

Stand und Perspektiven des Recyclings von Lithium-Ionen- Batterien aus der Elektromobilität

Synthesepapier erstellt im Rahmen des vom
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare
Sicherheit geförderten Verbundvorhabens
MERCATOR

„Material Effizientes Recycling für die Circular Economy
von Automobilspeichern durch Technologie ohne
Reststoffe“

Darmstadt,
24.08.2020

*Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit*

Autorinnen und Autoren

Dr. Matthias Buchert
Jürgen Sutter

Öko-Institut e.V.

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

1.	Strategische Relevanz des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien – Stützpfiler der Elektromobilität	5
2.	Technologischer Stand des Recyclings von Lithium-Ionen- Batterien	6
3.	Mittelfristige Perspektiven der verbesserten Rohstoffeffizienz	11
4.	Ausblick	13
5.	Quellen	15

1. Strategische Relevanz des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien – Stützpfeiler der Elektromobilität

Leistungsfähige Lithium-Ionen-Batterien sind das Herzstück für alle Arten von Elektrofahrzeugen - von Elektrofahrrädern über Hybrid-PKW (HEV), Plug-in-PKW (PHEV), vollelektrische PKW (BEV), bis hin zu Elektrobussen sowie Hybrid- oder vollelektrischen Lastwagen. Die strategische Relevanz eines hochwertigen Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien wurde gerade in Deutschland sehr früh erkannt. In umfassenden, vom Bundesumweltministerium geförderten Verbundprojekten mit Beteiligung der Industrie und Wissenschaft wurden ab dem Jahr 2009 bis heute wichtige Herausforderungen im Kontext des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus der Elektromobilität adressiert und das große ökologische Potenzial der Recyclingverfahren nachgewiesen (LiBRi 2011, Lithorec I 2012, LithoRec II 2016, EcoBatRec 2016, Mercator 2022).

Die strategische Relevanz des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) liegt einerseits in der Bereitstellung von Schlüsselmaterialien in hoher Reinheit für die Batterien wie Kobalt-, Nickel-, Lithiumverbindungen etc. und damit der Verringerung der Abhängigkeit Europas für die sich im Aufbau befindliche eigene Wertschöpfungskette leistungsfähiger Lithium-Ionen-Zellen und -Batterien. Andererseits kann mit der Bereitstellung von Lithium-, Kobaltverbindungen usw. aus dem Batterienrecycling eine Versorgungsrouten realisiert werden, die sich durch eine gute Umweltbilanz und Arbeitsbedingungen nach europäischen Rechtsnormen auszeichnet.

Neuerdings hat das Thema Recycling von Lithium-Ionen-Batterien zusätzlich eine strategische Relevanz durch die Verabschiedung der Ziele des European Green Deal von der Europäischen Kommission bekommen, welche u. a. eine saubere und kreislauforientierte Wirtschaft umfassen.

Bereits in der Zeit der vorherigen EU Kommission unter Jean-Claude Juncker wurde im Zuge des zunehmenden Markthochlaufs der Elektromobilität in Europa der Ruf nach einer europäischen Wertschöpfungskette für Lithium-Ionen-Zellen immer lauter. Sowohl die EU-Kommission als auch Mitgliedsstaaten wie Frankreich, Deutschland usw. haben umfassende finanzielle Unterstützungen auf den Weg gebracht, um entsprechende Wertschöpfungsketten europäischer Unternehmen mit Produktionsstandorten in Europa zu realisieren (Handelsblatt 2019). Diese Strategie ist unter dem Slogan „Europäischer Batterien Airbus“ zusammengefasst (Šešćovič 2019).

Der zunehmende Boom hin zur Elektromobilität führte bereits im Jahr 2019 in Europa¹ zu signifikanten Stückzahlen bei teil- und vollelektrischen PKW (ACEA 2020):

- 359.796 BEV (plus 80,2 % gegenüber 2018),
- 198.853 PHEV (plus 7,1 % gegenüber 2018),
- 937.377 HEV (plus 49,5 % gegenüber 2018)

Und sowohl für Europa allgemein und speziell auch für Deutschland wird durch die technologischen Entwicklungen und die Rahmenbedingungen der Politik in den nächsten Jahren ein massiver Anstieg der Zulassungszahlen für Elektrofahrzeuge erwartet. So sollen nach dem Klimaschutzplan der Bundesregierung allein in Deutschland im Jahr 2030 bereits 7 – 10 Mio. Elektrofahrzeuge zugelassen sein (Bundesreg. 2019).

