



Kostenfreies Exemplar:
info@pem.rwth-aachen.de



RECYCLING VON LITHIUM-IONEN- BATTERIEN

2. Auflage, 2023



Abfall- und
Recyclingtechnik

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 Battery LabFactory (BLB) ist ein Forschungszentrum der TU Braunschweig und bildet eine Plattform 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 18 Professuren von drei Universitäten sowie weitere Batterie-fachleute und führt die Kompetenzen entlang der Wertschöpfungskette für elektrochemische Batteriespeicher zusammen.



PEM RWTH Aachen University
 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

Autorin & Autoren

PEM der RWTH Aachen



Prof. Dr.-Ing. Heiner Hans Heimes
 Mitglied der Institutsleitung
h.heimes@pem.rwth-aachen.de



Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker
 Gründer und Leiter des Lehrstuhls
a.kampker@pem.rwth-aachen.de



Dr.-Ing. Christian Offermanns
 Oberingenieur
c.offermanns@pem.rwth-aachen.de



Domenic Klohs, M. Sc.
 Battery Components & Recycling
d.klohs@pem.rwth-aachen.de



Natalia Soldan, M. Sc.
 Battery Components & Recycling
n.soldan@pem.rwth-aachen.de



Timon Elliger, M. Sc.
 Battery Components & Recycling
t.elliger@pem.rwth-aachen.de

Battery LabFactory Braunschweig



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



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

Der VDMA vertritt mehr als 3.700 deutsche und europäische Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus. Die dortige Fachabteilung Batterieproduktion fungiert als Ansprechpartner für sämtliche Fragen rund um den Batterie-Maschinen- und Anlagenbau. Dafür recherchiert sie Technologie- und Marktinformationen, veranstaltet Kunden-Events und Roadshows, bietet Plattformen für den Austausch innerhalb der Branche und steht im fortwährenden Dialog mit Forschung und Wissenschaft.



VDMA

Batterieproduktion

Lyoner Straße 18

60528 Frankfurt am Main

www.vdma.org/batterieproduktion

Der VDMA-Fachverband Abfall- und Recyclingtechnik vertritt die Interessen von mehr als 100 Mitgliedsunternehmen auf nationaler und europäischer Ebene. Zu seinen Aufgaben zählt außerdem eine weltweit ausgerichtete Messepolitik. Als Plattform für informelle Begegnungen treibt der Fachverband Entwicklungen durch technische und marketingorientierte Arbeitskreise voran, vor allem in den Bereichen der Recycling- und der Aufbereitungstechnik sowie auf dem Feld der biologischen, mechanischen und thermischen Verfahren.



VDMA

Abfall- und Recyclingtechnik

Lyoner Straße 18

60528 Frankfurt am Main

www.vdma.org/abfalltechnik-recyclingtechnik

Autorin & Autor

VDMA Batterieproduktion



Dr. Sarah Michaelis

Leiterin
Batterieproduktion

Sarah.Michaelis@vdma.org

VDMA Abfall- und Recyclingtechnik



Karl Rottnick

Referent Fachverband Abfall- und
Recyclingtechnik

Karl.Rottnick@vdma.org



Haben Sie Fragen?

Sprechen Sie uns an!



Frankfurt am Main, Dezember 2023
PEM RWTH Aachen University,
BLB TU Braunschweig und VDMA
(Eigendruck), 2. Auflage
ISBN: 978-3-947920-43-3

Marktentwicklung

Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (LIB)

- Die **Menge der Lithium-Ionen-Batterien (LIB)** am „End of Life“ (EoL) **steigt in den kommenden Jahren** aufgrund des wachsenden Anteils von Elektrofahrzeugen stark an, weshalb 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 Wertschöpfungskette mit diesem Thema auseinandersetzen – von der Materialsynthese über die Batteriezell-, Batteriemodul- und Batteriepackproduktion bis hin zur Nutzungsphase und zum Recycling.
- **Recycling-Quoten** einzelner Materialien (bis zu 95 Prozent) werden dabei sowohl von der CEID (Circular Economy Initiative Deutschland, acatech)* vorgeschlagen als auch von der EU in ihrer Batterieverordnung vorgesehen.

Inhaltsverzeichnis

Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (LIB)

1. Grundlagen des Batterie-Recyclings

- „End of Life“-Strategien für LIB
- Materialzusammensetzung von Batteriesystemen
- Kathodenzusammensetzung
- Anodenzusammensetzung
- Gesetzliche Rahmenbedingungen

2. Übersicht Batterie-Recycling

3. Vorbereitung

4. Mechanische Verfahren

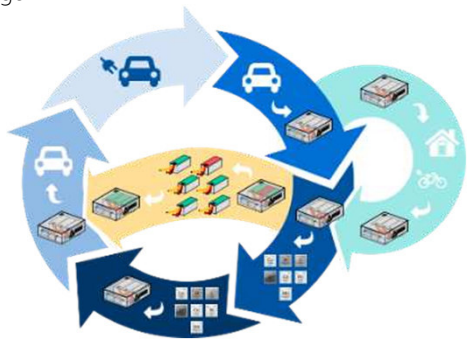
5. Thermische Verfahren

6. Pyrometallurgie

7. Hydrometallurgie

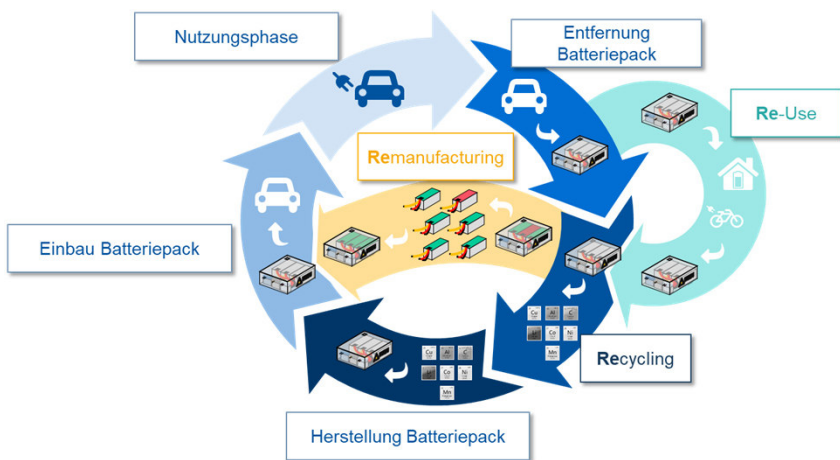
8. Sonderformen des Recyclings

- „Production Scrap“-Recycling
- Direct Recycling



„End of Life“-Strategien für LIB

Grundlagen des Batterie-Recyclings



Erläuterungen

- Nach der Nutzungsphase der Batterie wird das Batteriepack aus dem Fahrzeug entfernt. Je nach Zustand der Batterie kommen unterschiedliche „End of Life“-Strategien infrage.
- Die Hauptziele der Kreislaufwirtschaft liegen in der unbegrenzten Wiederverwendung von Materialien durch das Schließen des Produktlebenszyklus und der damit einhergehenden **minimierten Abfallentsorgung**, **Schadstoffentfrachtung** sowie in der **Reduzierung der Abhängigkeit** von wichtigen Primärmaterialien.
- Der klassische Wertschöpfungskreis kann durch **Re-Use (Zweitverwendung)** und **Remanufacturing** erweitert werden. Die für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft relevanten Begriffe „Re-Use“, „Remanufacturing“ und „Recycling“ lassen sich als „**Re-X**“ zusammenfassen.
- Da zwölf Prozent der gesamten **Treibhausgasemissionen** Europas von Elektrofahrzeug-Batterien im EoL-Status verursacht werden, gilt dieser Produktlebensphase eine besondere Aufmerksamkeit.
- Im Folgenden wird daher der **Umgang mit EoL-Batterien mittels Recycling** erläutert.

Re-Use

Lithium-Ionen-Batterien, die am Ende ihrer Lebensdauer in batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) noch über ausreichende Eigenschaften (Restladekapazität, Sicherheit, Innenwiderstand) verfügen, können beispielsweise noch in stationären Energiespeichern eingesetzt werden.

Remanufacturing

Remanufacturing ermöglicht die Wiederverwendung von Akkus im BEV durch die Aufbereitung von Altbatterien, indem beschädigte Komponenten ausgetauscht oder ersetzt werden.

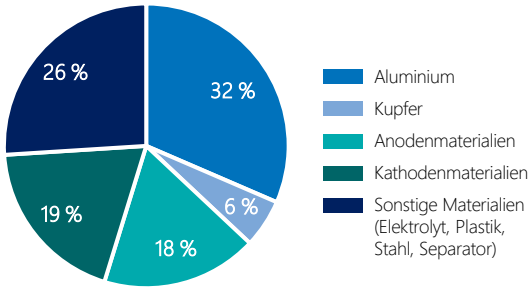
Recycling

Recycling ist erforderlich, um durch einen sicheren Prozess Rohstoffe aus Batterien zurückzugewinnen und in den Batterieproduktionsprozess zurückzuführen.

