

RECYCLING VON LITHIUM-IONEN-BATTERIEN



RWTH AACHEN
UNIVERSITY



Batterieproduktion

BLB BATTERY
LABFACTORY
BRAUNSCHWEIG

Ein Zentrum der TU Braunschweig

Übersicht

Lithium-Ionen-Batterie (LIB)

Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

Demontage

Recycling

- Die **Menge** der Lithium-Ionen-Batterien (LIB) im „End of Life“ (EoL) steigt in den kommenden Jahren aufgrund des wachsenden Inverkehrbringens von Elektrofahrzeugen signifikant an, weswegen neue **Konzepte zum Recycling und zur Rohstoffrückgewinnung** entwickelt werden müssen.
- Die in der Batterieproduktion entstehenden **Prozessausschüsse** sorgen in naher Zukunft für eine Notwendigkeit höherer Recycling-Kapazitäten.
- Zur Umsetzung **nachhaltiger EoL-Konzepte** müssen sich alle Akteure entlang der Wertschöpfung von der Materialsynthese über die Batteriezell-, Batteriemodul- und Batteriepackproduktion bis hin zur Nutzungsphase mit diesem Thema auseinandersetzen.
- **Recyclingquoten** von einzelnen Materialien (bis zu 95 %) werden dabei sowohl von der **CEID (Circular Economy Initiative Deutschland, acatech)*** vorgeschlagen als auch von der **EU** in der **Batterie-Direktive** vorgesehen.

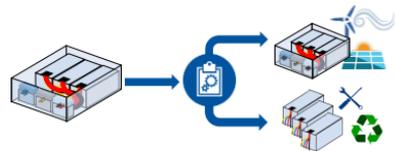
Grundlagen

- Aufbau und Funktion von LIB
- Kostenübersicht
- Kathodenzusammensetzung
- Anodenzusammensetzung
- Life Cycle Assessment
- Nachhaltigkeit
- Recycling von LIB



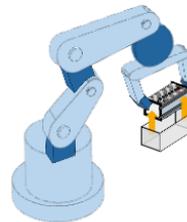
Umgang mit EoL-Batterien

- Risiken im Umgang mit LIB
- Transport und Lagerung
- Charakterisierung von LIB
- Klassifizierung von LIB



Demontage

- Herausforderungen
- Öffnen des Gehäuses
- Demontage des Batteriepacks
- Demontage der Batteriemodule
- Automatisierung des Prozesses



Recycling

- Überblick
- Mechanisches Recycling
- Pyrometallurgie
- Hydrometallurgie



Aufbau und Funktion von LIB

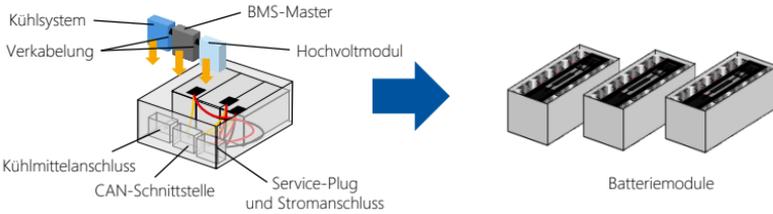
Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

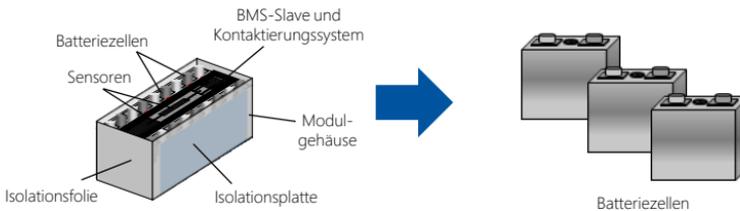
Demontage

Recycling

Batteriepack → Batteriemodule



Batteriemodul → Batteriezellen



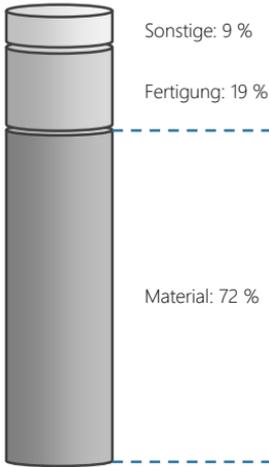
- Das **Batteriepack** besteht aus mehreren Batteriemodulen sowie weiteren elektrischen, mechanischen und thermischen Komponenten. Es wird je nach geforderten Leistungsdaten unterschiedlich verschaltet und dimensioniert.
- Das **Batteriemodul** besteht wiederum aus Batteriezellen, die seriell oder parallel verschaltet werden können.
- Die **Batteriezelle** existiert in drei unterschiedlichen **Zellformaten**: zylindrische Zellen, prismatische Zellen und Pouch-Zellen. Der allgemeine Aufbau der Batteriezelle ist dabei unabhängig vom jeweiligen Zelltyp.
- Allgemein besteht eine Batteriezelle aus **Anoden** und **Kathoden** sowie dem **Separator**, der die Elektroden voneinander trennt. Dazwischen befindet sich der für den Ladungstransport notwendige ionenleitfähige **Elektrolyt**.
- Durch die Verwendung hochwertiger Metalle als Aktivmaterial der Kathode wird diese zur **Schlüsselkomponente** im Bereich des Recyclings und daher im Folgenden genauer betrachtet.
- Die **Kathode** besteht aus einem Stromableiter (häufig Aluminium-Folie) und dem Aktivmaterial, das häufig eine der folgenden Zusammensetzungen aufweist:
 - **NMC** (Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid),
 - **LCO** (Lithium-Kobalt-Oxid),
 - **LM(N)O** (Lithium-Mangan-(Nickel)-Oxid),
 - **LFP** (Lithium-Eisen-Phosphat),
 - **NCA** (Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid)

Kostenübersicht

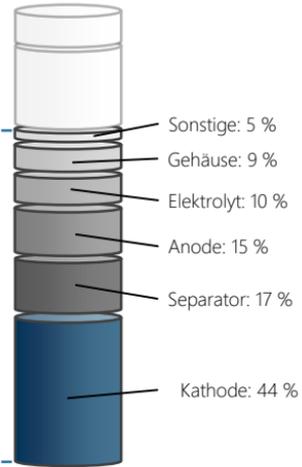
Grundlagen



Batterie-Gesamtkosten*



Batterie-Materialkosten*



- Die teuerste Komponente eines Batterieelektrischen Fahrzeugs (BEV) ist das **Batteriepack** mit bis zu 50 % der Gesamtkosten.
- Die **Materialkosten** nehmen bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Batteriezellen den Hauptanteil der Batterie-Gesamtkosten ein.
- Das **Kathodenmaterial** ist mit etwa 44 % der Materialkosten die teuerste Komponente der Batteriezelle.
- Durch die Verwendung **hochwertiger Kathoden- und Anodenmaterialien** besteht die Möglichkeit, die Batterie leistungsstärker, energiereicher und damit durchsetzungsfähiger zu gestalten.
- Für die Rückgewinnung der hochwertigen Kathodenmaterialien existiert industriell derzeit **kein durchgängiger wirtschaftlicher Recycling-Prozess**, für die Anodenmaterialien keine industrielle Recycling-Lösung.
- Materialien aus dem Batteriesystem wie **Stahl** und **Kunststoffe** werden bereits durch mechanische Trennverfahren (über Dichte, Partikelgröße, Magnetisierbarkeit etc.) erfolgreich von den restlichen Komponenten getrennt, weswegen hier nicht näher auf diese Materialien eingegangen wird.
- Die Rohstoffe **Lithium, Kobalt, Nickel** und **Mangan** stehen primär im Fokus der aktuellen und künftigen Recycling-Prozesse, obwohl diese bezogen auf die Materialzusammensetzung des gesamten Batteriesystems nur einen geringen Gewichtsanteil von weniger als einem Drittel aufweisen. Im Zuge der zu erfüllenden Gesamt-Recycling-Raten von bis zu mehr als 70 % wird auch die Wiedergewinnung des Anodenmaterials eine steigende Bedeutung erlangen.