¹ EU-28 + EFTA (Island, Norwegen und Schweiz)

Vor dem Hintergrund dieser zunehmenden Dynamik ist es eine strategisch günstige Ausgangslage, dass deutsche Unternehmen und wissenschaftliche Institutionen bereits vor über zehn Jahren mit intensiven Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien begonnen hatten, und dadurch heute bereits entsprechende industrielle Prozesse realisiert sind (vgl. Abschnitt 2). Ungeachtet dessen bestehen in den einzelnen Prozessschritten der bestehenden Recyclingverfahren noch signifikante Innovations- und Optimierungspotenziale (Buchert 2018), die durch weitere Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen erschlossen werden müssen (vgl. Abschnitt 3).

Die hohe Relevanz einer optimierten Recyclingkette für Lithium-Ionen-Batterien ist aktuell auch ein wichtiger Schwerpunkt von laufenden Arbeiten (Trinomics et al. 2020, Ramboll et al. 2020) für die DG Environment der Europäischen Kommission, die zum Ziel haben, eine Revision der Europäischen Batterie-Richtlinie vorzubereiten. Neben Themen zu Sammelzielen und Recyclingeffizienzen² bzgl. der gesamten Batterie, stehen u. a. spezifische Rückgewinnungsraten für Schlüsselemente wie Lithium, Kobalt, Nickel und Kupfer als zukünftige Zielvorgaben einer europäischen Kreislaufwirtschaftspolitik im Mittelpunkt der Analysen und Stakeholderkonsultationen. Mehrere Institutionen wurden im Verbund beauftragt bis zum Herbst 2020 Entscheidungsgrundlagen vorzubereiten. Die EU Kommission will auf dieser Basis einen umfassenden Vorschlag für die Revision der bestehenden Batterierichtlinie vorlegen. Damit steht in Aussicht, dass dieses wichtige Regelwerk hinsichtlich des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien die unbedingt notwendigen Aktualisierungen, Präzisierungen und Optimierungen im Jahre 2021 erhält.

Die strategische Relevanz des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien lässt sich mit folgenden Punkten zusammenfassen:

- Bereitstellung von Schlüsselmaterialien der Elektromobilität durch umweltfreundliche, energie- und kosteneffiziente sowie sozial verträgliche Recyclingprozesse in Europa,
- Reduzierung der Abhängigkeit Europas von außereuropäischen Quellen für die sich im Aufbau befindliche deutsche und europäische Industrie für Batteriezellen und Elektromobilität insgesamt,
- Entwicklung und Aufbau eines neuen High-Tech-Zweigs der Kreislaufwirtschaft mit maßgeblichen Impulsen, Innovationen und Investitionen durch Akteure aus Deutschland,
- Transfer von Know-how und Anlagentechnik auf der mittel- bis langfristigen Zeitleiste für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien außerhalb der Europäischen Union.

2. Technologischer Stand des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien

Lithium-Ionen-Batterien (LiB) für Elektrofahrzeuge haben unterschiedliche Zellzusammensetzungen. In den ersten BEV, PHEV usw. wurden oft Mischungen aus NMC³- und LMO⁴-

² In der bisherigen Richtlinie fehlen Sammelziele für Lithium-Ionen-Batterien – mit Ausnahme portabler Batterien (hier gilt für die Mitgliedsländer derzeit das Sammelziel 45 %). Weiterhin gilt für Lithium-Ionen-Batterien ein Ziel für die Recyclingeffizienz von 50 Gew.%. Dieses sehr unspezifische Ziel ist seit längerer Zeit unter Fachleuten und Marktteilnehmern hoch umstritten.

³ NMC = Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide Cathode

⁴ LMO = Lithium Manganese Oxide Cathode

Kathodenmaterialien verwendet. Heute dominieren NMC-Zellen den Markt in Europa⁵, gefolgt von NCA⁶-Zellen (Fab4Lib 2019). Die Anodenmaterialien sind aus Graphit hergestellt. Der Elektrolyt besteht aus organischen Lösungsmitteln und einem fluorhaltigen Leitsalz. Im Gegensatz zu tragbaren Batterien bestehen Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge zu einem großen Teil (bis ca. 40 Gew.-%) aus anderen Anbaukomponenten wie z. B. Batteriegehäusen, Kabeln, Batteriemanagementsystemen, verschiedenen Schrauben, Kunststoffteilen usw.

