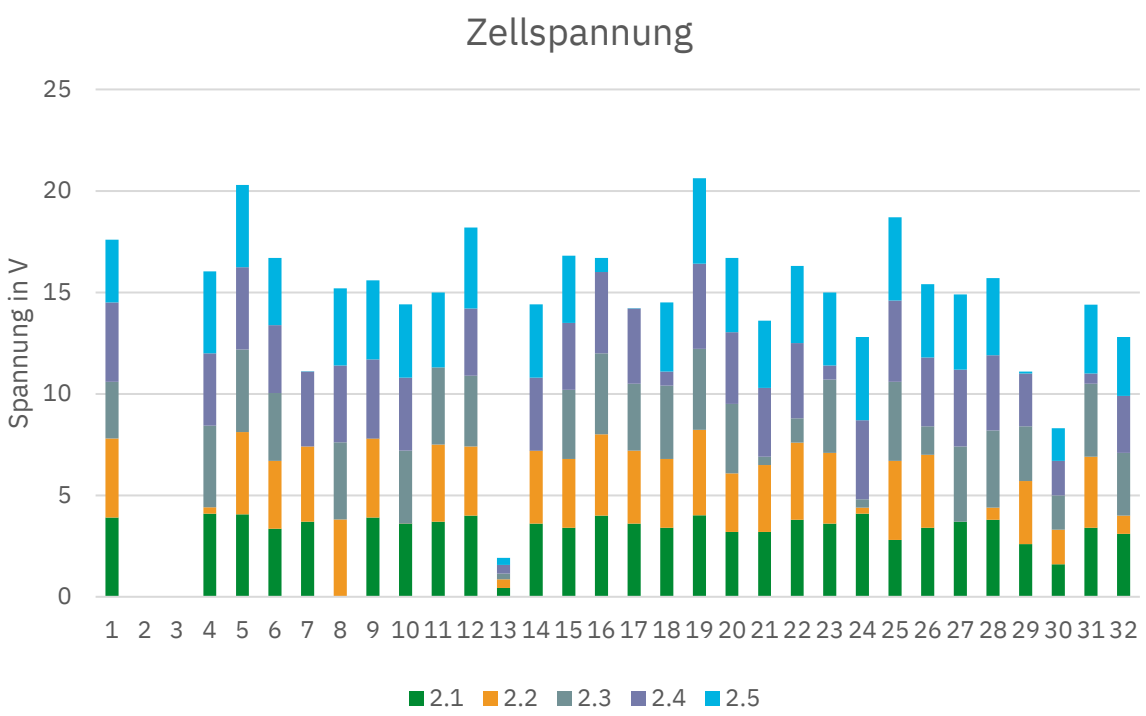


Abbildung A 4: Einzelzellspannungen geprüfter Powertool-Akkumulatoren, gestapelte Darstellung der fünf Serienzellen je Akkumulator (n = 32).

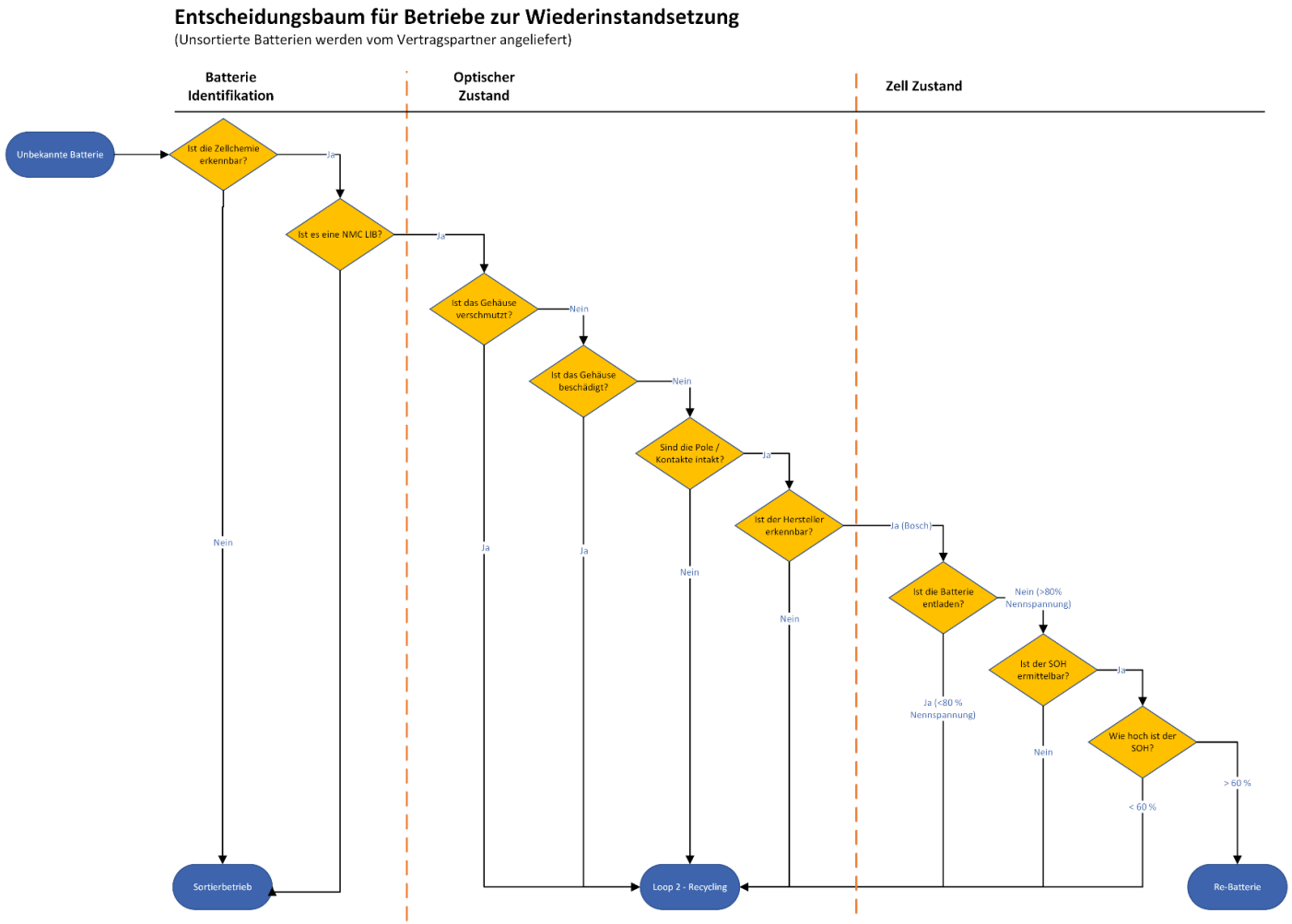


Abbildung A 5: Entscheidungsbaum für Betriebe zur Wiederinstandsetzung. Identifizierung von geeigneten NMC-LIB aus Mischfraktion.

Impressum

Herausgeberin
© Stiftung GRS Batterien
Gotenstraße 14, 20097 Hamburg
November 2025