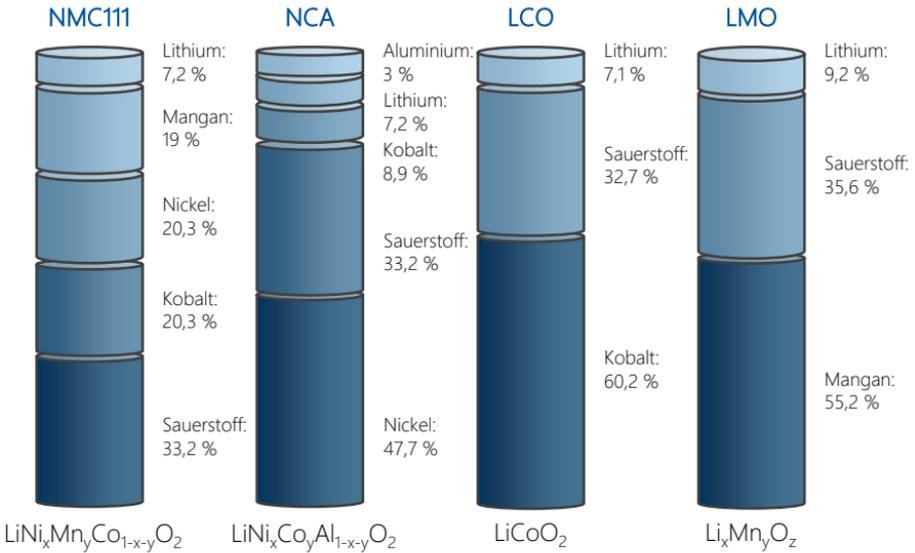
Kathodenzusammensetzung

Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

Demontage

Recycling



- In der Grafik sind die Massenanteile der vier **wichtigsten Kathoden-Aktivmaterialien** in Bezug auf die gesammelten Altbatterien im Jahr 2020 dargestellt.
- Neben NMC111 werden in BEV noch **weitere Variationen** von NMC – z. B. NMC622 oder NMC811/NCA – verwendet, die einen höheren **Nickelanteil** aufweisen.
- LCO und LMO bestehen im Gegensatz zu NMC nur aus einem der drei Metalle, LFP beinhaltet Eisen. Daher ergeben sich **andere Eigenschaften** in Bezug auf Energiedichte, Lebensdauer und Sicherheit.
- LMO bildet **verschiedene Oxide** (z. B. LiMn_2O_4 , Li_2MnO_3), so dass hier nur ein Mittelwert über alle Massenanteile dargestellt werden kann.
- Die stark **schwankenden Rohstoffpreise dieser Elemente** sorgen für das Streben der Batteriezellhersteller nach Rohstoffsicherheit, die sich u. a. durch neue Recycling-Technologien erreichen lässt.
- Diese Schwankungen entstehen auch aufgrund der **langen Lieferketten**, da die Rohstoffvorkommen auf bestimmte Länder begrenzt sind.

Voraussichtliche gesammelte Altbatterien, Stand 2020*

- NMC: 3.700 Tonnen
- LCO: 2.700 Tonnen
- LMO: 1.500 Tonnen
- LFP: 250 Tonnen

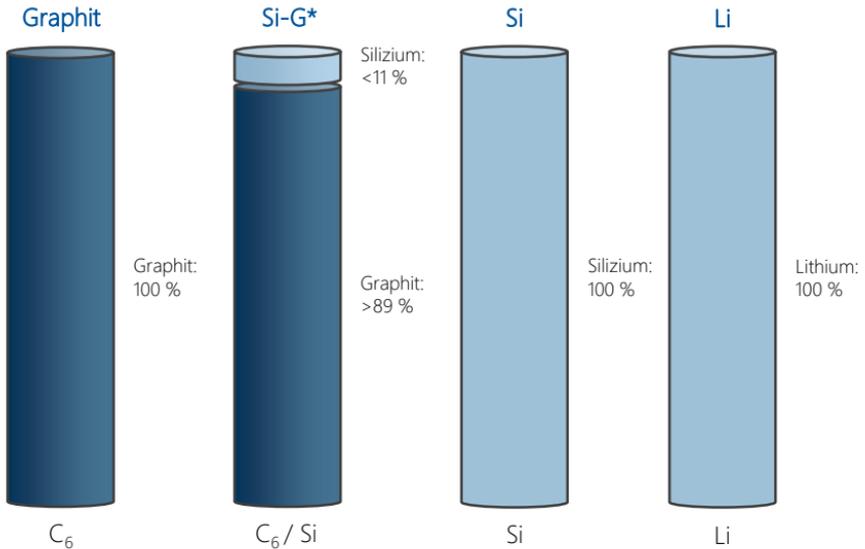
Entsorgungskosten

- Aktuell müssen Unternehmen, die Batterien auf den Markt bringen, hohe Entsorgungskosten einplanen und entsprechende Rücklagen bilden.

* Friedrich et al. „Recovery of Valuable Metals from E-Waste and Batteries by Smart Process Design“, RWTH Aachen, IME, 2020; Mayyas et al. „The case for recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive li-ion batteries“, 2018

Anodenzusammensetzung

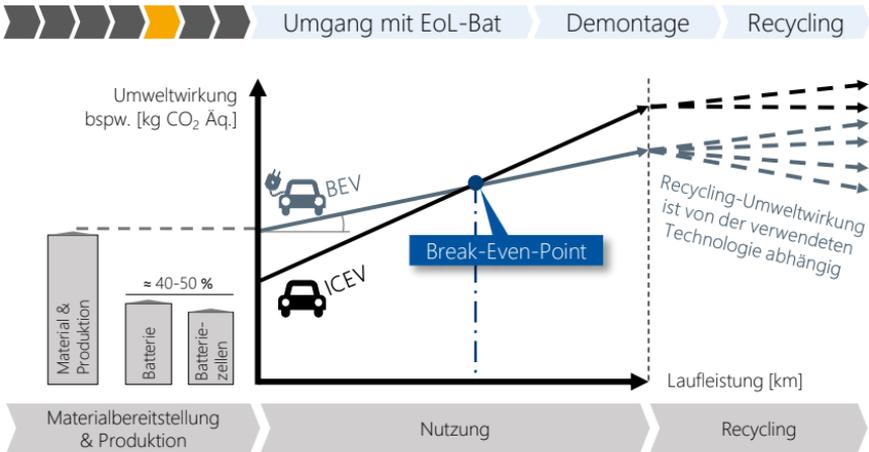
Grundlagen



- In der Grafik sind die Massenanteile der vier **wichtigsten Anoden-Aktivmaterialien** in Bezug auf den Stand der Technik und Forschung dargestellt. Mit Blick auf die gesammelten Altbatterien im Jahr 2020 ist jedoch nur die **Graphit-Anode** von Relevanz.
- Durch die Mischung von Graphit und Silizium wird u. a. die Energiedichte erhöht und die Schnellladefähigkeit gesteigert. Langfristig wird die Verwendung von **reinem Silizium** angestrebt, um u. a. die **Energiedichte** zu maximieren. Zusätzlich werden Anoden aus Lithiummetall entwickelt, die sehr hohe Energiedichten aufweisen, jedoch die Herausforderung der Dendritenbildung mit sich bringen.
- **Herausforderungen** bei der Verwendung reiner Silizium-Anoden liegen in der Agglomeration von Li-Ionen, der Formierung der SEI-Schicht und der Dendritenbildung.
- Wird Lithium beim Ladevorgang im Silizium eingelagert, hat dies eine große **Volumenänderung** in der Anode zur Folge. Um Beschädigungen der Anode zu vermeiden, ist die Menge des zugesetzten Siliziums entscheidend.
- Um zu verhindern, dass die Silizium-Anode beschädigt wird, kann diese mit **Silizium-Oxid** (SiO_x) beschichtet werden. Da bei der Verwendung von SiO_x unerwünschte irreversible Nebenprodukte wie Li_2O und Li_4SiO_4 entstehen, soll langfristig auf reines Silizium gesetzt werden.
- Bislang liegt der Fokus auf der Rückgewinnung der Metalle innerhalb der LIB. Jedoch nimmt die **Rückgewinnung des Graphits** stetig an Bedeutung zu.
- Durch das **Recycling** von Graphit kann, trotz mangelnder natürlicher Vorkommen, dieses in Europa gewonnen bzw. produziert werden.

Life Cycle Assessment (LCA)

Grundlagen



- Trotz der hohen Kosten der Batterie – vor allem durch die teuren Rohstoffe – sollte der **umwelttechnische Aspekt** intensiv mitbetrachtet werden.
- Zu Beginn ihres Lebenszyklus haben BEV eine größeren CO₂-Fußabdruck als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren (ICEV, Internal combustion engine vehicle), dafür aber eine geringere CO₂-Belastung in der Nutzungsphase.
- Der große initiale CO₂-Fußabdruck entsteht durch die **Primärmaterialaufbereitung** und durch die **Produktion der Batteriezellen**.
- Die **Variabilität** der Umweltwirkungen während der Nutzungsphase der BEV ist von verschiedenen Faktoren abhängig und führt zu unterschiedlichen Break-Even-Points. Derzeit wird dieser Punkt in der Regel nach 50.000 bis 80.000 gefahrenen Kilometern erreicht.
- Die Faktoren, die den Break-Even-Point beeinflussen, sind u. a. der genutzte **Energie-Mix** beim Laden, die **Klimabedingungen** während der Nutzung (Jahreszeit/Tageszeit), die **Topologie** oder das **Nutzerverhalten**.
- Ein Energie-Mix mit einem **höheren Anteil an Ökostrom** beeinflusst den Break-Even-Point **positiv**.
- Allgemein können Faktoren, die die **Lebenszeit** der Batterie **verlängern**, die Gesamtbilanz **positiv** beeinflussen.
- Auch die **Recycling-Technologie** – insbesondere für die Batteriezellen – übt großen Einfluss auf die Gesamtumweltwirkung eines BEV aus und kann die Ökobilanz insbesondere positiv, in ungünstigen Fällen aber auch negativ beeinflussen.
- Ein früher **Break-Even-Point** und eine **effektive Recycling-Technologie** müssen erreicht werden, damit durch die E-Mobilität die CO₂-Emission im Vergleich zu ICEV weiter reduziert werden kann.