Technologische Verfahren:

Zu entsorgende Lithium-Ionen-Batterien werden zunächst aus den Personenkraftwagen sachgerecht ausgebaut. Aufgrund der Hochspannungsbatterien darf für diese Arbeiten nur speziell geschultes elektrotechnisches Fachpersonal eingesetzt werden. Die Lithium-Ionen-Batterien können nun als Gefahrgut⁷ zu Demontageanlagen transportiert werden. Je nach Prozess werden Lithium-Ionen-Batterien ggfs. entladen und Komponenten wie Gehäuse (Stahl/Kunststoff/Aluminium), Kabel (Kupfer), Batteriemanagementsysteme (Leiterplattenschrott) etc. von speziell geschultem Personal mit Hilfe von Kleinwerkzeugen entfernt. Diese Komponenten werden bestehenden, konventionellen Recyclinganlagen (Stahl-, Kupfer-, Aluminiumrecycling etc.) zugeführt.

Um die Arbeiter in den Demontageanlagen vor möglichen Schadstoffemissionen im Havariefall (insbesondere Fluorwasserstoff und Lösemittel) zu schützen, müssen die Arbeitsplätze gut belüftet sein. In der Regel werden die Zellmodule getrennt und sicher verpackt (aus Sicherheitsgründen isoliert durch Sand oder Vermiculit) und zu einer Recyclinganlage transportiert.⁸ Wie bei den tragbaren Lithium-Ionen-Batterien werden für die weitere Behandlung der Zellmodule (LiB-Module) von Elektrofahrzeugen in der Regel im nächsten Schritt je nach Verfahren bzw. Unternehmen pyrometallurgische (a), mechanische (b) oder pyrolytische (c) Verfahren eingesetzt (siehe vereinfachtes Schema in Abbildung 1).

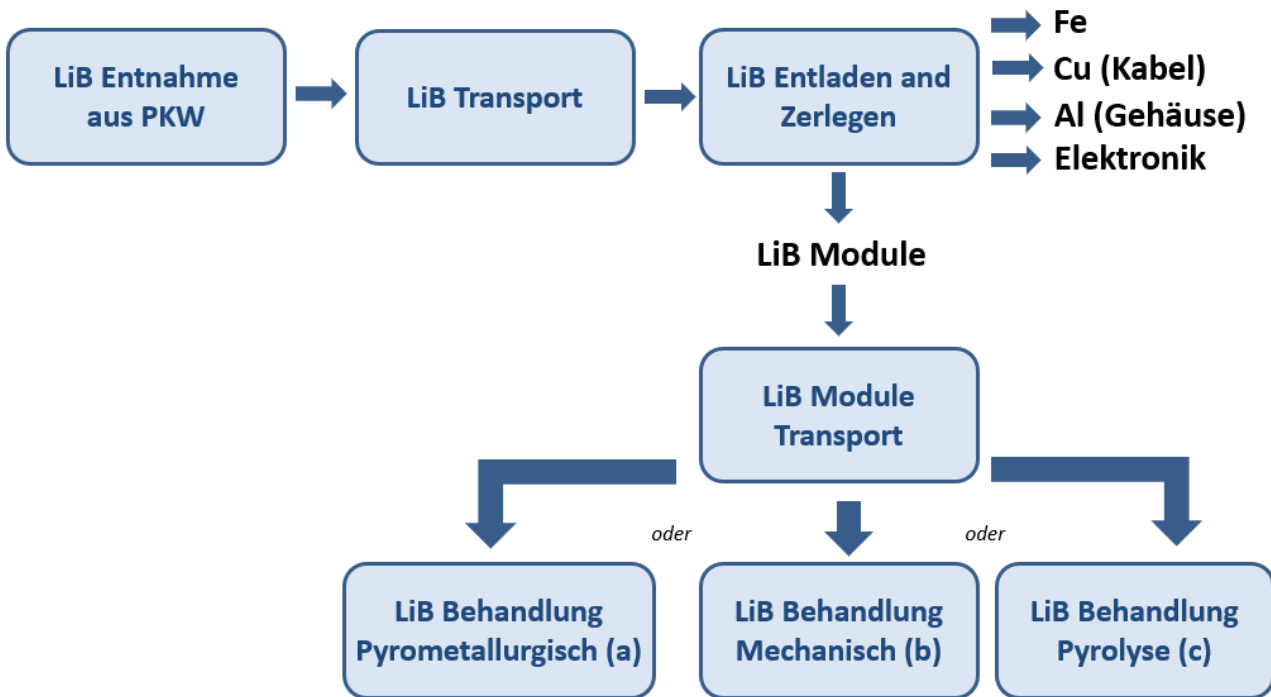
⁵ Die NMC-Zellen verschiedener Generationen weisen unterschiedliche Verhältnisse zwischen Nickel, Mangan und Kobalt auf. Der Trend geht hin zu nickelreichen NMC-Zellen mit entsprechend geringerem Kobaltgehalt.