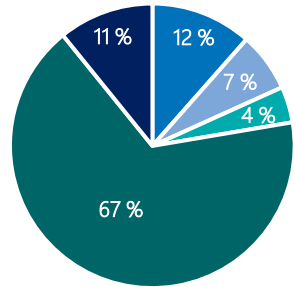
Materialzusammensetzung

Grundlagen des Batterie-Recyclings

Gewichtsverteilung (Systemebene)¹



Wertverteilung (Systemebene)^{1,2}



¹ Basierend auf einer NMC622-Kathodenchemie

² Basierend auf Materialpreisen im Jahr 2023

Erläuterungen

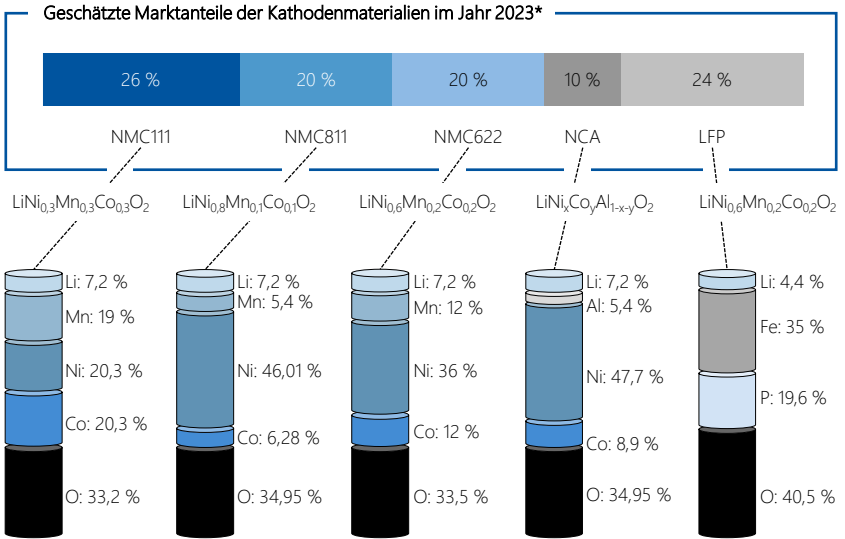
- Die **Hauptkomponenten** eines Batteriesystems sind Aluminium, Kupfer, Anodenmaterial, Kathodenmaterial und sonstige Bestandteile (Elektrolyt, Plastik, Stahl, Separator etc.).
- Aluminium** wird neben dem Einsatz als Stromabnehmer in der Kathode hauptsächlich für die Gehäuse der Zellen, der Module und des Packs verwendet. Als Anodenmaterial kommt in mehr als 90 Prozent der Zellen Graphit zum Einsatz. Die Zusammensetzung des Kathodenmaterials variiert stark (siehe nächste Seite) – meist sind jedoch Lithium, Nickel, Kobalt und Mangan enthalten.
- Während die **Kathodenmaterialien** nur knapp 20 Prozent des Materialgewichts ausmachen, sind sie – bei NMC-Kathoden – für **knapp 70 Prozent des Materialwerts** verantwortlich. Aus diesem Grund konzentriert sich das Recycling von Batterien vor allem auf die Rückgewinnung der Kathodenmaterialien.
- Die **Preise der einzelnen Batteriematerialien** sind seit einigen Jahren starken Preisschwankungen unterworfen. Dies ist eine Herausforderung für die Planbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Recycling-Anlagen.
- Da der **Lithium-Preis** lange Zeit deutlich unter dem Preis von Nickel und Kobalt lag, konzentrierte sich das Recycling vor allem auf diese beiden Elemente der Kathode und auf einfach zurückzugewinnende Materialien der Gehäuse, etwa Stahl und Aluminium.
- Die im Jahr 2023 in Kraft getretene **EU-Batterieverordnung** schreibt Mindest-Recycling-Anteile pro Material vor, so dass ab 2027 Lithium, Nickel, Kobalt und Kupfer recycelt werden müssen.

Zentrale Erkenntnisse

- Um wirtschaftlich tragbare Prozesse zu ermöglichen, konzentriert sich das Recycling heute auf die wertvollsten Stoffe in Batterien – in der Regel die Materialien der Kathode. Dies wird zusätzlich politisch forciert, was an der neuen EU-Batterieverordnung deutlich wird. Darüber hinaus vermindert das Recycling dieser Rohstoffe die Abhängigkeit von Förderländern.
- Die Materialien der Lithium-Eisenphosphat (LFP)-Zellchemie sind preiswerter und stellen deshalb eine Herausforderung für die Wirtschaftlichkeit des Batterie-Recyclings dar.

Kathodenzusammensetzung

Grundlagen des Batterie-Recyclings



Erläuterungen

- In der obenstehenden Grafik sind die **Massenanteile** der im Jahr 2023 fünf wichtigsten **Kathoden-Aktivmaterialien** dargestellt, die sich aus den Elementen Lithium, Mangan, Kobalt, Nickel, Aluminium, Eisen und Phosphat zusammensetzen.
- Der Anteil **hochnickelhaltiger Kathodenmaterialien** (NMC622 und NMC811) hat in den vergangenen Jahren gegenüber NMC111 stark zugenommen.
- **LFP** nimmt vor allem in China eine bedeutende Rolle ein, gewinnt aber auch in anderen Märkten an Bedeutung. Darüber hinaus existiert die Variante LFMP, in die niedrige Mangan-Anteile integriert sind, wodurch die Energiedichte des Zellmaterials steigt.
- **NCA** wurde lange Zeit von Tesla bevorzugt, verliert als Kathodenmaterial jedoch immer mehr an Bedeutung. Wegen der verzögerten Wirkung auf das Recycling muss das Material aber noch einige Jahre lang mitbetrachtet werden.
- Die stark schwankenden Rohstoffpreise und die begrenzten Förderkapazitäten der benötigten Elemente sorgen für das **Streben der Batteriezellhersteller nach Rohstoffsicherheit**, die sich unter anderem durch das Recycling ausgedienter Batteriesysteme erreichen lässt.
- Diese Schwankungen entstehen auch aufgrund der langen Lieferketten, da die Rohstoffvorkommen auf bestimmte Länder begrenzt sind.

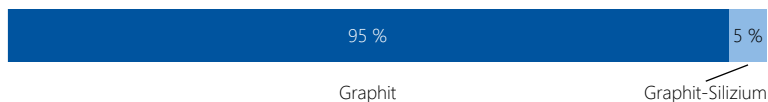
Zentrale Erkenntnisse

- Derzeit gibt es eine starke Marktkonzentration auf NMC-Kathodenmaterialien, die durch kostenintensive Materialien gut für wirtschaftliche Recycling-Prozesse geeignet sind.
- LFP wird durch eine hohe Lebensdauer und niedrige Materialpreise bedeutsam, die für das Recycling eine wirtschaftliche Herausforderung bedeuten können.
- Die Tendenz zu hohen Nickelanteilen scheint sich in den nächsten Jahren fortzusetzen.

Anodenzusammensetzung

Grundlagen des Batterie-Recyclings

Geschätzte Marktanteile der Anodenmaterialien im Jahr 2023*



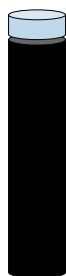
Graphit



C: 100 %

C_6

Graphit-Silizium

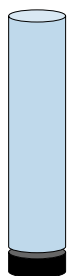


Si: < 11 %

C: > 89 %

C_6Si_x

Graphit-Silizium



Si: < 90 %

C: > 10 %

C_6Si_x

Lithium



Li: 100 %

Li

Erläuterungen

- In der obenstehenden Grafik sind die **Massenanteile** der im Jahr 2023 vier wichtigsten **Anoden-Aktivmaterialien** dargestellt. Graphit und Graphit-Silizium dominieren den Markt. Silizium- und Lithium-Anoden werden derzeit nicht großindustriell produziert und gelten eher als Alternativen in der Zukunft.
- **Silizium** wird Graphit-Anoden beigemischt, um die Energiedichte zu erhöhen. Derzeit sind dabei Anteile von **unter elf Prozent** möglich. Im Massenmarkt ist diese Anodenzusammensetzung jedoch noch nicht angekommen. Theoretisch sind auch Anoden mit deutlich höheren Silizium-Anteilen denkbar, die dann eine noch höhere Energiedichte aufweisen würden. Die größte Herausforderung bei ihrer Implementierung liegt derzeit darin, dass die Anode beim Lade- und Entladevorgang ihr Volumen stark verändert – um bis zu 300 Prozent. Das geht oftmals mit einer äußerst kurzen Lebensdauer der Batteriezelle einher. Aktuell existieren einige Unternehmen mit vielversprechenden Ansätzen, die dieser Herausforderung begegnen, so dass Anoden mit hohen Silizium-Anteilen und einer Kohlenstoffmatrix in einigen Jahren realistisch erscheinen.
- **Reine Lithium-Metall-Anoden** ermöglichen theoretisch eine noch höhere Energiedichte als Silizium- und Graphit-Anoden. Ihre größte Herausforderung besteht derzeit darin, dass sie in Kombination mit flüssigen Elektrolyten nicht stabil sind. Mit der Implementierung von Festkörperbatterien („Solid-State Batteries“ – SSB) könnte eine Anoden-Revolution einhergehen, wobei der Trend sich auch zu lithium-freien Anoden hin entwickelt. Nachteilig ist bei Lithium-Anoden zudem, dass der Ausgangsstoff kostspielig und knapp ist.

Zentrale Erkenntnisse

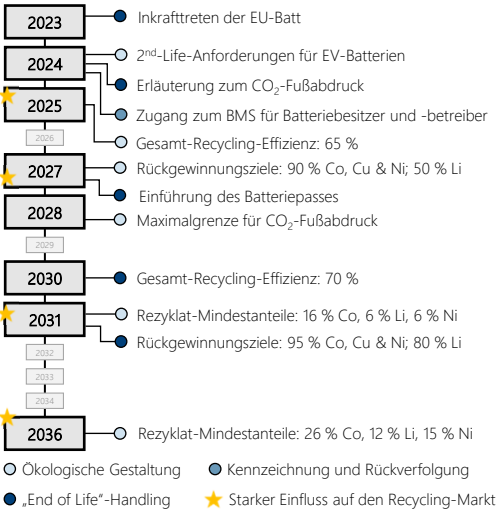
- Graphit dominiert als Anodenmaterial derzeit den Markt und dürfte auch im kommenden Jahrzehnt nicht abgelöst werden.
- Es existieren vielversprechende Alternativen, die die Energiedichte und die Leistung von Batterien in Zukunft maßgeblich steigern können.