Nachhaltigkeit

Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

Demontage

Recycling



- Neben den zuvor genannten Faktoren ist der Break-Even-Point auch von der Umweltbilanz der **Batteriematerialherstellung** abhängig. Die Materialien sind in der Erdkruste mit $<0,01\%$ (ausgenommen Mn) nur wenig vorhanden und werden zudem nicht in Deutschland abgebaut.
- Der Abbau des Leichtmetalls Lithium benötigt sehr **große Mengen Wasser**, was sinkende Grundwasserspiegel der Salzseen in den Abbaugebieten zur Folge hat. Die Wasserverarmung wirkt sich negativ auf die lokale Landwirtschaft und somit auf die Grundversorgung der Bevölkerung aus.
- Darüber hinaus wird bei der Gewinnung dieser Metalle durch **Raffinationsprozesse** die Umwelt signifikant belastet. Quantitative Aussagen über den genauen Anteil gestalten sich aufgrund von fehlenden Informationen als schwierig.
- Durch die **ungleichmäßige Rohstoffverteilung** auf verschiedene Kontinente kommt es zu langen Transportwegen, die mit einem hohen CO_2 -Ausstoß verbunden sind. Auch aus diesem Grund gewinnt die Weiterentwicklung der Recycling-Technologie zur Realisierung einer örtlichen Kreislaufwirtschaft weiter an Bedeutung.

CO_2 -Emissionen

- Die CO_2 -Emissionen lagen 2019 für die Produktion von NMC-Batterien für Kleinwagen bei etwa 70-77 kg/kWh Batteriekapazität*. Der Wert ist stark vom verwendeten Energie-Mix abhängig.

CO_2 -Einsparung

- Durch eine Kreislaufwirtschaft können sich die CO_2 -Emissionen, die durch Bergbau, Raffination und den Transport der Rohstoffe erzeugt werden, stark reduzieren lassen.

Nachhaltigkeit

- Verbesserte Recyclingverfahren sorgen dafür, dass in Zukunft weniger begrenzte Rohstoffe abgebaut werden, was den Preis der Batterie senkt und die Umweltbelastungen reduziert.

* Unter der Verwendung von Erdgas zur Wärmeerzeugung in der Produktion | Emilsson et al. „Lithium-Ion Vehicle Battery Production“, 2019; Mayyas et al. „The case for recycling“, 2018 | Agora Verkehrswende „Klimabilanz von Elektroautos“, 2019

Recycling von LIB

Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

Demontage

Recycling



- Aus den vorangegangenen Abschnitten wird die Notwendigkeit einer Umstellung von der aktuellen Linearwirtschaft zu einer **Kreislaufwirtschaft** deutlich.
- Die Hauptziele der Kreislaufwirtschaft sind die unbegrenzte Wiederverwendung von Materialien durch das Schließen des Produkt-Lebenszyklus und die damit einhergehende **reduzierte Abfallentsorgung** sowie die **Reduzierung der Abhängigkeit** von wichtigen Primärmaterialien.
- Der klassische Wertschöpfungskreis kann durch Re-Use und Remanufacturing erweitert werden. Die für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft relevanten Begriffe Re-Use, Remanufacturing und Recycling lassen sich als **Re-X** zusammenfassen.
- Da 12 % der gesamten **Treibhausgasemissionen** der EV-Batterien im EoL-Status in Europa entstehen, gilt dieser Lebensphase eine besondere Aufmerksamkeit.
- Im Folgenden wird daher der **Umgang mit EoL-Batterien mittels Recycling** näher erläutert.

Re-Use

- Lithium-Ionen-Batterien, die am Ende ihrer Lebensdauer in BEV noch über ausreichende Restkapazität verfügen, können u. U. in anderen Anwendungen, bspw. stationären Energiespeichern, eingesetzt werden.

Remanufacturing

- Remanufacturing ermöglicht die Verlängerung des ersten Lebenszyklus durch die Aufbereitung von Altbatterien zur Wiederverwendung in BEV, indem beschädigte Komponenten der Batterie ausgetauscht oder ersetzt werden.

Recycling

- Recycling ist erforderlich, um durch einen sicheren Prozess die Rohstoffe aus der Batterie zurückzugewinnen und wieder in einen Batterieproduktionsprozess zurückzuführen.

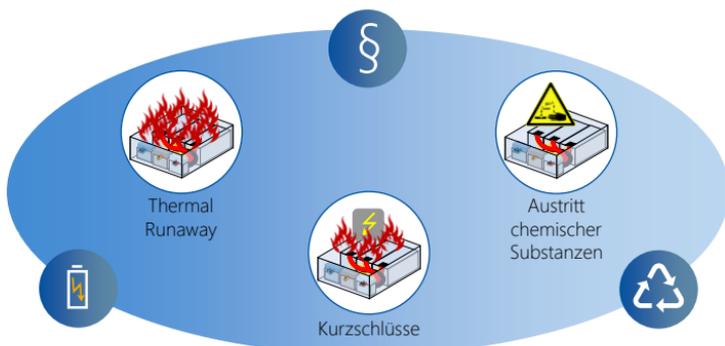
Risiken im Umgang mit LIB

Umgang mit EoL-Batterien

Grundlagen

Demontage

Recycling



- Mit **steigendem Bedarf** an LIB in Elektrofahrzeugen werden immer größere Mengen End-of-Life-Batterien gesammelt, die verwertet werden müssen.
- Wegen des hohen **Gefahrenpotenzials** ist der bewusste und sorgsame Umgang mit Altbatterien besonders wichtig.
- Die bestehenden **Gefahren** sind dabei:
 - Thermal Runaway durch brennbare Substanzen und chemische Kettenreaktionen
 - Brandgefahr durch interne oder externe Kurzschlüsse von Zellen oder Modulen
 - Austritt von Chemikalien, bspw. des Elektrolyten, durch mechanische Beschädigungen

Brandgefahr

- Eine Beschädigung/Überhitzung kann zu einem internen Kurzschluss und zur Entzündung der Batteriezellen führen, wobei toxische Gase austreten können.
- Durch die beim Batteriebrand entstehenden reaktiven Zersetzungsprodukte kann es zu einer unkontrollierten Freisetzung der gespeicherten Energie kommen (Thermal Runaway).

Kurzschlussgefahr

- Werden die Altbatterien nicht fachgerecht gelagert, können Kurzschlüsse entstehen, die zur Selbstentzündung im Sammelbehälter führen.

Bedarf an globalen Sicherheitsmaßnahmen

- Transport und Lagerung der Lithium-Ionen-Batterien müssen beschädigungsfrei und unter Einhaltung internationaler Normen und Richtlinien vorgenommen werden.

Transport und Lagerung

Umgang mit EoL-Batterien

Grundlagen

Demontage

Recycling

	IEC 62281	UN 38.3	ADR*	VdS 3103	Altfahrzeugverordnung*
Transport	Anforderungen an den Transport, um die Sicherheit von LIB sicherzustellen	Kriterien und Testverfahren für LIB, die für den Transport erfüllt werden sollten	Regeln für die Verpackung, Kennzeichnung und den Transport von Gefahrgütern	Keine Angaben	Keine Angaben
Lagerung	Generelle Sicherheitsanforderungen für die Lagerung von LIB	Keine Angaben	Keine Angaben	Anweisungen im Umgang mit LIB bzgl. der Schadensverhütung	Handlungsvorgabe zur Lagerung

Lithium-Ionen-Batterien sind seit 2009 Gefahrgut der Klasse 9; folgende Richtlinien und Normen sind deshalb beim **Transport** von LIB zu beachten:

- IEC 62281: Sicherheit von primären und sekundären Lithiumzellen und -batterien während des Transports
- ADR-konforme Kennzeichnung
- UN 38.3: elektrische, mechanische und thermische Tests zur Transportsicherheit von LIB. Berichte über erfolgreiche Tests müssen vorliegen.
- UN 3090: Lithium-Metall-Batterien
- UN 3480: Lithium-Ionen-Batterien

Lithium-Ionen-Batterien aus BEV sind als Gefahrstoff zu lagern. Folgende Richtlinien und Sicherheitsmaßnahmen sind deshalb bei der **Lagerung** von LIB zu beachten:

- VdS 3103: Schadenverhütung von Lithium-Ionen-Batterien
- Altfahrzeugverordnung: „Batterien sind gesondert in säurebeständigen Behältern oder auf einer abflusslosen und säurebeständigen Fläche zu lagern.“
- Sicherheitsschränke nach EN 14470
- Brandschutzcontainer mit geprüfter Feuerwiderstandsfähigkeit
- Lagerung nur zulässig, wenn die LIB nach UN 38.3 geprüft sind.
- Lithiumbatterien mit mittlerer Kapazität (> 100 Wh und ≤ 12 kg) müssen von anderen Bereichen räumlich (mindestens 5 m) oder baulich feuerbeständig getrennt sein.