⁶ NCA = Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide Cathode

⁷ Im Falle von beschädigten oder kritischen Lithium-Ionen-Batterien gelten aufwändige Verpackungs- und Transportvorschriften.

⁸ Wenn die Batterien an einem Anlagenstandort demontiert und recycelt werden, entfällt dieser Transportschritt.

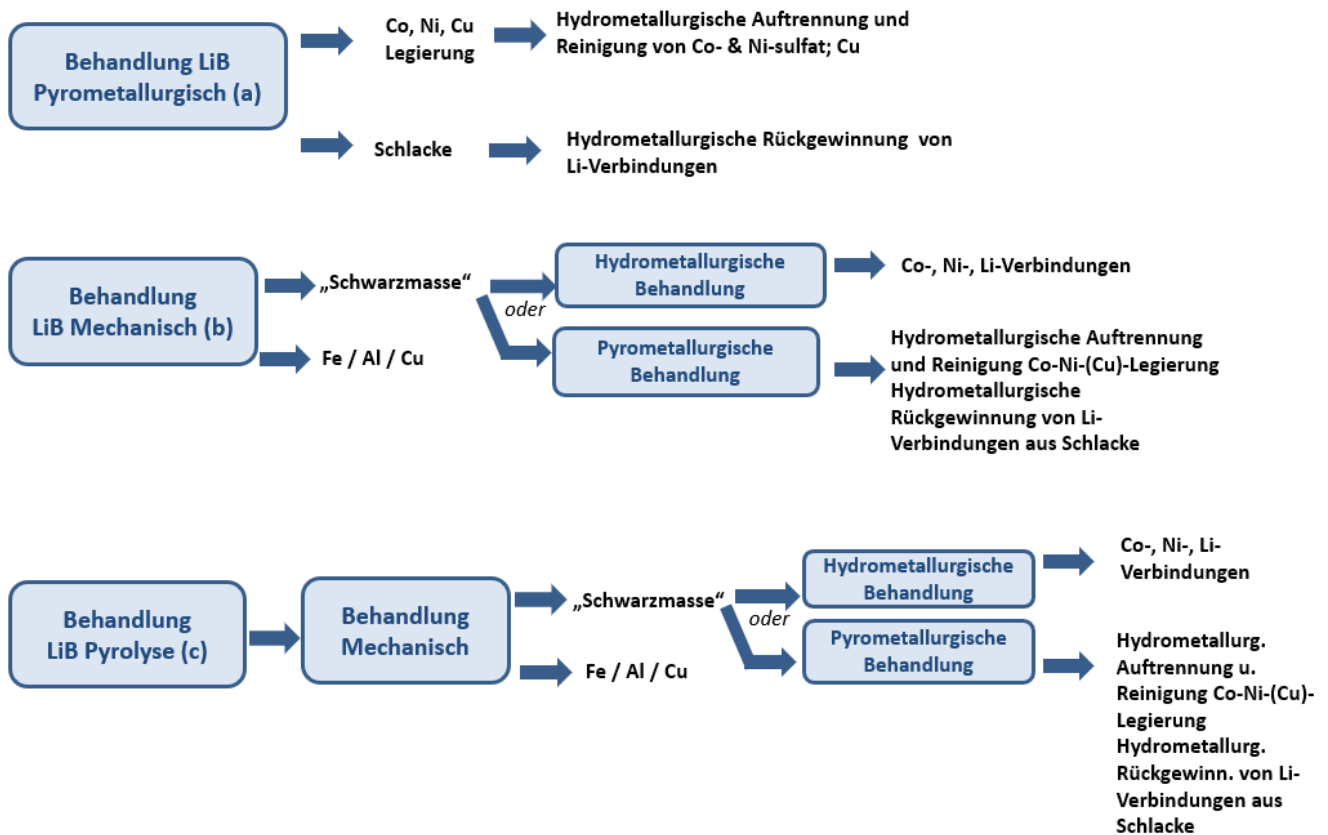
Abbildung 1 Schema Ausbau, Entladung, Demontage und nachfolgender Behandlungsschritt von LiB aus der Elektromobilität