Gesetzliche Rahmenbedingungen

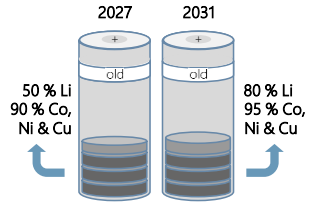
Grundlagen des Batterie-Recyclings



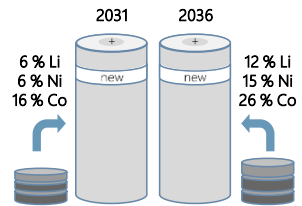
Hauptauswirkungen der europäischen Batterieverordnung



Material-Rückgewinnungsquoten



Mindest-Rezyklatanteile



Erläuterungen

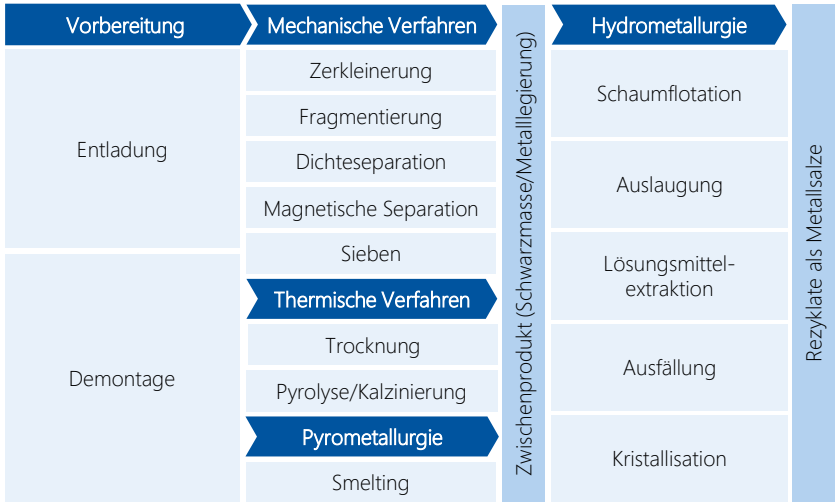
- Zur Erreichung der klimapolitischen Ziele mit Blick auf die überproportional wachsende Elektrifizierung muss Nachhaltigkeit in Form von Mindestanforderungen gewährleistet sein. Dabei ist der **gesamte Lebensweg der Batterien** zu berücksichtigen.
- Die 2023 von der Europäischen Kommission verabschiedete **Batterieverordnung** ersetzt das deutsche Batteriegesetz 2006/66/EG. Sie stellt die Nachhaltigkeit sowie die Wettbewerbsfähigkeit der Batterieproduktion in Europa sicher.
- Kernpunkte sind **die Sammlung der EoL-Batterien**, Einführung des **Batteriepasses**, Maximalgrenzen für den **CO₂-Fußabdruck**, **Gesamt-Recycling-Effizienz**, **Rückgewinnungsziele** und **Rezyklat-Mindestanteile**.
- Ab 2025 wird eine Gesamt-Recycling-Effizienz von 65 Prozent gefordert, die 2030 auf 70 Prozent steigt. Ab 2027 müssen alle Recycling-Verfahren eine stoffliche Verwertung von 50 Prozent Lithium, 90 Prozent Kobalt sowie jeweils 90 Prozent Nickel und Kupfer erreichen. Bis 2031 steigt die Anforderung der Rückgewinnungsquote. Dabei entfällt eine 80-Prozent-Rate auf Lithium, während Kupfer, Nickel und Kobalt jeweils eine Verwertungsrate von 95 Prozent erreichen müssen.
- Für die Zeit ab 2031 wird außerdem gefordert, dass neu produzierte LIB einen **Rezyklat-Mindestanteil** in Form von 16 Prozent Kobalt, sechs Prozent Lithium sowie sechs Prozent Nickel beinhalten und dies in beigelegten technischen Unterlagen dokumentiert ist. Im Jahr 2036 soll der Mindestanteil dieser Rohstoffe erneut erhöht werden. Dabei soll in neuen LIB ein Rezyklatanteil von 26 Prozent Kobalt, 15 Prozent Nickel und zwölf Prozent Lithium enthalten sein.

Zentrale Erkenntnisse

- Die hohen Anforderungen an die Rückgewinnung von Materialien und den Einsatz von Rezyklatmengen stärken den Recycling-Markt in Europa.
- Der Batteriepass und die Ausweisung des CO₂-Fußabdrucks sorgen für mehr Transparenz in der Batteriebranche. Auch die Energieeffizienz der Recycling-Verfahren gewinnt somit an Bedeutung.

Prozessrouten

Übersicht Batterie-Recycling



■ Prozesscluster ■ Recycling-Prozesse ■ Zwischen-/Endprodukt

Die aufgeführten Recycling-Prozesse können unterschiedlich miteinander in Recycling-Routen kombiniert werden. Nicht alle Recycling-Prozesse müssen zur Anwendung kommen.

Erläuterungen

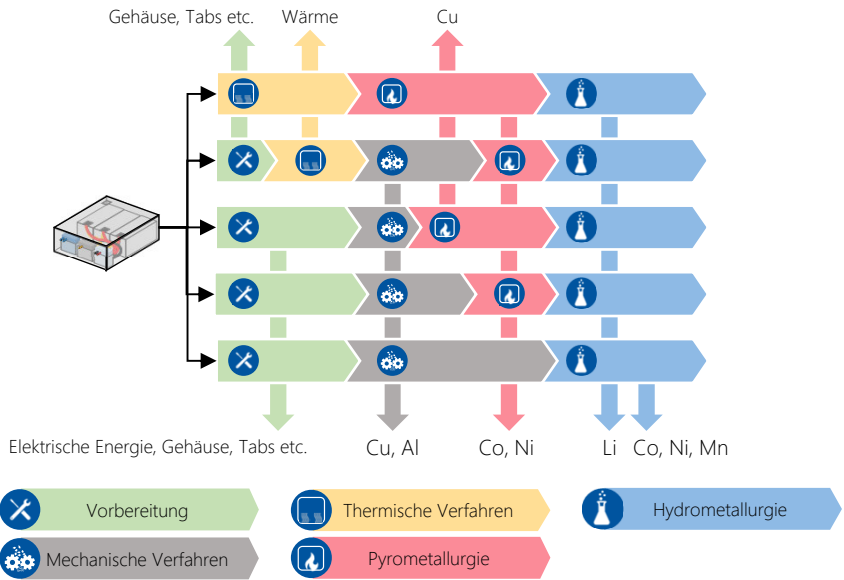
- Die Hauptziele des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien sind die möglichst unbegrenzte **Wiederverwendung von Materialien** durch das Schließen des Produktlebenszyklus und die dadurch reduzierte Abfallentsorgung sowie die Reduzierung der Abhängigkeit von wichtigen Primärmaterialien.
- Der Recycling-Prozess von Lithium-Ionen-Batterien nach der Entladung und Demontage besteht aus **mehreren Verfahrensschritten**, die jeweils unterschiedliche Produkte/Wertstoffe freisetzen.
- Während die Kombination der Prozesscluster „Vorbereitung“, „Mechanisches Recycling“ und „Thermisches Recycling“ bis zum **Zwischenprodukt** (in der Regel „Schwarzmasse“) führen, können durch die Pyrometallurgie die Metalle Kobalt, Nickel und Kupfer sowie durch die Hydrometallurgie neben diesen Metallen in Form von Salzen auch Lithium, Aluminium und Mangan als Metallsalz zurückgewonnen werden.
- Der Begriff **„Blackmass“** definiert dabei ein Gemisch aus Anodenmaterial und/oder Kathodenmaterial und/oder Elektrolyt und/oder anderen Bestandteilen, das beim Recycling oder bei der Rückgewinnung von Batteriematerialien nach der mechanischen und eventuell thermischen Aufbereitung und Separation anfällt und das möglicherweise Verunreinigungen enthält.
- Die Herausforderung des Recycling-Prozesses liegt unter anderem in der **Rückgewinnungsqualität** der Wertstoffe, um einen erneuten Einsatz zu gewährleisten. Die derzeitigen industriellen Technologien können jedoch nicht jedes Material zurückgewinnen.

Zentrale Erkenntnisse

- Mehrere Recycling-Prozesse existieren in der Forschung und in der Industrie. Viele der Verfahren existieren bereits auf dem Markt und wurden für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien adaptiert.
- Viele neue Recycling-Verfahren werden für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien entwickelt.

Recycling-Verfahren

Übersicht Batterie-Recycling



Erläuterungen

- In der Industrie und in der Wissenschaft sind unterschiedliche Ansätze zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien umgesetzt worden: mechanische Behandlung, thermische Behandlung, Pyrometallurgie und Hydrometallurgie. Die Kombination dieser Recycling-Ansätze ermöglicht diverse Prozessrouten, die unterschiedlich effektiv sind und je nach Schwerpunkt der Materialrückgewinnung (etwa Nickel vs. Lithium) Vorzüge und Nachteile aufweisen.
- Die Effizienz, mit der einzelne Wertstoffe aus Batterien zurückgewonnen werden, ist wesentlich von der gewählten Kombination der Prozessschritte abhängig. Es ist notwendig, diese Schritte präzise aufeinander abzustimmen, um eine optimale Recycling-Quote und eine hohe Qualität der zurückgewonnenen Materialien zu gewährleisten.
- Die Vielfalt der Designs von Batteriepacks und der darin verwendeten Materialien erfordert robuste und anpassungsfähige Recycling-Prozesse. Ziel ist es, zur Sicherung hoher Recycling-Quoten und Produktqualität die Prozessrouten so auszulegen, dass sie unabhängig vom Materialinput effizient funktionieren.
- Zur Gewährleistung der Sicherheit der nachfolgenden Schritte im Recycling-Prozess müssen bereits zu Beginn der Recycling-Kette Maßnahmen gegen potenzielle elektrische, chemische und thermische Risiken des Batteriesystems ergriffen werden.
- Die zurückgewonnenen Materialien müssen eine Reinheit aufweisen, die der „Battery Grade“-Qualität entspricht, um die hohe Qualität neu produzierter Batterien sicherzustellen.

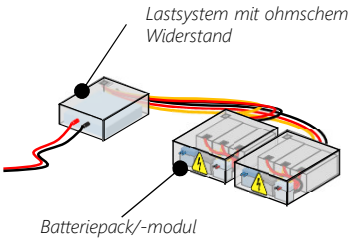
Zentrale Erkenntnisse

- Es gibt eine Vielzahl von Recycling-Prozessen für Lithium-Ionen-Batterien, allerdings hat sich noch kein Industriestandard etabliert.
- Obwohl die Hydrometallurgie höhere anfängliche Investitionen erfordert, ist sie unverzichtbar, um Metallsalze in der für Batterien erforderlichen Qualität zu gewinnen.