Die genannten Richtlinien und Sicherheitsmaßnahmen gelten in dieser Form vorwiegend in **Deutschland**, da jedes Land der EU über eine **eigene Batterie-Gesetzgebung** verfügt.

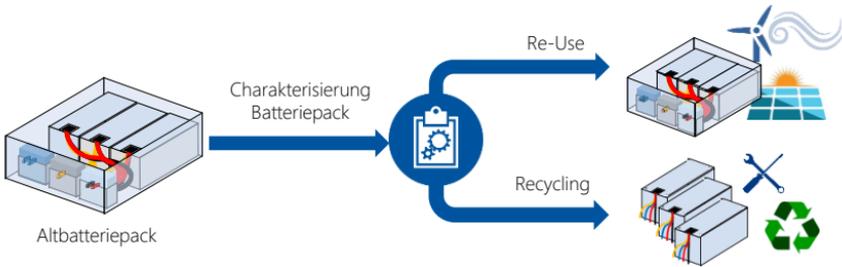
Charakterisierung von LIB

Umgang mit EoL-Batterien

Grundlagen

Demontage

Recycling



- Die genaue Charakterisierung von Altbatteriepacks erfolgt durch zeit- und kostenintensive **elektrische Testmethoden**.
- Falls die Nutzungs- und **Zustandsdaten** aus der ersten Nutzungsphase im Fahrzeug **verfügbar** sind, kann die Zustandsbestimmung der Batterie deutlich schneller und wirtschaftlicher erfolgen.
- Da die Zustandsdaten Dritte bislang (geplant ist ein EU-weiter Batteriepass) meist nicht kennen, müssen wirtschaftliche Testkonzepte entwickelt werden.
- Folgende **Verfahren** zur Batteriecharakterisierung können auf die eingehenden Altbatterien angewendet werden:

Eingangskontrolle

Schnell

- Nach dem Ende des ersten Lebenszyklus werden die LIB gesammelt und auf offensichtliche Defekte wie z. B. mechanische Schäden oder undichte Stellen visuell oder mit Hilfe von Luftdruck überprüft.

Datenauswertung

Schnell

- Durch Auswertung der Nutzungsdaten wie Selbstentladung, Lade-/Entladevorgänge und Zustandsgrößen (z. B. Zelltemperatur) kann ohne großen Messaufwand eine Entscheidung über die weitere Verwendung der Batterie getroffen werden.

SoH-Bestimmung

Aufwendig

- Kapazitäts- und Leistungsbestimmungen sind kosten- und zeitaufwendig, da hierfür die Verwendung teurer Messgeräte notwendig ist.
- Durch Messung der chemischen und physikalischen Eigenschaften der LIB wie der kathodischen galvanostatischen Impulse oder der AC*-Messung kann der Batteriezustand bestimmt werden.

Widerstandsbestimmung

Aufwendig

- Durch verschiedene Degradationsprozesse (Elektrolytzersetzung, Abscheidungen auf den Elektrodenoberflächen usw.) nimmt der Innenwiderstand zu.
- Dieser wird über kurze Stromimpulse oder mit der elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) bei hohen Frequenzen bestimmt und gibt Aufschluss über den Zustand der Batterie.

* Alternating Current

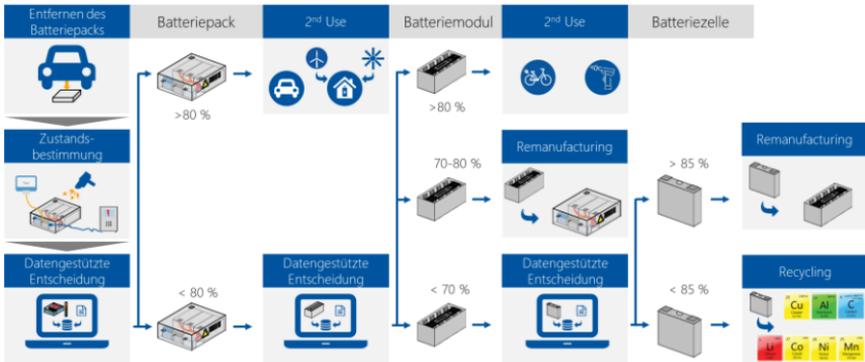
Klassifizierung von LIB

Umgang mit EoL-Batterien

Grundlagen

Demontage

Recycling



- Mit Hilfe verschiedener Testverfahren werden die LIB nach ihrer ersten Nutzungsphase entsprechend ihres aktuellen **State of Health (SoH)** klassifiziert und den jeweiligen Anwendungen zugeordnet.
- Nach Entfernung des Batteriepacks aus dem Fahrzeug wird durch **Schnelltests** (visuelle Untersuchung, Innenwiderstand) der Batteriezustand ermittelt und eine **Vorsortierung** vorgenommen.
- Nach der ersten Nutzungsphase der LIB liegt der SoH durchschnittlich bei 80 %. Weisen die Schnelltests auf einen guten Zustand des **Batteriepacks** hin, wird entsprechend der SoH bestimmt. Anschließend kann wie folgt vorgegangen werden (wenn nicht ein direktes Recycling möglich ist):
- Das Pack kann in einem „2nd Use“ ohne weitere Behandlung eingesetzt werden, wenn der SoH noch über 80 % liegt. Anderenfalls werden die Batteriepacks auf Modulebene demontiert und charakterisiert.
- **Batteriemodule** mit einem SoH von über 80 % können mit geringem Aufwand in einen „2nd Use“ überführt werden. Module mit einem SoH zwischen 70 % und 80 % eignen sich zum Wiederaufbau von Batteriepacks (Remanufacturing). Weisen die Module einen SoH von unter 70 % auf, werden diese – wenn es das Batteriemoduldesign zulässt – auf Zellebene demontiert und charakterisiert.
- Aus **Batteriezellen** mit einem SoH von mehr als 85 % können wiederum Batteriemodule aufgebaut werden (Remanufacturing). Zellen mit einem SoH von unter 85 % werden dem Recycling zugeführt.
- Dieser Prozess zur Batterieklassifizierung sollte aus wirtschaftlichem Interesse innerhalb **kurzer Testzeiten** sowie mit **geringem Anlagenaufwand** und niedrigen Personalkosten durchgeführt werden.
- Zur Klassifizierung der LIB müssen die Batteriepacks und -module demontiert werden. Aus diesem Grund wird im Folgenden die **Demontage** von LIB erläutert.

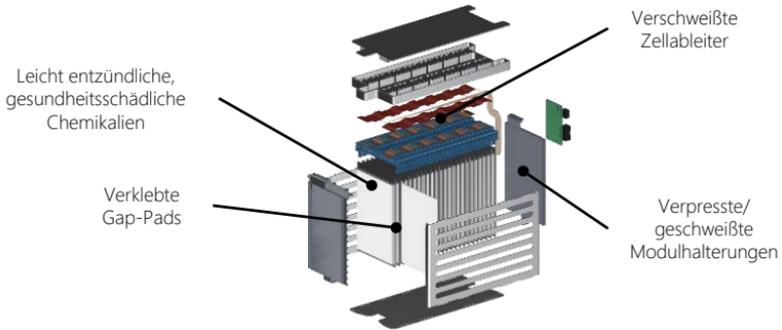
Herausforderungen

Demontage

Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

Recycling



- Die Demontage von LIB-Packs aus Elektrofahrzeugen ist aufgrund der großen **Designvielfalt** der Batteriepacks und der verwendeten Verbindungstechnologien ein **komplexer, zeit- und kostenintensiver Prozess**.
- Wegen der signifikanten Unterschiede des Batteriepackdesigns – abhängig von Hersteller und Fahrzeugmodell – werden **unterschiedliche Spezialwerkzeuge** und eine **hohe Flexibilität** im Demontageprozess benötigt.
- Die **Anforderungen** der Batteriezellproduzenten und die Anforderungen, die das Remanufacturing/Recycling stellt, unterscheiden sich stark voneinander.
- Um die Demontage zu vereinfachen, wird ein **neues Design** für das Batteriepack benötigt, bei dem die Komponenten mit lösbaren Verbindungen und guten Zugänglichkeiten montiert werden.
- Dadurch können der Remanufacturing- und der Recycling-Prozess unter kontrollierten Bedingungen effizienter gestaltet werden.
- Im Folgenden werden die **einzelnen Schritte des Demontageprozesses** genauer dargestellt.