Die Verfahren zum Recycling der LiB-Batterie-Module unterscheiden sich zunächst wesentlich in ihren ersten Schritten, neben einer pyrometallurgischen Vorverarbeitung (a) gibt es Verfahren, die mechanische Trennschritte (b) oder Pyrolyse mit nachfolgenden mechanischen Trennschritten (c) einsetzen, siehe Abbildung 2. Die weitere Verarbeitung der zurückgewonnenen Materialien erfolgt dann je nach Verfahren auf unterschiedlichen hydrometallurgischen oder pyrometallurgischen (mit nachfolgender Hydrometallurgie) Wegen. Ihre wichtigsten Zielmaterialien sind gegenwärtig Kupfer sowie Nickel- und Kobalt. Lithium ist zurzeit nur bei wenigen Recyclingprozessen im Fokus. Die Rückgewinnung von Lithium dürfte jedoch zukünftig wegen steigender Volumina stark an Bedeutung gewinnen.

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Darstellung der Recyclingrouten in Abbildung 2 insgesamt ein idealtypisches Bild darstellen. Zum einen sind Prozessschritte wie die hydrometallurgische Behandlung der „Schwarzmasse“ oder die Rückgewinnung von Lithium bei den unterschiedlichen Verfahren noch wenig realisiert oder die Transparenz der entsprechenden Recyclingunternehmen zu diesen Prozessen ist noch stark verbesserungsbedürftig. Zum anderen sind nahezu bei allen Prozessschritten in allem Routen noch Optimierungen der Verfahrensschritte notwendig und daher für die nächsten Jahre vorgesehen.

Abbildung 2 Schema Recycling LiB-Module (NMC) nach diversen Routen



Bei der pyrometallurgischen Route (a) werden die LiB-Module direkt in einem Schachtofen bei hoher Temperatur geschmolzen. In der Batterie-Recyclinganlage von Umicore in Hoboken, Belgien wird beispielsweise eine Legierung gewonnen, die hauptsächlich aus den Zielmetallen Kupfer, Kobalt und Nickel besteht. Bei diesem Hochtemperaturprozess werden Graphit, organische Lösungsmittel (aus dem Elektrolyten) und Kunststoffkomponenten der Batterien sowie die elektrische Restenergie der Batteriezellen als Energieträger genutzt und das entstehende Kohlendioxid über den Abgasstrom emittiert. Fluor wird über die Abgasreinigungsanlage in die Flugasche integriert und als Sondermüll entsorgt.⁹ Um gefährliche Emissionen wie z. B. Dioxine und Furane zu vermeiden, ist die Abgasreinigungsanlage mit einem Plasmabrenner als Hochtemperatur-Nachbrenner ausgerüstet.

Beim Schmelzprozess im Schachtofen wird das in den Batterien enthaltene Lithium vollständig in eine Schlacke eingearbeitet, die als Nebenprodukt abgetrennt wird. Bis 2017 wurde diese Schlacke als Bauzuschlagstoff verwendet. Nach Angaben von Umicore wird seit 2017 Lithiumcarbonat oder Lithiumhydroxid von Dritten aus dieser Schlacke zurückgewonnen, so dass es auch wieder für den Batteriezyklus zur Verfügung steht.¹⁰ Nähere Informationen und Details zu diesem Prozess sind bislang nicht bekannt.