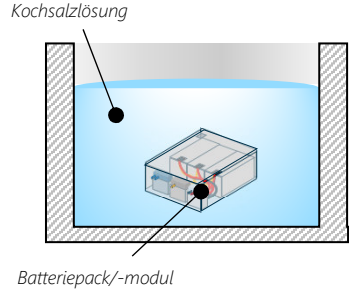
Entladung

Vorbereitung

Technologie 1: Entladung mit Energiezurückgewinnung



Technologie 2: Kochsalzlösung



Mechanische Verfahren

Hydrometallurgie

Thermische Verfahren

Pyrometallurgie

Erläuterungen

- Batterien werden tiefenentladen und möglichst kurzgeschlossen, um das **Risiko für die weitere Recycling-Prozessabfolge zu verringern**. Es gibt keinen Industriestandard für die Entladung von Elektrofahrzeug-Batterien. In der Fachliteratur werden mehrere Verfahren vorgeschlagen, jedoch gibt es kaum detaillierte Informationen zu den verwendeten Methoden.
- Zwei mögliche Technologien sind die **Entladung mit optionaler Energiezurückgewinnung** oder mittels **Kochsalzlösung**. Bei der Salzlösungsentladung werden die Batteriezellen des Moduls oder Batteriepacks bis zu 24 Stunden lang in eine Salzlösung getaucht. Dabei wirkt das gelöste Salz wie ein Elektrolyt, der eine Elektrolyse durchläuft und in einem langsamen Kurzschluss Elektronen zwischen den Polen leitet.
- **Die Tiefentladung beginnt bei 2,5 Volt pro Zelle**. Es wurde festgestellt, dass eine Zelle mit 2,5 Volt (SOC von null Prozent) eine **zu hohe Spannung für eine sichere Zerkleinerung aufweist**, da das Potenzial zwischen Anode und Kathode hoch genug ist, um thermisches Durchgehen oder Funkenbildung bei der Zerkleinerung zu verursachen. Eine Inertisierung bei der Zerkleinerung sollte damit immer gegeben sein.

Vorteile der Verfahren

- Die Entladung ermöglicht eine sichere Handhabung für die weitere Behandlung und verringert die Gefahr eines thermischen Durchgehens („Thermal Runaway“).
- Es ist möglich, die verbleibende Energie im Batteriesystem zurückzugewinnen (zumindest für Technologie 1).
- Die Demontage kann im spannungsfreien Zustand vorgenommen werden, wobei ein thermisches Durchgehen nicht mehr möglich ist.

Herausforderungen

- Die Entladung von Zellen auf null Volt (Tiefentladung) führt zur Auflösung von Cu in den Elektrolyten.^{[3],[4]}
- Wenn die Batterie nach der Entladung auf null Volt ruht, steigt die Spannung an, Cu fällt aus und verursacht seine Verteilung in der gesamten Zelle, was zu Verunreinigungen in nachgeschalteten Produkten führt.
- Der Zustand und der Lebenszyklus einer EoL-Batterie ist häufig nicht bekannt und kann stark variieren.

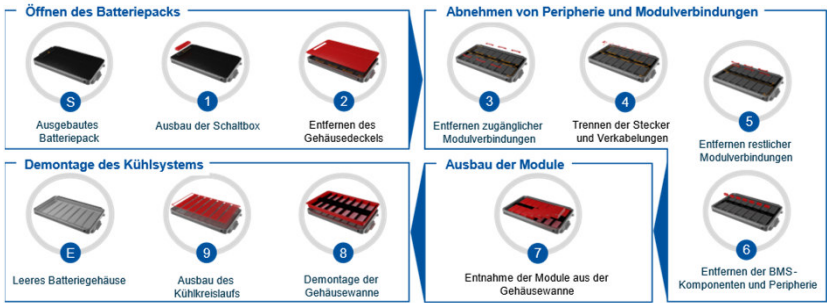
Aus Hauptmaterialflussstrom entfernte Materialien

- Keine

Demontage

Vorbereitung

Generisches Vorgehen für die Batteriepack-zu-Modul-Demontage



Mechanische Verfahren

Hydrometallurgie

Thermische Verfahren

Pyrometallurgie

Erläuterungen

- Ziel der Demontage ist die **frühzeitige Zerlegung von Komponenten- und Materialgruppen** vor einer mechanischen Weiterverarbeitung. Durch das Lösen der Fügeverbindungen lassen sich einzelne Materialströme erzeugen, die nachträglich nicht mit aufwendigen Recycling-Prozessen und damit einhergehenden Verunreinigungen getrennt werden müssen.
- Die Demontage bildet nicht nur die **Abprungbasis für nachfolgende Recycling-Prozesse**, sondern kommt ebenfalls im Rahmen von Re-Use- und Remanufacturing-Bestrebungen zum Einsatz.
- Aktuell erfolgt der Demontageprozess bis auf die **Modulebene in der Regel manuell**. Grund dafür sind die noch zu geringen Rücklaufmengen sowie die große Designvielfalt von Batteriesystemen im Markt.
- Die Demontage wird von **spezialisierten Arbeitskräften** vorgenommen (für ein Batteriepaket von 400 bis 800 Volt ist eine Hochspannungsausbildung erforderlich) und variiert, abhängig von dem zu demontierenden System, in der Prozessdauer von **0,5 bis zwei Stunden**.
- Designs wie **verklebte oder vergossene Cell-to-Pack-Ansätze** sind für den Prozess herausfordernd.

Vorteile des Verfahrens

- Im Vergleich mit dem Zerkleinerungsverfahren führt die Demontage zu einer einfacheren Trennung und letztlich zu einer gesteigerten Materialqualität.
- Eine tiefe Zerlegung kann Kosteneinsparungen für die gesamte Recycling-Route erzeugen, da sie zu hochreinen Produktströmen und einer höheren Ausbeute der Produkte, aber auch zu einfacheren „Flowsheets“ führt.

Herausforderungen

- Die große Variantenvielfalt der Batteriesysteme ist eine Hürde für künftig notwendige Automatisierungsbestrebungen, die aber zur Kostensenkung benötigt werden.
- Nicht zerstörungsfrei lösbare Fügeverbindungen erschweren Prozessschritte wie die Deckelöffnung oder die Modulentnahme.
- Beim manuellen Vorgehen ergeben sich Gefahrenpotenziale wie die Hochvolt-Umgebung oder der Kontakt mit toxischem Elektrolyten.

Aus Hauptmaterialflussstrom entfernte Materialien

- Gehäusekomponenten (bspw. Aluminium), Elektronik, BMS, Modulverbinder (etwa Kupfer)

Automatisierte Demontage

Vorbereitung

Tiefen-Kamerasystem
das am Roboter fixiert
und ausgerichtet ist

Endeffektor-Bahnhof als Wechselstation für die beiden Roboter

Industrieroboter zur automatisierten
Realisierung der Demontageschritte

Endeffektoren für die verschiedenen
Prozessherausforderungen

**Schaltschrank und Steuer-
technik** (Anbindung der
Roboter, Controller, An-
bindung Leistungsrechner,
Sicherheitstechnik etc.)

Arbeitsbereich, auf
dem das Batterie-
pack positioniert wird

Sicherheitszaun zum Schutz vor
der Robotik und dem HV-Pack

Fraktionierungsregal mit Boxen für die
unterschiedlichen Material-/Komponenten-
fraktionen

Leistungsrechner und Steuerung der Demontage

Konzeptdarstellung einer Prototypenzelle aus dem Forschungsprojekt „DemoSens“

Mechanische Verfahren

Hydrometallurgie

Thermische Verfahren

Pyrometallurgie

Erläuterungen

- Mit stetig steigenden Verkaufszahlen von batterieelektrischen Fahrzeugen und einer aktuell abgeschätzten Lebensdauer von durchschnittlich zehn bis 15 Jahren für Batteriesysteme bis zur Erreichung eines „State of Health“ (SoH) von 70 bis 80 Prozent, wird künftig ein **wirtschaftlich skalierbarer Prozess** für die Demontage benötigt.
- Eine Automatisierung des Demontageprozesses unter Einsatz von Robotern **reduziert die Gefahren** durch die Hochvolt-Umgebung und austretenden Elektrolyten für Arbeitskräfte, birgt aber derzeit noch viele Herausforderungen durch fehlende Marktstandards im Aufbau der Batteriesysteme.
- Neben komplett automatisierten Ansätzen wird derzeit ebenfalls an kollaborierenden Konzepten zur **Steigerung des Automatisierungsgrads** gearbeitet.
- Zusätzlich zu den unterschiedlichen Komponentenausprägungen, -positionen und -mengen spielt die Zugänglichkeit zu Greif- und Schraubpunkten und der **Zustand des Systems** eine wichtige Rolle für die Automatisierbarkeit.

Vorteile des Verfahrens

- Umgang mit steigenden Rücklaufmengen
- Schutz von Arbeitskräften vor Gefahrenquellen wie der Hochvolt-Umgebung und toxischem Elektrolyten
- Reduzierung der zeitlichen Umfänge und damit der Kosten der Demontageschritte

Herausforderungen

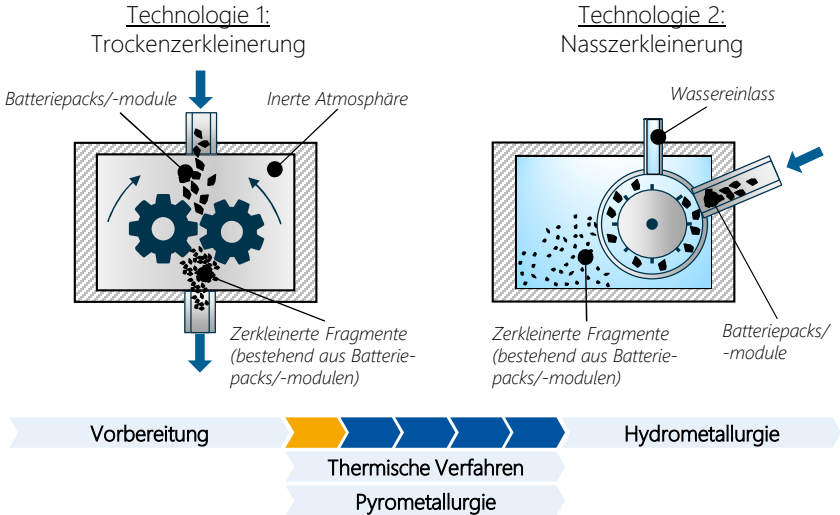
- Durch hohe Variantenvielfalt der Batteriesysteme wird eine große Menge von Daten für die Realisierung benötigt
- Unterschiedliche Zustände der Batteriesysteme am Ende der ersten Nutzungsphase (bspw. Dreck, Rost, Verformungen)
- Der Umgang mit Zugänglichkeiten und Fügeverbindungen wird komplexer.
- Vereinigung von prozessualer Robustheit mit größtmöglicher Flexibilität

Marktsituation

- Aktuell liegen erste Konzepte/Pilotprojekte vor. Der Bedarf steigt durch wachsende Rücklaufmengen.