Anforderungen der Batteriezellhersteller

- Hohe Sicherheit
 - Geringes Gewicht
 - Geringe Kosten
 - Geringer Platzbedarf
- bei der Auswahl der Kontaktierungs- und Verbindungskomponenten

Anforderungen für Remanufacturing/Recycling

- Vermeidung von schwerlöslchen Verbindungen innerhalb der Module zur zerstörungsfreien Demontage auf Zellebene
- Gute Zugänglichkeiten der Komponenten für eine schnelle Demontage

Öffnen des Gehäuses

Demontage

Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

Recycling



Manuelle Demontage des Batteriepacks aus dem Renault Fluence*

- Zu Beginn der Demontage wird das **Batteriepack entladen** und der Strom zwischengespeichert oder ins Netz eingespeist.
- Als Nächstes wird das **Gehäuse** des Batteriepacks **geöffnet**, indem beispielsweise der Deckel durch Lösen der Schrauben entlang des Deckelrands entfernt wird.
- Da sich die Dichtungsringe zwischen Batteriedeckel und Gehäuse je nach Batterietyp unterscheiden, müssen teils **hohe Kräfte zur Deckelentfernung** ausgeübt werden. Je nach Dichtungsmaterial wird die Dichtung beim Entfernen beschädigt.
- Im Inneren des Gehäuses befinden sich die Batteriemodule und weitere Komponenten wie das Kühlsystem und die Leistungselektronik.
- Die **Demontage dieser Komponenten** aus dem Batteriepack wird nun genauer betrachtet.

Spezialwerkzeuge

- Bei der Arbeit am HV-Batteriepack werden isolierte Werkzeuge und ESD-Arbeitsplätze eingesetzt, um das Risiko eines Stromschlags der Mitarbeiter zu vermeiden.

Fortgebildete Mitarbeiter

- Die Demontage wird durch speziell ausgebildete Mitarbeiter vorgenommen, da bei einer Anschlussspannung von 60 V DC gearbeitet wird (Arbeiten unter Spannung, Sensibilisierung für Batterierisiko – Elektrofachkraft).

Anlagen-/Personalbedarf

- Die Deckelentfernung erfolgt je nach Batteriegröße mit zwei Personen oder einem Kran.

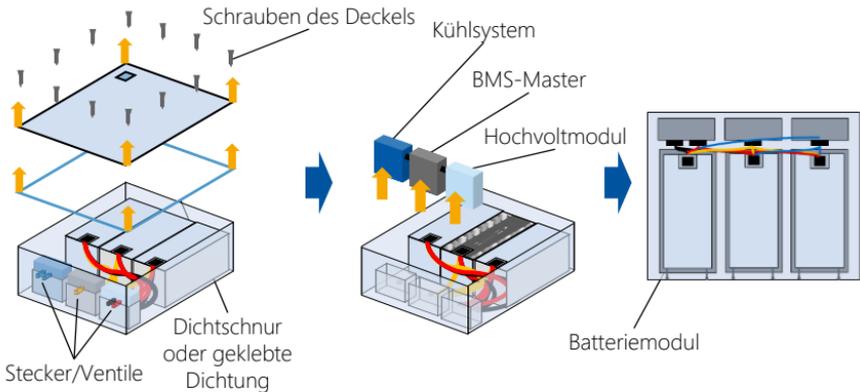
Demontage des Batteriepacks

Demontage

Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

Recycling



- Nach der Entfernung des Gehäusedeckels können die Batteriekomponenten aus dem **Batteriepack demontiert** werden. Dazu werden zuerst die Verkabelungen entfernt, danach das Kühlsystem und das Hochvoltmodul entnommen und anschließend die Batteriemodule ausgebaut.
- Die **Verkabelungen** des BMS-Masters mit dem Kühlsystem, der Module-Slave-Platine und dem Hochvoltmodul werden zuerst entnommen.
- Danach werden der HV- und der LV-Kabelbaum zur Verbindung der Module mit **Peripheriegeräten** entfernt.
- Anschließend wird das verschraubte, komplexe **Hochvoltmodul** mit einem isolierten Schraubwerkzeug ausgebaut.
- Um das **Kühlsystem** zu entnehmen, wird es zuerst von den Kühlelementen des Packgehäuses getrennt.
- Dazu sollte vorher bei flüssiggekühlten Batteriepacks das **Kühlmittel** mit einer Absauganlage aus dem System **entfernt** werden, um das Auslaufen des Kühlmittels und damit potenzielle **Kurzschlüsse zu verhindern**.
- Die metallischen Kühlplatten und die Kühlsystemkomponenten können aufgrund ihrer Zusammensetzung gut recycelt werden.
- Die **Batteriemodule** sind über Schraubverbindungen am Batteriepackgehäuse befestigt. **Zusätzliche Fixierung** durch Klebstoffe, Schäume oder Wachs werden von den Herstellern optional eingesetzt und lassen sich entsprechend **schwierig lösen**.
- Je nach Auslegung bestehen die Batteriepacks aus weniger als zehn bis 48 Modulen.

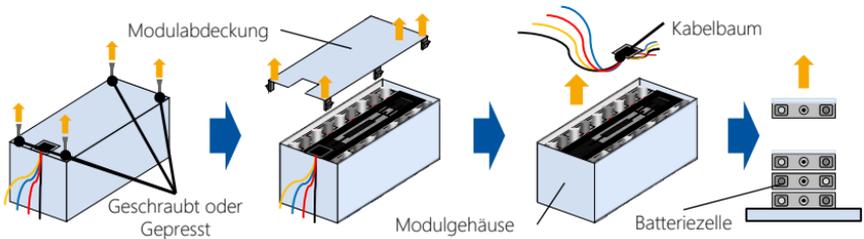
Demontage der Batteriemodule

Demontage

Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

Recycling



- Zur weiteren Demontage muss nun das **Batteriemodul geöffnet** werden, damit die Batteriezellen entnommen werden können.
- Die **Modulabdeckung** ist entweder verschraubt oder verpresst. Sie wird mit Hilfe isolierter Schrauben oder eines Kraft-/Druckeintrags entfernt.
- Das **Modulgehäuse** besteht je nach Batterieauslegung aus **unterschiedlichen Materialien** (z. B. Metalle oder Kunststoffe). Davon abhängig ist ebenfalls das Design des Gehäuses.
- Metallgehäuse bestehen aus einer tiefgezogenen Gehäusewanne und einem Deckel. Kunststoffgehäuse weisen üblicherweise eine Endplatte auf und werden mit den Batteriezellen verspannt.
- Nach dem Öffnen des Moduls können die **Zellkontaktierungen getrennt** werden, um die Zellen zu entnehmen. Aus Sicherheitsgründen werden die Zellkontaktierungen mit **Isoliermaterial** abgedeckt oder beklebt.
- Meistens lassen sich die Zellen im Modulgehäuse nicht ohne Beschädigung entfernen, da sie zur **thermischen und elektrischen Isolierung** verklebt werden.

Modul aus prismatischen Zellen

- Die Zellen werden mit Hilfe einer Bandage mit dem Gehäuse verspannt und danach verklebt.
- Die Zellkontaktierungen werden verschweißt und sind nicht zerstörungsfrei trennbar.

Modul aus Pouch-Zellen

- Die Zellen werden in einen Rahmen eingelegt, mittels Federn verspannt und danach verklebt.
- Die Zellkontaktierungen werden verschweißt und sind nicht zerstörungsfrei trennbar.

Modul aus zylindrischen Zellen

- Die Zellen werden mit Hilfe von Zellhaltern fixiert. Die entstehenden Räume zwischen den Batteriezellen werden zur Kühlung genutzt.
- Die Kontaktierung erfolgt jeweils mit einer Metallplatte pro Pol, die mit der Batteriezelle auf beiden Seiten verschweißt wird. Beim Trennen der Schweißverbindungen werden die Zellpole beschädigt.