⁹ <https://csm.umicore.com/en/recycling/battery-recycling/our-recycling-process>; Diese Anlage ist auch für das Recycling von NiMH-Batterien geeignet. Das nickel- und kobalthaltige Material wird in die beschriebene Kupfer-Kobalt-Nickel-Legierung umgewandelt. Die Seltenerdmetalle (aus NiMH-Batterien) werden vollständig in die Schlacke integriert. Nach Angaben von Umicore können diese Seltenerdmetalle durch Behandlung der Schlacke zurückgewonnen werden.

¹⁰ Hagelüken, C.: Recycling of Li-Ion batteries – imperative for sustainable e-mobility, aabc Europe, 29 January 2018.

Die gewonnene Legierung wird in einem anderen Umicore-Werk in Belgien hydrometallurgisch in Kupfer, Kobaltsulfat und Nickelsulfat aufgetrennt und gereinigt. Das Kobalt- und Nickelsulfat wird für die Herstellung von Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien wiederverwendet.

In der Route mit einer im ersten Schritt mechanischen Behandlung (b) werden die LiB-Module beispielsweise in einer Schutzgasatmosphäre geschreddert und ein Teil des Elektrolyten (Leichtsieder) wird nach der Vakuumverdampfung zurückgewonnen. Es gibt F&E-Aktivitäten zur Trennung dieser Lösungsmittelgemische und zur Rückführung der Lösungsmittel in den Wirtschaftskreislauf.

In der Route mit einer im ersten Schritt pyrolytischen Behandlung (c) werden die Lithium-Ionen-Batterien zunächst thermisch behandelt und anschließend geschreddert.¹¹ Bei diesen Verfahren werden die Elektrolyte (organische Verbindungen) pyrolysiert (Abgasreinigung erforderlich) und der fluorhaltige Binder für das Kathoden- und Anodenmaterial zerstört. Letzteres verbindet die Vorteile einer besseren Trennwirkung in der nachfolgenden mechanischen Stufe mit frühzeitiger Abtrennung von Fluorverbindungen bereits im Pyrolyseschritt. Der Energieinhalt der LiB-Module und deren organischen Elektrolyte tragen zu einer günstigen Energiebilanz dieses Schrittes bei.

Anschließend werden sowohl nach Route b) als auch Route c) Stahl-, Aluminium- und Kupferkomponenten auf mechanischem Weg abgetrennt und über konventionelle Recyclingwege der Verwertung zugeführt. Allerdings haben rein mechanische Routen nach b) den Nachteil, dass der Binder der Zellen die Trennung der Aktivmassen von Kupfer- bzw. Aluminiumfolien deutlich erschwert.

Das Hauptprodukt ist das sogenannte aktive Material ("Schwarzmasse"), das hauptsächlich aus Elektrodenmaterial (Graphit, Lithium-, Kobalt-, Nickel- und Manganoxid) besteht. Dieses kann entweder in pyro-metallurgischen (mit anschließenden hydro-metallurgischen Reinigungs- und Trennschritten) oder hydro-metallurgischen Anlagen weiterverarbeitet werden. Die Zielmaterialien sind Kupfer-, Nickel- und Kobaltverbindungen.¹² Die Rückgewinnung von Lithium ist bislang noch in den wenigsten Verfahren realisiert bzw. befindet sich im F&E-Stadium. Darüber hinaus gibt es im Falle der Routen b) und c) auch F&E-Aktivitäten zur Rückgewinnung des Graphits aus den Lithium-Ionen-Batterien (vgl. Abschnitt 3).

Zu den größten Herausforderungen in den verschiedenen Recyclingprozessen gehört die Beherrschung des Thermische Runaways (TR) sowie die hohe Brandlast einer LiB.