Zerkleinerung

Mechanische Verfahren



Erläuterungen

- Die Zerkleinerung ist ein wesentlicher Prozessschritt für das mechanische Recycling, da sie die Batteriezellen oder -module in ein **feineres, förderfähiges Schüttgut** überführt. Dieser Prozess trennt die aktiven Materialien von ihrer Verpackung und anderen umgebenden Komponenten.
- Unterschiedliche Zerkleinerungsprozesse führen zu **verschiedenen Ausgangsmaterialien mit unterschiedlichen Größen und Formen**, was die nachgeschalteten Trennverfahren beeinflusst.
- Die **trockene Zerkleinerung** erfolgt oft in einer inerten Atmosphäre. Die Verwendung von Inertgasen verringert die Explosions- und Brandgefahr.
- Die **Nasszerkleinerung** kann in einem Wassermedium erfolgen, das mit den aktiven Materialien, dem Elektrolyten und anderen feinen Partikeln angereichert ist. Die Zerkleinerung in Wasser reduziert die Brandgefahr und erhöht die Ablösung der Elektroden-schichten von den Stromsammel-fohlen. Dieser Prozess erfordert eine komplexe Wasseraufbereitung.

Vorteile des Verfahrens

- Die Zerkleinerung der Batterien ist unerlässlich, um das aktive Material in folgenden Prozessschritten freizusetzen und zu trennen.
- Zerkleinertes Material lässt sich einfach transportieren und bildet die Grundlage für die weitere Recycling-Prozesse.
- Durch die Zerkleinerung werden Schwierigkeiten beim Öffnen der Produkte vermieden, und alle Produkte können mit derselben Methode gehandhabt werden.

Herausforderungen

- Kompression und Verformung müssen während der Zerkleinerung gering sein, um Einschlüsse von Wertstoffen zu vermeiden, aber hoch genug, um möglichst kleine Teile zu produzieren.
- Nach der Zerkleinerung ist ein komplexer Trennprozess erforderlich.
- Die Produktqualität hinsichtlich der Recycling-Effizienz und mögliche Verunreinigungen sind stark von der Zerkleinerung beeinflusst.

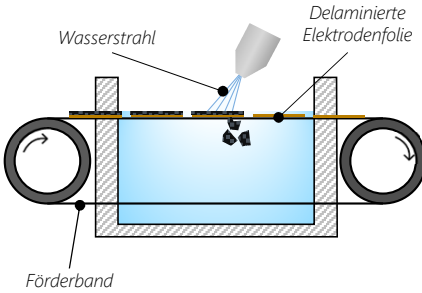
Aus Hauptmaterialflussstrom entfernte Materialien

- Die Zerkleinerung führt keine Materialien ab, sondern macht aus ihnen prozessierbares Schüttgut.

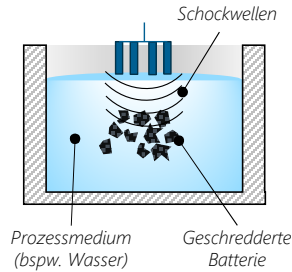
Fragmentierung

Mechanische Verfahren

Technologie 1: Wasserstrahlbehandlung



Technologie 2: Schockwellen



Vorbereitung

Thermische Verfahren

Pyrometallurgie

Hydrometallurgie

Erläuterungen

- Die Wasserstrahlbehandlung erfolgt auf einem Förderband, auf dem die Elektrodenbahnen (Anode und Kathode separat) mit einem Wasserstrahl beansprucht und somit die Aktivmaterialien von den Elektrodenfolien gelöst werden.
- Die Schockwellen werden durch den elektrohydraulischen Effekt verursacht, der durch eine Hochspannungsentladung zwischen Elektroden im Prozessmedium erzeugt wird.
- Eine vorgeschaltete mechanische Zerkleinerung (etwa mittels Schredder) ist für die Schockwellen erforderlich. Dadurch wird der Angriff der Schockwellen an den Grenzflächen des Mehrkomponentensystems wie einer Lithium-Ionen-Batterie ermöglicht.
- Die Trennung erfolgt an makroskopischen Grenzflächen bei Schockwellen (Verklebungen, Verschraubungen und Verklammerungen) sowie an mikroskopischen Grenzflächen bei Schockwellen und Wasserstrahlbehandlung (Korn- und Phasengrenzen). Die Trennung basiert auf den materialspezifischen physikalischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten.

Vorteile des Verfahrens

- Kein Bedarf an gefährlichen und/oder toxischen Chemikalien
- Keine Erzeugung umweltgefährdender Folgeprodukte
- Eröffnet die Rückgewinnung hochwertiger Materialien durch direktes Recycling

Herausforderungen

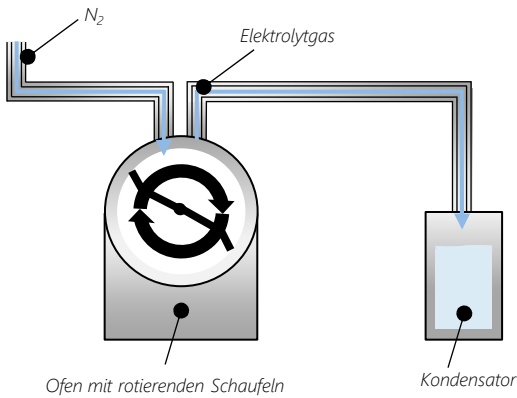
- Die Skalierbarkeit der Prozesse muss noch bewiesen werden.
- Trocknung für Folgeprozesse erforderlich

Aus Hauptmaterialflussstrom entfernte Materialien

- Keine

Trocknung

Thermische Verfahren



Vorbereitung

Mechanische Verfahren

Hydrometallurgie

Pyrometallurgie

Erläuterungen

- Das **Hauptziel des Trocknungsprozesses** besteht darin, den **Elektrolyten aus den zerkleinerten Batterien zu gewinnen**, indem er verdampft und an anderer Stelle gezielt kondensiert wird.
- Das Verfahren lässt sich in einer inerten Atmosphäre, mit Stickstoff oder im Vakuum realisieren.
- Die Trocknung kann durch **Vakuumtrocknung**, **Kontakttrocknung**, **Konvektionstrocknung** und/oder **Infrarottrocknung** erfolgen. Günstig ist es, wenn die Trocknung unter Rühren und/oder Umwälzen des zerkleinerten Materials vorgenommen wird. Dies führt zu einer homogeneren Temperaturverteilung und einer weiteren Freilegung der aktiven Materialien.
- Die Vakuumtrocknung erfolgt bei niedrigeren Temperaturen, vorzugsweise unterhalb von 70 °C, mit einem Druck von maximal 100 Hektopascal, mit dem Ziel, dem Leitsalz mindestens ein Lösungsmittel zu entziehen, so dass die **Bildung von Fluorwasserstoff behindert** wird.

Vorteile des Verfahrens

- Die Vakuumtrocknung mit niedrigen Temperaturen verhindert die Bildung von Fluorwasserstoff und stellt somit keine potenzielle Gefahr für die Batterieverarbeitungsanlage und die Umgebung dar.
- Durch die Vakuumtrocknung mit niedrigeren Temperaturen und einem Kondensationsystem ist es möglich, den Elektrolyten zurückzugewinnen.

Herausforderungen

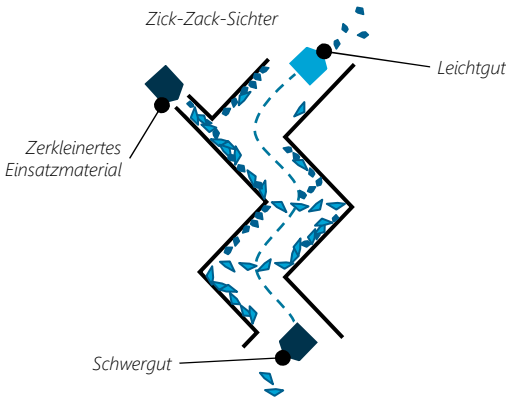
- Einige Elektrolyt- sowie Binderbestandteile mit hohen Siedepunkten lassen sich bei Temperaturen von bis zu 120 °C möglicherweise nicht aus dem zerkleinerten Batteriematerial abtrennen.

Aus Hauptmaterialflussstrom entfernte Materialien

- Niedrigsiedende Elektrolytkomponenten und Wasser

Dichteseparation

Mechanische Verfahren



Vorbereitung

Thermische Verfahren

Pyrometallurgie

Hydrometallurgie

Erläuterungen

- Die **Dichtentrennung** wird verwendet, um Partikel mit geringer Dichte von solchen mit hoher Dichte zu separieren. Prinzipiell gibt es zwei Anwendungsfälle: die Abtrennung der schweren Gehäuseteile vom restlichen Schreddergut sowie die Abtrennung der Separatorfolien aus den schwereren Elektrodenfolien aus Aluminium mit einer Dichte von $2,7 \text{ g/cm}^3$ oder Kupfer mit einer Dichte von $8,96 \text{ g/cm}^3$. Material für den Separator in der Batteriezelle – Polyethylen und/oder Polypropylen – mit einer Dichte von weniger als 1 g/cm^3 wird über das Leichtgut abgetrennt.
- Größe und Form der Partikel** haben einen signifikanten Einfluss auf die Trennleistung. Vor oder nach der Dichtentrennung ist häufig eine Siebung erforderlich.
- Die Dichtentrennung kann mit Hilfe von **Schütteltischen**, in einer Flüssigkeit mit mittlerer Dichte oder durch **Windsichtung** (etwa Zick-Zack-Sichter) erfolgen.
- Die Dichte- und Größentrennung mittels **Zick-Zack-Sichter** kann zweimal vorgenommen werden: einmal zur Abtrennung der schweren Gehäusebestandteile sowie später zur Abtrennung der Separatoren.