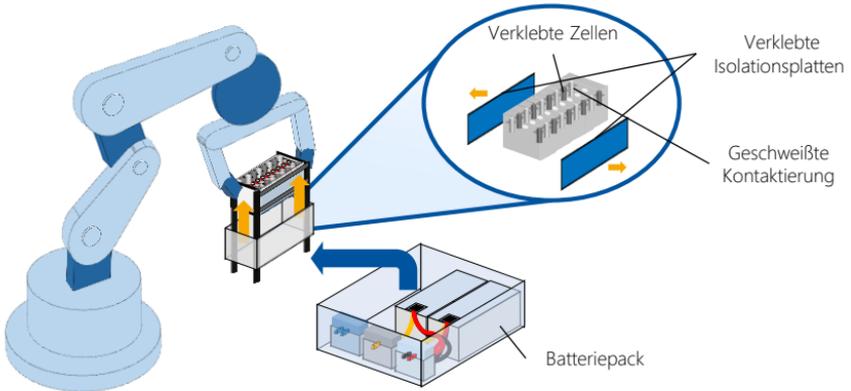
Automatisierung des Prozesses

Demontage

Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

Recycling



- Die Batteriedemontage stellt einen **elementaren Prozessschritt** sowohl zur Weiterverwendung als auch zur Entsorgung der Batterien dar.
- Aktuell werden in der Industrie vor dem Recycling nur wenige Komponenten manuell aus der Batterie entfernt.
- Um die Demontage industriell und wirtschaftlich umzusetzen, müssen die **Demontageprozesse teil-/automatisiert** werden.
- Aufgrund der vielen **verschiedenen Batteriedesigns** und des Einsatzes von **schwerlöslichen Verbindungen** gibt es bisher noch keinen geeigneten Prozess für die Demontage von LIB-Packs.
- Bisher werden partiell schon **teilautomatisierte Demontageschritte** durch Mensch-Roboter-Kollaborationen verwendet, da sie einfacher zu realisieren sind als eine vollautomatisierte Demontage.

Herausforderungen

- Eine vollständige Automatisierung des Demontageprozesses ist sehr komplex zu realisieren und daher sehr kostenintensiv.
- Aufgrund der mangelnden Prozess Erfahrung gibt es noch keine konkreten Lösungsvorschläge zur bspw. benötigten Sensorik und zu den Demontagewerkzeugen zum Lösen der Verbindungen.

Verbesserungsmöglichkeiten

- Mit einem neuen Design des Batteriepacks, das auch für Remanufacturing/Recycling entwickelt wird, kann der Prozess verbessert werden.
- Batteriepacks müssen auf einer möglichst breiten Basis standardisiert werden, damit eine vollautomatische Demontage wirtschaftlich vorteilhaft ist.
- Durch den Einsatz von KI sollen automatisierte Demontageprozesse erlernt und umgesetzt werden.

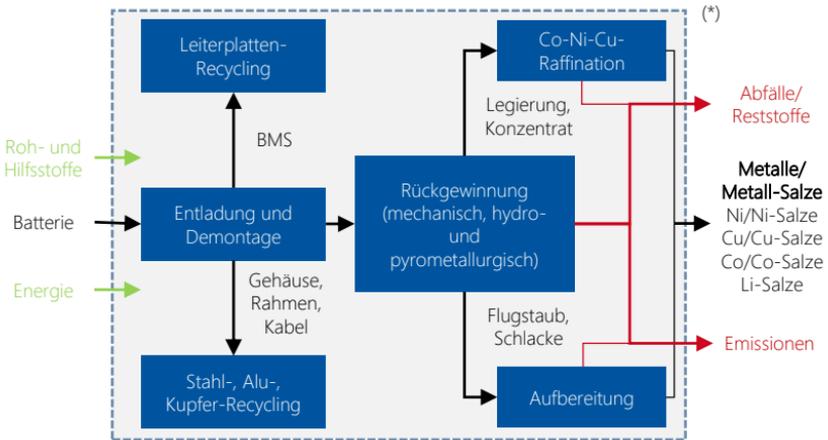
Systemgrenzen Batterie-Recycling

Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

Demontage

Recycling



- Der Recycling-Prozess von Li-Ionen-Batterien erfordert als Input-Strom Batterien sowie Roh-/Hilfsstoffe und Energie. Er erzeugt über mehrere Zwischenprozesse unterschiedliche Output-Ströme, insbesondere Wertstoffe (Metall-Salze), aber auch Emissionen sowie Abfälle/Reststoffe.
- Unterschiedliche Komponenten erfordern verschiedene Wege der Aufbereitung bzw. des Recyclings, die möglichst energieeffizient gewählt werden sollten.
- Die hohe Diversität der in Batterien verbauten Komponenten führt zu einer aufwendigen Prozessgestaltung, die sich aus konventionellen Prozessen des Recyclings sowie spezielleren Prozessen zur Sekundärrohstoffherzeugung zusammensetzt.
- Übergeordnetes Ziel aller Prozesse sind hohe Recycling-Quoten mit hochwertigen und nicht verunreinigten Output-Strömen.
- „Um die (in der Regel positiven) Umwelteffekte resultierender Rezyklate im Vergleich miteinander sowie mit vergleichbaren Primärmaterialien konsistent bestimmen zu können, sind die Recyclingprozesse über die erzielten Recyclingraten hinaus vorrangig gemäß ihrer Energie- und/oder ihrer CO₂-Intensität sowie gegebenenfalls nach anderen Umweltfaktoren zu bewerten und die Effekte dem Rezyklat zuzuordnen (Allokation).“ (*)
- Die Bewertung des LIB-Recyclings bedingt die holistische Betrachtung und Bilanzierung des angewandten Prozessraums.
- Die Bilanzierung der Prozesse erfordert genaue Kenntnisse der Zusammensetzung der Batterien sowie umfassende Lifecycle-Analysen zur ökonomischen und ökologischen Auslegung der Prozesse.

Hauptprozessschritte

Recycling

Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

Demontage

Recycling

Entladen



Batteriepack



Elektrische
Energie

Demontage



Batteriemodule



Gehäuse, BMS, Kabel,
Stromschienen,
Schrauben

Zell-
prozessierung



Batteriemodul/-
zelle



Aufgereinigte
Materialfraktio-
nen (z. B. Kupfer)

Hydro-
metallurgie



Aktivmaterialien



Co, Ni, Mn –
Sulfate (SO₄),
Li₂CO₃

- Der Recycling-Prozess von Li-Ionen-Batterien nach der Entladung und Demontage auf Modul-, Zell- oder Elektroden Ebene besteht aus mehreren Teilschritten, die jeweils unterschiedliche Produkte/Wertstoffe freisetzen.
- Die Prozessabfolge erfordert nach der Demontage eine Trennung der Kompositbauteile und -materialien, zum Beispiel durch mechanische Zerkleinerung oder durch thermische Prozesse.
- Die komplexe Zusammensetzung von Li-Ionen-Batterien erfordert eine Vielzahl von Prozessschritten, die für eine hohe Rückgewinnungsquote (>90 %) kombiniert werden müssen.

Herausforderungen

- Die Diversität der Bestandteile erfordert eine Vielzahl von Prozessschritten, die unterschiedlich kombiniert werden können.
- Ein effektives Recycling der Materialien mit einer Recycling-Quote von Lithium >90 % ist industriell noch nicht umgesetzt.
- Derzeitige industrielle Technologien gewinnen nicht alle Wertstoffe zurück.
- Zurückgewonnene Batteriematerialien sollen Qualitäten aufweisen, die zu einem Wiedereinsatz führen.

Verbesserungsmöglichkeiten

- Ansätze des *Design for Recycling* könnten die Komplexität verringern und die Prozessführung des Recyclings vereinfachen.
- Kombination von mechanischen, thermischen und hydrometallurgischen Prozessschritten zur Erhöhung der Gesamt-Recycling-Quote gegenüber schwerpunktmäßig pyrometallurgischen Prozessen
- Etablierung eines funktionalen, umweltfreundlichen und sichereren Prozesses

Prozessrouten

Recycling

Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

Demontage

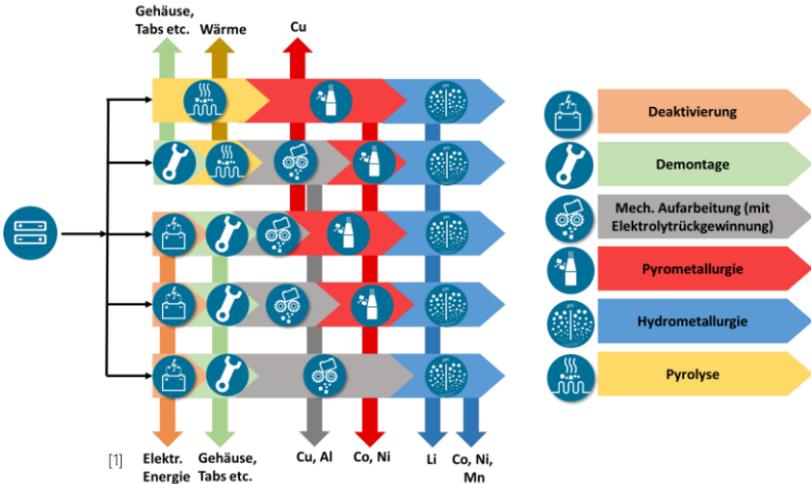
Recycling

Überblick

Mechanisch

Pyrometallurgie

Hydrometallurgie



- In der Industrie und in der Wissenschaft sind unterschiedliche Ansätze zum Recycling von Li-Ionen-Batterien umgesetzt worden: mechanische Behandlung, thermische Behandlung, Pyrometallurgie, Hydrometallurgie.
- Die Kombination der Recycling-Ansätze ermöglicht diverse Prozessrouten, die unterschiedlich effektiv sind und je nach Schwerpunkt der Materialrückgewinnung (z. B. Nickel vs. Lithium) Vor- und Nachteile aufweisen.
- Die Recycling-Quoten für die einzelnen zurückgewonnenen Wertstoffe wird maßgeblich durch die gewählte Kombination der Prozessschritte bestimmt.