Zur Verdeutlichung eine kurze Beschreibung des TR-Phänomens (Weyhe/Buchert 2019): Im Zusammenhang mit Lithium-Ionen-Batterien wird immer wieder über Brandzwischenfälle berichtet. Diese entstehen durch Erwärmung oder mechanische Beschädigung einer Zelle, innerem Druckaufbau, einem Bersten der Zelle, ihrer anschließenden Selbstentzündung und der Verbrennung von Zellelektrolyten (organische Lösungsmittel) und Kunststoffen. Eine Erwärmung der LiB Zelle kann durch einen externen Kurzschluss, durch einen internen Kurzschluss, durch starke Erwärmung von außen oder aufgrund einer externen Beschädigung erfolgen. Der TR einer Lithium-Ionen-Zelle kann zu besonders schnellen und großen Brandereignissen führen, wenn sich viele Lithium-Ionen-Zellen in einem dichten Raum befinden. Die Ursache liegt darin, dass die Energie einer geladenen Zelle ausreicht, um sechs weitere Zellen auf TR-Temperatur (150 – 250 °C) zu erhitzen. Dies führt zu einem fatalen Dominoeffekt. Neben der Verbrennungswärme besteht auch ein hohes Gefährdungspotenzial durch erhebliche Emission von Ruß, Fluorwasserstoff (HF) und anderen krebserregenden Kohlenwasserstoffen.

¹¹ Dies ist kennzeichnend für den Accurec-Prozess: <https://accurec.de/lithium>

¹² Die Rückgewinnung von Manganverbindungen ist aufgrund der niedrigen Manganpreise für viele Recycler mittelfristig wirtschaftlich nicht attraktiv. Trotzdem streben einige Unternehmen auch die Rückgewinnung von Manganverbindungen an.

Deshalb müssen alle Bereiche der Recyclingwirtschaft, in denen Lithium-Ionen-Batterien gesammelt, transportiert, gelagert und behandelt werden, so organisiert und technisch ausgerüstet sein, dass der TR einer Zelle möglichst schnell erkannt und Gegenmaßnahmen eingeleitet bzw. das Schadensausmaß so gering wie möglich gehalten werden kann.

Sowohl die pyro-/hydrometallurgischen, die mechanisch/hydrometallurgischen (pyrometallurgischen) als auch die pyrolytisch/mechanisch/hydrometallurgischen (pyrometallurgischen) Routen sind in Europa in (semi)-industriellen Anlagen in unterschiedlichem Reifegrad realisiert. Bislang betragen die Anlagenkapazitäten einige Tausend Tonnen pro Jahr (Buchert 2018). Die Accurec Recycling GmbH gibt für 2019 die Recyclingmenge von 2.500 Tonnen Lithium-Ionen-Batterien in ihrer Anlage in Krefeld an (Sojka 2020).

Fazit zum Stand des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien

Unterschiedliche Prozessrouten für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien werden von den Recyclingunternehmen in Europa und weltweit verfolgt. Für das Recycling von nickel- und kobalthaltigen Lithium-Ionen-Batterien standen diese beiden Wertmetalle neben der Rückgewinnung von Kupfer bislang im Hauptfokus der Recyclingaktivitäten. Aufgrund des bislang überschaubaren Rücklaufs von Lithium-Ionen-Batterien in die Kreislaufwirtschaft bewegen sich die Anlagengrößen für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien in Europa bislang im maximal vierstelligen Tonnenbereich. In den nächsten zehn bis 15 Jahren wird der Rücklauf an Lithium-Ionen-Batterien aus der Elektromobilität in die Kreislaufwirtschaft in Europa sehr stark zunehmen (siehe auch Abschnitt 4). Damit einhergehend wird der Bedarf sowohl an größeren Recyclinganlagen als auch an optimierten Verfahren wachsen. Die Rückgewinnung von Lithium und auch von Graphit aus End-of-Life Lithium-Ionen-Batterien wird daher in den nächsten Jahren deutlich an Bedeutung gewinnen.

3. Mittelfristige Perspektiven der verbesserten Rohstoffeffizienz

Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, arbeiten in Europa bis zu 10 Recyclingunternehmen, z. T. im Verbund mit privatwirtschaftlichen oder universitären Partnern an der Verbesserung ihrer Recyclingprozesse vor dem Hintergrund des erwarteten Marktwachstums auch an dem Ausbau ihrer zukünftigen Verarbeitungskapazitäten. Beispielsweise verkündete im Herbst 2019 ein Konsortium bestehend aus den Unternehmen BASF, Eramet und Suez im Rahmen des von der EU geförderten Vorhabens „ReLieVe“ das Ziel der Rückgewinnung von Nickel, Kobalt, Mangan und Lithium zu batteriegeeigneten Produkten aus dem Recycling von Lithium-Ionen-Batterien von Elektrofahrzeugen (E-Auto News 2019).