Vorteile des Verfahrens

- Der Trenngrad kann durch die Anzahl der Wiederholungen des Trennprozesses in Abhängigkeit von der erforderlichen Reinheit der nachfolgenden Recycling-Schritte eingestellt werden.
- Bei optimalen Prozessbedingungen eine effiziente Möglichkeit, Materialien relativ sortenrein aufzutrennen

Herausforderungen

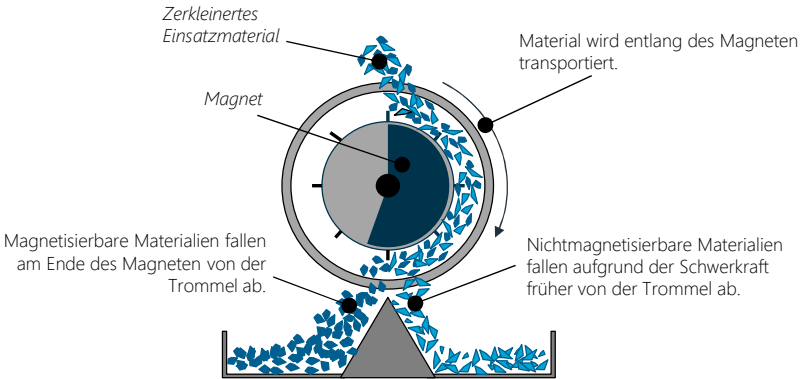
- Die Geometrie der Stücke und der Grad der Freisetzung von LIB-Fragmenten haben einen größeren Einfluss auf die Trennleistung als die Dichteunterschiede allein.
- Stücke mit hoher Dichte und geringer Dicke (plättchen- oder nadelförmig) können im Zick-Zack-Sichter die gleichen Bahnen aufweisen wie Stücke mit geringer Dichte und hoher Wandstärke (Würfel oder Kugeln).
- Der Prozess reagiert empfindlich auf Änderungen des Eingangsmaterials.

Aus Hauptmaterialflussstrom entfernte Materialien

- (Teilweise) Aluminium, Kupfer, Separatormaterial (Polyethylen oder Polypropylen)

Magnetische Separation

Mechanische Verfahren



Vorbereitung

Thermische Verfahren

Pyrometallurgie

Hydrometallurgie

Erläuterungen

- Bei der **magnetischen Trennung** werden die Partikel in magnetisches und nichtmagnetisches Material sortiert.
- Ziel der Magnetabscheidung ist die **Entfernung von Stahlresten** und anderen magnetischen beziehungsweise magnetisierbaren Bestandteilen aus dem Materialstrom.

Vorteile des Verfahrens

- Effiziente Rückgewinnung von groben Stahlteilen (Gehäuseteile, Schrauben, Peripheriegeräte) zum Schutz der folgenden Prozessanlagen vor Verschleiß

Herausforderungen

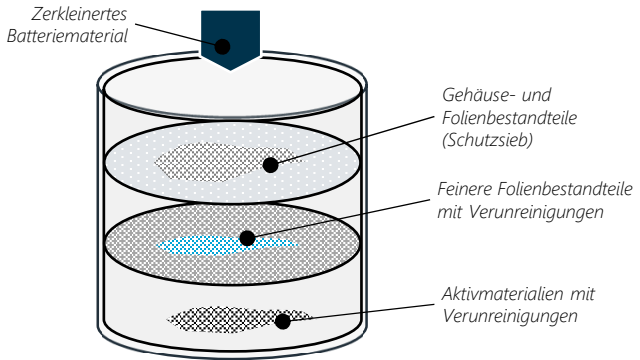
- Ergänzende Schritte sind zur Entfernung der weiteren unerwünschten Partikel in der schwarzen Masse notwendig.

Aus Hauptmaterialflussstrom entfernte Materialien

- Magnetische Materialien – vor allem Stahl, aber auch Kupfer- und Aluminiumbestandteile

Sieben

Mechanische Verfahren



Vorbereitung

Thermische Verfahren

Pyrometallurgie

Hydrometallurgie

Erläuterungen

- Der Recycling-Prozessschritt des **Siebens** klassiert das geschredderte Batteriematerial nach seiner Partikelgröße. Durch die Siebung werden die Batteriegehäusematerialien (Al/Fe/Mn-Legierung), Kunststoffe und Stromabnehmer als grobe Partikel zurückgehalten, während die Feingutfraktion hauptsächlich aus der Schwarzmasse (vor allem aktive Materialien) besteht.
- Diese Trennung ist möglich, weil Batteriegehäuse, Separator und Metallfolien elastisch-plastisch gut verformbar sind und sich nur durch Schneiden sinnvoll zerkleinern lassen, während die **aktiven Elektroden-schichten** sich deutlich spröder verhalten und ursprünglich als **feines Pulver** vorliegen.
- Die Siebe werden durch **Schwingungen** oder **Taumbewegungen** angeregt, um das Siebgut je nach Antrieb in unterschiedlichen Richtungen zu bewegen. Der Prozess kann in einem **Siebturm** mit verschiedenen Maschenweiten stattfinden, um das Material in mehreren Stufen zu trennen und unterschiedliche Ausgangsströme zu erzeugen.
- Die Größenfraktion der Batterietypen ist in Bezug auf die Materialkonzentration recht verschieden.

Vorteile des Verfahrens

- Die Homogenität der durch Siebung getrennten Materialien kann den Einsatz nachfolgender Recycling-Schritte vereinfachen und den Verlust wertvoller Ressourcen in Abfallströmen minimieren.
- Aktive Materialien können aufgrund der partikulären Natur effizient von weiteren Zellbestandteilen abgetrennt werden.

Herausforderungen

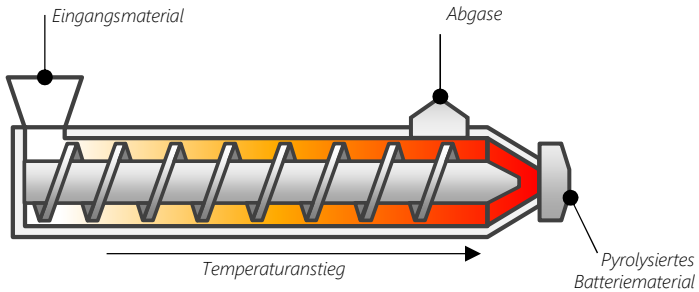
- Verlust von aktivem Material in den gröberen Fraktionen, die an Metallen (Cu, Al, Fe) aus dem Batteriegehäuse und den Stromabnehmern anhaften

Aus Hauptmaterialflussstrom entfernte Materialien

- Grobe Partikel von Al/Fe/Mg-Legierung, Kunststoffe und Stromabnehmer

Pyrolyse/Kalzinierung

Thermische Verfahren



Die Visualisierung stellt eine Möglichkeit der Technologieausführung dar.

Vorbereitung

Mechanische Verfahren

Hydrometallurgie

Pyrometallurgie

Erläuterungen

- Die Pyrolyse oder Kalzinierung kann vor oder innerhalb der mechanischen Recycling-Kette (etwa für Schreddergut) eingesetzt werden, um die **Rückgewinnung von Kathoden- und Anodenmaterialien aus gebrauchten Lithium-Ionen-Batterien zu verbessern**.
- Bei der **Pyrolyse** werden **organische Verbindungen bei hohen Temperaturen (600 °C) unter Ausschluss von Sauerstoff zersetzt**. Die **Kalzinierung** erfolgt in einer **Sauerstoffatmosphäre**. Das Hauptziel dieser thermischen Verfahren besteht darin, schwersiedende Lösemittel und Salze des Elektrolyten sowie die Binder zu entfernen, so dass weitere Recycling-Schritte mit geringem Brandrisiko und geringeren Anforderungen an Fluorwasserstoffbildung durchlaufen werden können.
- Durch die Zersetzung der Binder wie etwa **Polyvinylidenfluorid (PVDF)** werden die aktiven Materialien der Anode und der Kathode von der Kupfer- oder Aluminiumfolie besser abgelöst, so dass die Recycling-Ausbeute und die Sicherheit im Materialhandling erhöht werden.
- Die Pyrolyse wird außer für ganze Batterien auch für die Schwarzmasse zur Verbesserung von Flotation und in der hydrometallurgischen Aufbereitung eingesetzt. Nach der Pyrolyse muss das Material in Kühlrohren oder Kühlschnecken abgekühlt werden.

Vorteile des Verfahrens

- Batterien können nach der Pyrolyse sicher gelagert werden, ohne dass ein Explosionsrisiko besteht, da die Batterie deaktiviert und der Elektrolyt entfernt ist.
- Rückgewinnungsrate und Rückgewinnungsqualität steigen, da die organischen Bindemittel zersetzt werden und die Entschichtung der Elektrodenfolien und damit die Rückgewinnung der aktiven Materialien erleichtert wird.

Herausforderungen

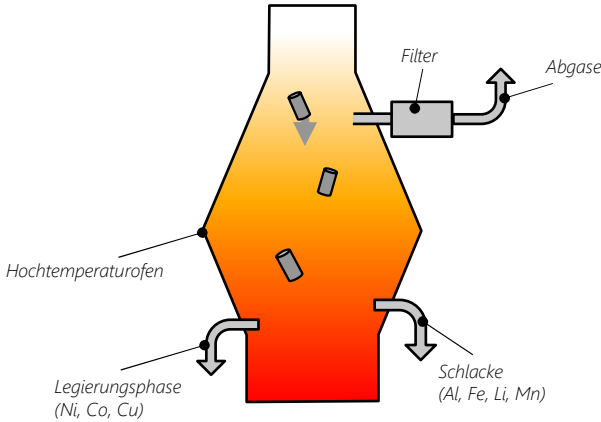
- PVDF zersetzt sich während der Behandlung, wobei gasförmiger Fluorwasserstoff und ein fluorhaltiges organisches Nebenprodukt freigesetzt werden. Fluorwasserstoffsäure ist schädlich und kann Glas, Beton und zahlreiche Metalle angreifen.
- Eine Abgasbehandlung ist notwendig und erhöht die Investitions- sowie Wartungskosten der Recycling-Anlage.
- Elektrolyt- und Binderbestandteile gehen verloren und können nicht recycelt werden.

Aus Hauptmaterialflussstrom entfernte Materialien

- Bindemittel wie Polyvinylidenfluorid (PVDF) und Elektrolytbestandteile, teilweise Leitsalt

Smelting

Pyrometallurgie



Vorbereitung

Mechanische Verfahren

Hydrometallurgie

Thermische Verfahren

Erläuterungen

Im Zuge der Pyrometallurgie werden die Batteriematerialien bei hohen Temperaturen geschmolzen, wodurch Metallschmelzen (Ni, Co, Cu), Schlacken und Stäube entstehen. Der Prozess findet in einem Ofen statt, in dem das Material auf 1.200 bis 1.450 °C erhitzt wird. Durch diese Erhitzung werden organische Bestandteile (etwa Kunststoff, Elektrolyt, Graphit) verbrannt und energetisch verwertet.