Herausforderungen

- Kombinate der Prozessschritte erfordern genaue Prozesskenntnis.
- Diversität von Batteriepacks und Materialien erfordert robuste und variable Prozesse.
- Gefahren durch elektrische, chemische und thermische Fehlerfälle müssen entgegengewirkt werden.
- Materialverluste in den Prozessen und durch Transport zwischen diesen müssen verhindert werden.
- Die Materialien müssen möglichst in „Battery Grade“ zurückgewonnen werden.

Verbesserungsmöglichkeiten

- In verschiedenen Demontageprozessen können schadstoffhaltige Bauteile frühzeitig entfernt und nicht dem nachfolgenden Recycling-Prozess zugeführt werden.
- Minimierung des Energieeinsatzes
- Graphit-, Elektrolyt- und Leitsalzurückgewinnung
- Automatisierung im Bereich der Übergabe in andere Prozesse
- Robustheit von Prozessen gegenüber Verunreinigungen

Mechanisches Recycling

Recycling

Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

Demontage

Recycling

Überblick

Mechanisch

Pyrometallurgie

Hydrometallurgie



- Mechanisches Zerkleinern (Shreddern) von Batteriezellen und -modulen, ggf. kleinen Packs (Ausnahme: direkte Zuführung zur Pyrometallurgie)
- Freisetzung der Wertstoffe in Form von Shreddergut, das alle werthaltigen Stoffe enthält
- Sicherheitsrisiken durch Elektrolytreste, die vor den folgenden Prozessschritten durch Trocknung oder Pyrolyse entfernt werden sollten und mitunter für eine neue Nutzung zur Verfügung stehen können
- Mechanische Trennung von „Schwarzmasse“ (z. B. Co, Ni, Mn, C), Stromableiterfolien und Separatorteilen durch Kombination von Zerkleinerungs-, Trocknungs- sowie Sortier- und Klassierprozessen
- Weitere Verarbeitung der Wertstoffe in metallurgischen und chemischen Prozessen

Herausforderungen

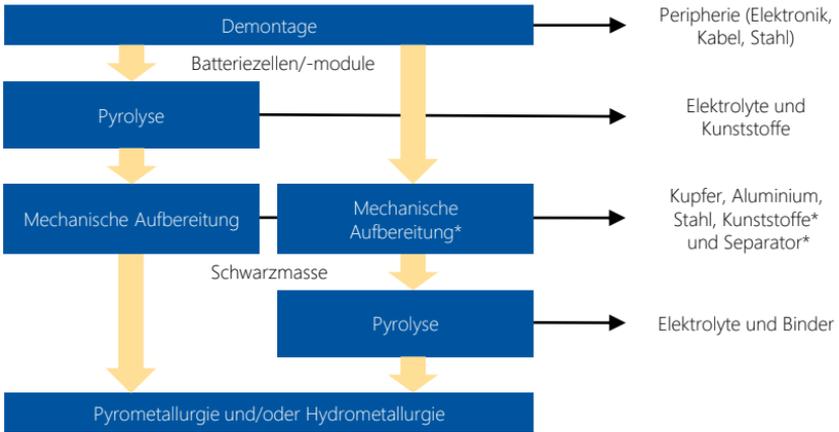
- Die sortenreine Trennung der Materialien erfordert einen hohen prozesstechnischen Aufwand.
- Nur entladene Zellen können dem Prozess zugeführt werden.
- Entfernung der Elektrolytkomponenten ist sehr herausfordernd, da Bestandteile der Lösemittel stark unterschiedliche Siedepunkte besitzen.

Verbesserungsmöglichkeiten

- Integration thermischer Schritte zur vollständigen Entfernung der Elektrolytkomponenten, zur Darstellung hoher Sicherheit.
- Sortenreine Trennung zur Verbesserung der weiteren Verarbeitung in hydrometallurgischen Schritten.
- Minimierung des Gefahrenpotenzials durch elektrische, thermische und mechanische Einwirkung.

Pyrolyse

Recycling



- Im Vorfeld der mechanischen Aufarbeitung kann eine Zelldeaktivierung bzw. eine Behandlung der Schwarzmasse während des mechanischen Recyclings mittels Pyrolyse vorgenommen werden.
- Zellen werden im Vakuum bei bis zu 400 °C deaktiviert, wobei flüchtige Elektrolytkomponenten sowie Binder und polymere Bestandteile entfernt werden können.
- Schwarzmasse kann zudem auch nach der Abtrennung vom Zerkleinerungsgut mit bis zu 700 °C pyrolysiert werden, um Elektrolytkomponenten sowie Binder und polymere Bestandteile zu entfernen.
- Die Entfernung, insbesondere von fluorhaltigen Komponenten, während der Pyrolyse beeinflusst die hydrometallurgische Aufarbeitung positiv.

Herausforderungen

- Entfernung von fluorhaltigem Leitsalz aus den Batteriezellen bzw. der schwarzen Masse
- Durchführung der Pyrolyse mit Vermeidung von oxidierenden Reaktionen
- Rückgewinnung von Anodenaktivmaterial zur erneuten Nutzung in der Batterieanwendung

Verbesserungsmöglichkeiten

- Integration von Elektrolytrückgewinnung bei thermischer Prozessführung
- Vermeidung von HF-Bildung aus fluorhaltigen Stoffen
- Minimierung von Energieaufwand bei der Pyrolyse zur Verringerung des ökologischen Fußabdrucks

Pyrometallurgie

Recycling

Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

Demontage

Recycling

Überblick

Mechanisch

Pyrometallurgie

Hydrometallurgie



- Pyrometallurgische Prozesse können direkt mit Batteriemodulen oder im Anschluss an mechanische Schritte durchgeführt werden.
- Anwendung von Hochtemperaturprozessen ermöglicht Erzeugung von Legierungen und Schlacke, die hauptsächlich die Wertstoffe Kupfer, Kobalt und Nickel sowie Lithium beinhalten.
- Verlust von Mangan und Aluminium durch hohe Temperaturen
- Fluoride, die in der weiteren Aufarbeitung Herausforderungen stellen, können durch hohe Temperaturen entfernt werden.
- Ökonomische Effizienz bei hohen Anteilen von Wertstoffen gegeben
- Hohe Robustheit gegenüber Verunreinigungen

Herausforderungen

- Rückgewinnung von Wertstoffen, die in derzeitigen Prozessen pyrolysiert werden (Mangan, Aluminium, Polymere)
- Energieeffizienz nur bei hohem Durchsatz gegeben
- Rückgewinnung von Elektrolyt bisher nicht vorgesehen ohne mechanische Prozessierung, die einen Schritt zur Elektrolytrückgewinnung vorsieht

Verbesserungsmöglichkeiten

- Kombination mit mechanischen Prozessen
- Entfernung von nicht rückgewinnbaren Wertstoffen im Vorfeld der thermischen Anwendung durch weitere Prozessschritte
- Integration von Elektrolytrückgewinnung zur Erhöhung der Gesamtrecycling-Quote
- Energieaufwendige Prozessschritte sollten für eine Verbesserung der Ökobilanz auf ein Minimum reduziert werden.

Hydrometallurgie

Recycling

Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

Demontage

Recycling

Überblick

Mechanisch

Pyrometallurgie

Hydrometallurgie



Schwarzmasse

- Aktivmaterialien in Schwarzmasse
- Kreuzkontamination mit Al, Fe, Cu möglich



Säureaufschluss

- Lösen von Metallkomponenten
- Aggressive Basen und Säuren notwendig



Feststoffseparation

- Metallsalz-Lösung der Aktivmaterialien
- Abtrennung übrigiger Feststoffe



Präzipitation

- Ausfällen der Übergangsmetalle
- Li weiterhin in Lösung (LiOH , Li_2CO_3)

- Die Hydrometallurgie schließt sich der mechanischen bzw. pyrometallurgischen Aufbereitung an.
- Rückgewinnung von reinen Nichteisen-Metallen aus Aktivmaterialien
- Aufbereitetes Aktivmaterial (Schwarzmasse) wird mittels Säureaufschluss gelöst. Nicht gelöste Feststoffe können entfernt werden.
- Die Übergangsmetalle (Nickel, Mangan, Kobalt) werden spezifisch als Salz ausgefällt und für die Resynthese zugänglich gemacht.
- Verwendete chemische Prozesse sind Auslaugen/Extraktion, Kristallisation, Ausfällung.

Herausforderungen

- Der Einfluss der Verunreinigung des Ausgangsmaterials auf die hydrometallurgische Aufbereitung und erzielbare Materialausbeuten ist nicht ausreichend bekannt.
- Kreuzkontaminationen können die Qualität und Ausbeute des erhaltenen rückgewonnenen Materials beeinflussen und die Effizienz der Kreislaufführung einschränken.
- Scale-up der bekannten Prozesse zur Rückgewinnung von „Battery Grade“-Rohstoffen auf industrie-relevante Größe (LiOH , Li_2CO_3 , Übergangsmetallsulfate)

Verbesserungsmöglichkeiten

- Vermeidung von Kreuzkontamination durch vorgeschaltete Abtrennprozesse muss gewährleistet werden.
- Steigerung der Robustheit der hydrometallurgischen Prozesse gegenüber Verunreinigungen
- Entfernung von Fluorid-Ionen über vorgeschaltete Prozessschritte
- Keine vollständige stoffliche Trennung
- Rückgewinnung von Graphit

Prozesskombinationen

Recycling

Grundlagen

Umgang mit EoL-Bat

Demontage

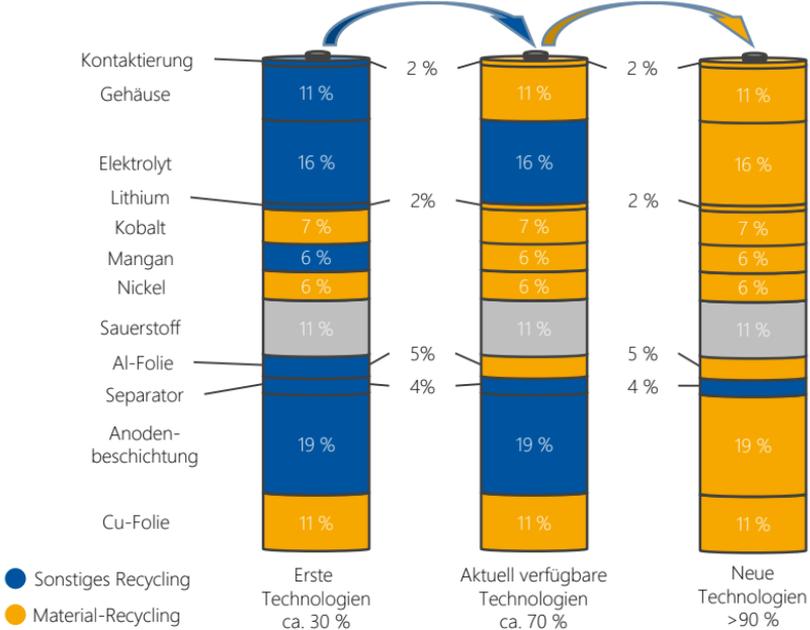
Recycling

Überblick

Mechanisch

Hydrometallurgie

Pyrometallurgie



- Die Kombination von Prozesstechnologien kann perspektivisch die Gesamtrückgewinnungsquote (ohne O₂) auf >90 % erhöhen.
- Aktuelle verfügbare Technologien können ca. 70 % der Wertstoffe für den Stoffkreislauf zurückgewinnen.
- Rein pyrometallurgische Prozesse führen ca. 30 % der Wertstoffe in den Kreislauf zurück, dafür Ni, Co und Cu aber mit sehr hoher Ausbeute.
- Verknüpfung der Technologien erhöht die Quote der rückgewinnbaren Wertstoffe, jedoch auch die Komplexität des Prozesses.

Herausforderungen

- Die Verknüpfung erfordert anlagentechnisch einen großen Aufwand.
- Verunreinigungen müssten möglichst früh im Prozess entfernt werden, da der Einfluss nicht ausreichend geklärt ist.
- Die Kostenstruktur muss Wirtschaftlichkeit garantieren.

Perspektive

- Die Materialkreislaufführung ist für die EU mit geringem Ressourcenvorkommen für die Wettbewerbsfähigkeit essenziell.
- Prozesskombination(en) müssen stets eine hohe Gesamtrückgewinnungsquote (mind. 70 %) mit vertretbarer CO₂-Emission und gleichzeitig hoher Quote für Ni, Cu und Co (>95 %) gewährleisten.



Der Lehrstuhl „Production Engineering of E-Mobility Components“ (PEM) der RWTH Aachen ist seit vielen Jahren im Themenfeld der Produktion der Lithium-Ionen-Batterietechnologie aktiv. Das Tätigkeitsfeld erstreckt sich sowohl über Automotive- als auch über stationäre Anwendungen. Durch eine Vielzahl nationaler und internationaler Industrieprojekte in Unternehmen aller Wertschöpfungsstufen sowie zentralen Positionen in renommierten Forschungsprojekten bietet das PEM weitreichende Expertise.

Die BLB ist ein Forschungszentrum der TU Braunschweig und bildet eine transdisziplinäre Forschungsplattform für die Entwicklung der zirkulären Produktion sowie von Diagnose- und Simulationsmethoden aktueller Lithium-Ionen-Batterien und künftiger Technologien wie Festkörperbatterien und Lithium-Schwefel-Batterien. Die BLB vereint 13 Professuren von drei Universitäten (Braunschweig, Clausthal, Hannover) sowie Batterie-fachleute der PTB und führt die notwendigen Kompetenzen entlang der Wertschöpfungskette für elektrochemische Batteriespeicher in Niedersachsen zusammen.



PEM

Chair of Production Engineering of E-Mobility Components
Bohr 12
52072 Aachen

www.pem.rwth-aachen.de

Battery LabFactory Braunschweig

Technische Universität Braunschweig
Langer Kamp 19
38106 Braunschweig

www.tu-braunschweig.de/blb

Autoren

PEM der RWTH Aachen



Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Heiner Hans Heimes
Geschäftsführender Oberingenieur
H.Heimes@pem.rwth-aachen.de



Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker M.B.A.
Gründer/Leiter des Lehrstuhls
A.Kampker@pem.rwth-aachen.de



Christian Offermanns, M. Sc.
Oberingenieur
C.Offermanns@pem.rwth-aachen.de



Kim D. Kreisköther, M. Sc.
Gruppenleiterin
Battery Components & Recycling
Kim.Kreiskoether@pem.rwth-aachen.de

Battery LabFactory Braunschweig



Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade
Sprecher Battery LabFactory
Leiter Institut für Partikeltechnik
A.Kwade@tu-braunschweig.de



Stefan Doose, M. Sc.
Stellver. Gruppenleiter Batterie-
verfahrenstechnik
Institut für Partikeltechnik
S.Doose@tu-braunschweig.de



Marco Ahuis, M. Sc.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Institut für Partikeltechnik
M.Ahuis@tu-braunschweig.de



Dr. Peter Michalowski
Gruppenleiter Batterieverfahrenstechnik
Institut für Partikeltechnik
P.Michalowski@tu-braunschweig.de



Batterieproduktion

Der VDMA vertritt mehr als 3.300 Unternehmen des deutschen und europäischen Maschinen- und Anlagenbaus. Die Fachabteilung Batterieproduktion thematisiert die Produktionstechnik von Batterien. Mitgliedsunternehmen liefern Maschinen und Anlagen, Maschinenkomponenten, Werkzeuge und Dienstleistungen in der gesamten Prozesskette der Batterieherstellung: von der Rohstoffaufbereitung über die Elektrodenproduktion und Zelleassemblierung bis hin zur Modul- und Packfertigung.



VDMA
Batterieproduktion
Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt am Main

www.vdma.org/batterieproduktion



Abfall- und Recyclingtechnik

Der VDMA-Fachverband Abfall- und Recyclingtechnik vertritt nahezu alle deutschen und europäischen Hersteller von Abfall- und Recyclingtechnik. Im Fachverband sind sowohl Hersteller von Komplettanlagen als auch der einzelnen Komponenten vertreten. Die mittel-ständisch geprägte Branche verfügt über tiefgreifende Expertise im Bereich der Aufbereitung und des Recyclings von Sekundärmaterialien.



VDMA
Abfall- und Recyclingtechnik
Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt am Main

www.vdma.org/abfalltechnik-recyclingtechnik

Autoren

VDMA



Dr. Sarah Michaelis
Battery Production, Division Manager
Sarah.Michaelis@vdma.org



Ehsan Rahimzei
Battery Production, Project Manager
Ehsan.Rahimzei@vdma.org



Dr. Sarah Brückner
Geschäftsführerin Fachverband Abfall- und Recyclingtechnik
Sarah.Brueckner@vdma.org



Karl Rottnick
Referent Fachverband Abfall- und Recyclingtechnik
Karl.Rottnick@vdma.org



Haben Sie Fragen?

Sprechen Sie uns an!



Frankfurt am Main, Juni 2021
PEM RWTH Aachen University,
BLB TU Braunschweig und VDMA
(Eigendruck), 1. Auflage
ISBN: 978-3-947920-11-2