- Mit der Erhöhung der Schmelztemperatur der Metalle gehen Nickel (Ni), Kobalt (Co) und Kupfer (Cu) in die Legierungsphase über, während Aluminium (Al), Eisen (Fe), Lithium (Li) und Mangan (Mn) in die Schlackenphase übergehen.
- Neben der Metalllegierung fallen auch Schlacke und Ofenstaub an. Diese Nebenprodukte enthalten Metalle wie Lithium und Mangan und müssen in weiteren Recycling-Schritten, insbesondere Hydrometallurgie, aufbereitet werden. Eine der Pyrometallurgie vorgelagerte Abtrennung von Lithium und anderen Metallen zu deren Rückgewinnung wird derzeit untersucht, ist aber noch nicht kommerziell im Einsatz.

Vorteile des Verfahrens

- Die Batteriezellen und kleinere Batteriemodule können direkt in einen pyrometallurgischen Prozess eingesetzt werden, und die Metallschmelze (Legierungsphase) lässt sich direkt der Laugung zuführen, wodurch die Gesamtzahl der Prozesse drastisch reduziert wird.
- Robustheit gegenüber differierenden Ausprägungen des Batteriedesigns und Batteriechemien

Herausforderungen

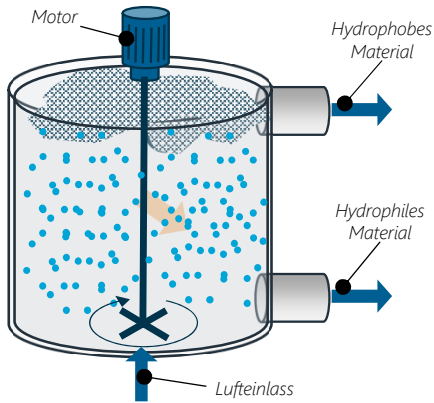
- Das Graphit kann nicht zurückgewonnen werden, da es energetisch und auch als Reduktionsmittel genutzt wird.
- Da die Schlacke chemisch sehr stabil ist, ist ein äußerst hoher mechanischer und chemischer Aufwand notwendig, um die Materialien zu trennen.
- Erreichung der Recycling-Quoten der EU, insbesondere für Lithium, das in der Schlacke stark gebunden ist

Aus Hauptmaterialflussstrom entfernte Materialien

- Schlacke (Aluminium, Eisen, Lithium, Mangan)

Schaumflotation

Hydrometallurgie



Vorbereitung

Mechanische Verfahren

Thermische Verfahren

Pyrometallurgie

Erläuterungen

- Die Behandlung der Schwarzmasse mittels **Schaumflotation** hat als Methode zur Auftrennung wertvoller Kathodenmaterialien und Graphitpartikel zuletzt Interesse erzeugt.
- Bei der Schaumflotation wird unter Einsatz von Flotationsadditiven der Unterschied in der **Hydrophobie** zwischen den Materialien ausgenutzt, um die aktiven Anoden- und Kathodenmaterialien der Lithium-Ionen-Batterien zu trennen.
- Feine Luftblasen werden am Boden in einen Rührbehälter eingeströmt, in dem das zu trennende Material gemeinsam mit chemischen Additiven in Schwebelage gehalten wird. Die Luftblasen legen sich an die **hydrophoben Materialien (Graphit)** an und transportieren diese zur Oberfläche, wo diese abgetrennt werden. **Hydrophile Partikel** verbleiben in der Suspension und werden mit dem Unterlauf der Trenneinheit abgezogen.
- Es ist ratsam, Techniken zur Oberflächenmodifizierung – wie **anaerobe Pyrolyse** und/oder **mechanische Feinstzerkleinerung** – anzuwenden, um die Effizienz des Schaumflotationsverfahrens zu verbessern.

Vorteile des Verfahrens

- Durch die Entfernung der Graphitpartikel (als Produkt) aus der schwarzen Masse wird der Materialstrom homogener und weniger voluminös, was für die nachgeschalteten hydrometallurgischen Prozesse von Vorteil ist.

Herausforderungen

- Wird das Bindemittel nicht ausreichend entfernt, geht eine beträchtliche Menge Kathodenmaterials zusammen mit dem Graphit in die Schaumphase über, was gleichzeitig zu Verlusten wertvoller Metalle und zu minderwertigem Graphit führt.

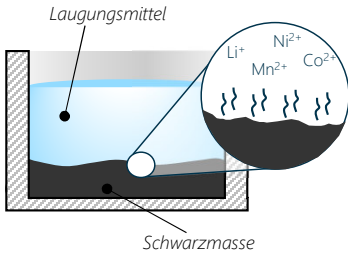
Aus Hauptmaterialflussstrom entfernte Materialien

- Graphitpartikel

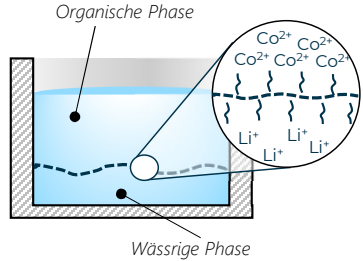
Auslaugung und Extraktion

Hydrometallurgie

Auslaugung



Lösungsmittlextraktion



Vorbereitung

Mechanische Verfahren

Thermische Verfahren

Pyrometallurgie

Erläuterungen

- Die **Auslaugung** dient der Umwandlung von Metallen aus dem Kathodenmaterial in Ionen in wässriger Lösung bei Verwendung von Säure, so dass die Metalle in den folgenden Prozessen durch eine Reihe chemischer Methoden (etwa Ausfällung, Lösungsmittlextraktion) zurückgewonnen werden können.
- Die Auslaugungsreaktion findet an der **Grenzfläche zwischen Feststoff- und Flüssigkeitsphase** statt.
- Es existieren einige Säuren, die für den Auslaugungsprozess verwendet werden können, darunter organische und anorganische Säuren.
- Auslaugungsprozesse können durch verschiedene Parameter beeinflusst werden, etwa durch die **Auslaugungszeit**, die **Temperatur** (60 bis 90 °C) der Lösung, das **Verhältnis von Feststoff zu Flüssigkeit**, die Zugabe eines **Oxidationsmittels** und die **Konzentration der Auslaugungsäure**.
- Die **Lösungsmittlextraktion** ist eine Trennmethode, bei der die unterschiedliche Löslichkeit von Substanzen in zwei nicht mischbaren Lösungsmitteln ausgenutzt wird. Sie folgt nach der Auslaugung, um die Metalle selektiv aus dem Sickerwasser in eine organische Phase zu extrahieren, wobei diese eine geringere Dichte aufweist und aufschwimmt.

Vorteile des Verfahrens

- Das Auslaugungsverfahren ist bei den meisten Kathodenchemien anwendbar (lediglich LFP benötigt eine Vorbehandlung).
- Das Auslaugen ermöglicht hohe Reinheit sowie hohe Rückgewinnungsraten mit geringem Energieaufwand und ist für großtechnische Anwendungen geeignet.
- Die Extraktion erreicht hohe Wirkungsgrade bei sehr geringem Energieaufwand.

Herausforderungen

- Geringe Prozessflexibilität hinsichtlich stofflicher Zusammensetzung des Kathodenmaterials
- Anorganische Säuren setzen als Nebenprodukt giftige Gase (Cl_2 , SO_3 , NO_x) frei.

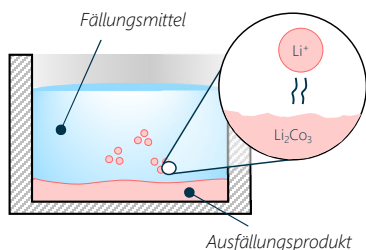
Aus Hauptmaterialflussstrom entfernte Materialien

- Keine

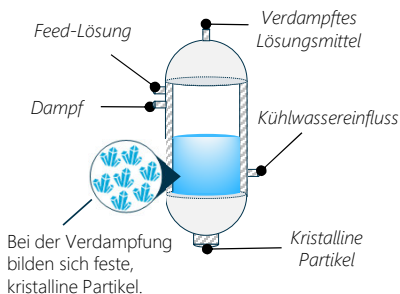
Ausfällung und Kristallisation

Hydrometallurgie

Ausfällung



Kristallisation



Vorbereitung

Mechanische Verfahren

Thermische Verfahren

Pyrometallurgie

Erläuterungen

- Die **Ausfällung** dient der Rückgewinnung von Salz aus einer Lösung durch Zugabe von Fällungsmitteln – etwa nach Auslaugung oder Lösungsmittelextraktion –, um wertvolle Stoffe wie Li, Ni, Mn oder Co zu erhalten.
- Der **Trenneffekt** tritt ein, wenn die Löslichkeit des Salzes aufgrund von Änderungen der Umgebungsbedingungen (beispielsweise Anpassung von Druck, Temperatur oder pH-Wert) überschritten wird.
- Ein bekannter Prozessablauf ist die **selektive Fällung**, bei der der pH-Wert des Sickerwassers sukzessive erhöht wird, um die Wertstoffe Schritt für Schritt aus der Flüssigkeit zu extrahieren.
- Das gängigste Verfahren für die Rückgewinnung von Metallsalzen aus Lithium-Ionen-Batterien bildet die **Verdampfungskristallisation**. Sie wird in der Regel zur Herstellung von Ni (NiSO_4)-, Co (CoSO_4)- und Mn (MnSO_4)-Sulfaten nach der Lösungsmittelextraktion eingesetzt und erzielt aufgrund der hohen Temperaturen (zirka 350 °C) relativ hohe Kristallwachstumsraten.

Vorteile des Verfahrens

- Die Fällung ist das sicherste, wirtschaftlichste und effizienteste Verfahren (Rückgewinnungseffizienz) der hydrometallurgischen Methoden.
- Zur Li_2CO_3 -Herstellung wird im Allgemeinen die Fällung verwendet, da es in neutraler oder basischer wässriger Lösung praktisch unlöslich ist.
- Niedrige Betriebskosten machen die Kristallisation zu einem attraktiven Prozessschritt.

Herausforderungen

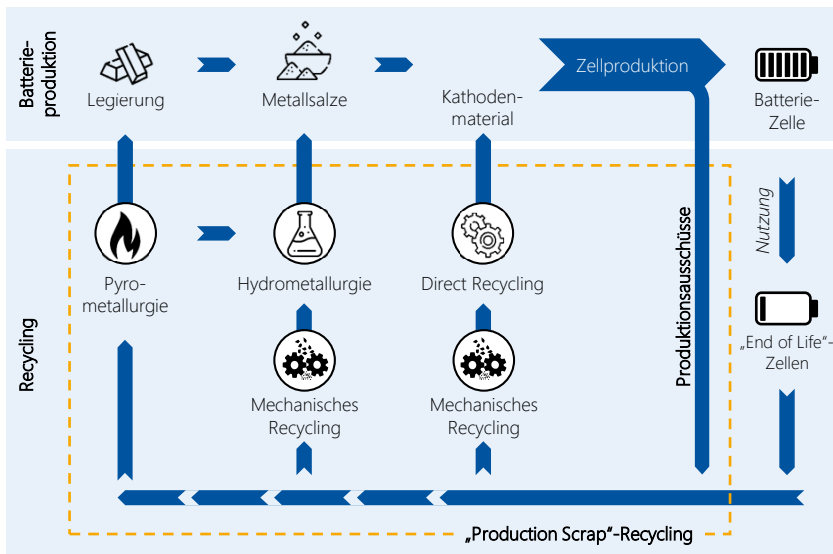
- Die Fällungsmethoden sind am besten erforscht. Eine genaue Kontrolle der Betriebsbedingungen (bspw. pH-Wert und Temperatur) ist jedoch erforderlich, um das gewünschte Eigenschaftsprofil zu erreichen.
- Die Verdampfungskristallisation ist ein sehr zeit- und energieintensiver Prozessschritt, da die wässrige Lösung vollständig verdampft werden muss.
- Prozesse reagieren empfindlich auf Variation des Inputmaterials

Aus Hauptmaterialflussstrom entfernte Materialien

- Keine

„Production Scrap“-Recycling

Sonderformen des Recyclings



Erläuterungen

- **„Production Scrap“-Recycling** bezeichnet das Recycling von Produktionsausschüssen der Batterieherstellung. Durch die exponentiell steigende Menge produzierter Batterien und die Dauer bis zur Erreichung ihres Lebensendes ist „Production Scrap“-Recycling in den nächsten Jahren mengenmäßig relevanter als das „End of Life“-Recycling.
- Die Vielfalt der Materialien auf Zellebene ist geringer als auf Pack-Ebene. Dies vereinfacht die Trennung und führt zur potenziellen **Reduktion einzelner Prozessschritte** im Vergleich zum Recycling von EoL-Batterien. Interessant ist dabei auch die direkte getrennte Aufbereitung von Anoden und Kathoden.
- Durch die Verwendung von Produktionsabfällen können **einzelne Prozessschritte des Recyclings entfallen**. Dazu zählt etwa die **Demontage**, die **Entladung** oder auch die **Pyrolyse**, je nachdem in welchem Prozessschritt der Produktionsabfall entsteht.
- Abhängig davon, an welchem Punkt der Produktionsschrott anfällt, kann der Recycling-Prozess vereinfacht werden. Insgesamt ist das **Recycling von Produktionsausschuss weniger gefährlich**, da weniger kritische Komponenten beziehungsweise Systeme gehandhabt werden müssen.

Batterieproduktionsausschuss

- Der Ausschuss bei der Produktion von LIB erreicht bei Annahme von zehn Prozent Ausschussrate weltweit eine prognostizierte Menge von 905.000 Tonnen im Jahr 2030.
- Die Quelle des Batterieausschusses liegt in den Batterieproduktionsanlagen. Bis zur Zellauslagerung ist eine getrennte Sammlung von Anoden und Kathoden möglich.
- Genutzt werden mechanische, thermische und nasschemische Verfahren.

EoL-Batterien

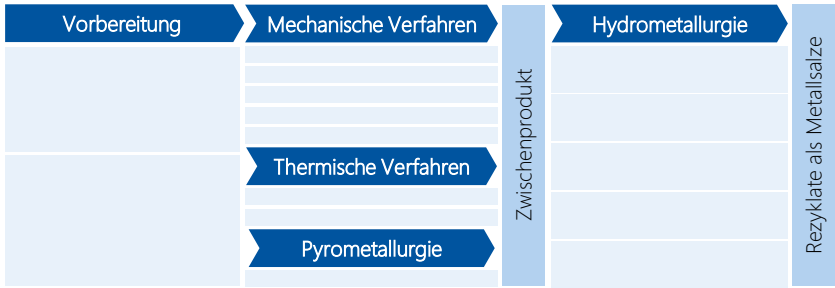
- „End of Life“ (EoL)-Batterien erreichen im Jahr 2030 eine prognostizierte Menge von weltweit 820.000 Tonnen.
- Zu den Quellen der EoL-Batterien zählen neben der Überschreitung der Lebensdauererwartung auch Unfallszenarien oder Rückrufe vor Auslieferung an die Kunden aufgrund von Defekten.

Bis zum Jahr 2030 übertrifft die weltweite Menge des Ausschusses aus der Batterieproduktion die Masse der „End of Life“-Batterien.

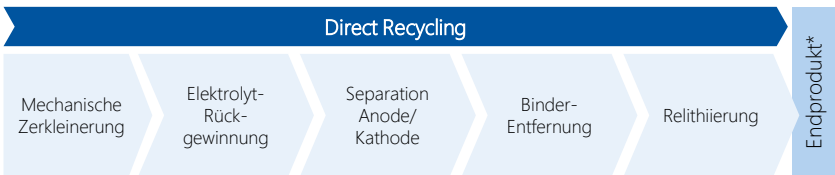
Direct Recycling

Sonderformen des Recyclings

Konventionelle Recycling-Prozesse



Alternative



* Das Endprodukt ist hierbei direkt Kathodenmaterial.

Erläuterungen

- „**Direct Recycling**“ beschreibt den Ansatz, das zu recycelnde Material nicht in seine Grundelemente zu zerlegen, sondern direkt Kathodenmaterial zurückzugewinnen. Dieses Verfahren zählt zu einem engeren Zirkel des Batteriekreislaufs und ist potenziell mit **weniger Kosten und Emissionen** verbunden als es „State of the Art“-Recycling-Prozesse wie Pyrometallurgie und Hydrometallurgie zeigen. Aus diesem Grund hat das direkte Recycling in den vergangenen Jahren einige Aufmerksamkeit erfahren und wird von Forschung und Industrie intensiv erforscht.
- „Direct Recycling“ umfasst in der Regel eine **mechanische Zerkleinerung** (Schreddern), die **Rückgewinnung des Elektrolyten**, eine **Separation von Anoden- und Kathodenmaterial**, die **Entfernung des Binders** und eine abschließende **Relithierung**. Auch Verfahren wie die Schockwellen-Zerkleinerung besitzen großes Potenzial für das „Direct Recycling“, da dies eine sortenreine Zerkleinerung ermöglicht.
- Der **Prozess der Relithierung** dient der Instandsetzung des Kathodenmaterials auf molekularer Ebene. Während der Nutzungsdauer werden Lithium-Ionen chemisch gebunden, die dann nicht mehr zur Ladungsverschiebung beitragen können und so zu einer reduzierten Batteriekapazität führen. Diese Verluste lassen sich durch unterschiedliche Relithierungsprozesse teilweise rückgängig machen.
- Die größte Herausforderung liegt derzeit in der **noch mangelhaften Qualität des Kathodenmaterials** und im niedrigen technologischen Reifegrad der beteiligten Prozesse. Zudem ist ein direktes Recycling vor allem dann wirtschaftlich attraktiv, wenn die zurückgewonnenen Aktivmaterialien vergleichbare spezifische Kapazitäten wie das gerade aktuelle Aktivmaterial besitzen.

Zentrale Erkenntnisse

- „Direct Recycling“ bildet eine interessante Alternative zu „State of the Art“-Recycling-Verfahren, da es verkürzte Prozesszeiten, geringere Kosten und niedrigere Emissionen ermöglicht.
- Das zurückgewonnene Material genügt derzeit in der Regel noch nicht den hohen Ansprüchen der Batterieproduktion.
- Die Skalierung der „Direct Recycling“-Prozesse stellt eine zusätzliche Herausforderung dar.

Leitfäden

zur Elektromobilität

Online verfügbar



In mehreren Veröffentlichungen rund um die Batterie stellt der Lehrstuhl „Production Engineering of E-Mobility Components“ (PEM) der RWTH Aachen in Zusammenarbeit mit dem VDMA die zahlreichen Prozess- und Recycling-Ketten von der Zelle bis zum Batteriepack dar und geht auf die Herstellungsweisen der unterschiedlichen Komponenten ein.



PRODUKTION EINER ALL-SOLID-STATE-BATTERIEZELLE



Produktion einer All-Solid-State-Batteriezelle

Die Veröffentlichung „Produktion einer All-Solid-State-Batteriezelle“ erläutert die Fertigungstechnologien und -ketten für die drei Elektrolytklassen der All-Solid-State-Batteriezelle. Darüber hinaus wird die eventuelle Übertragbarkeit von Kompetenzen aus der Produktion von Lithium-Ionen-Batteriezellen beleuchtet.

2. Auflage
ISBN 978-3-947920-28-0

Hrsg.
PEM der RWTH Aachen & VDMA



PRODUKTIONSPROZESS EINES BATTERIEMODULS UND BATTERIEPACKS



Montageprozess eines Batteriemoduls und -packs

3. Auflage
ISBN 978-3-947920-02-0

Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezelle

4. Auflage
ISBN 978-3-947920-26-6



PRODUKTIONSPROZESS EINER LITHIUM-IONEN-BATTERIEZELLE



BATTERIESICHERHEIT ANHAND DER ECE-R100



Batteriesicherheit anhand der ECE-R100

1. Auflage
ISBN: 978-3-947920-47-1

Komponentenherstellung einer Lithium-Ionen-Batteriezelle

2. Auflage
ISBN 978-3-947920-49-5



KOMPONENTENHERSTELLUNG EINER LITHIUM-IONEN-BATTERIEZELLE

2. Auflage, 2023