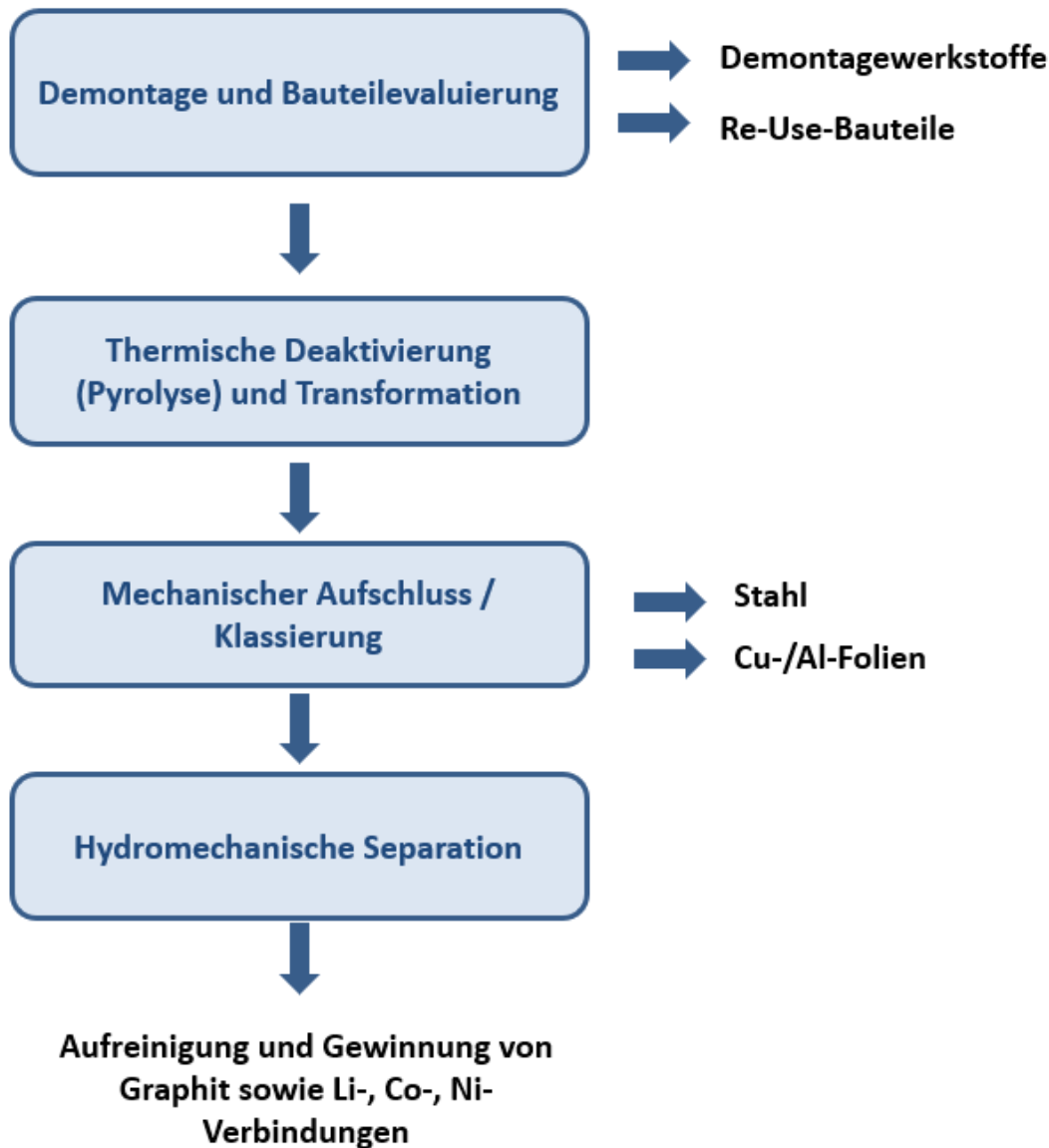
Einige, der im industriellen Maßstab umgesetzten Recyclingrouten sind bereits heute in der Lage, aus LiB-Modulen Stahl, Kupfer sowie Nickel- und Kobaltverbindungen mit mind. 90 % Ausbeute zurückzugewinnen. Aktuell zielen die verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien auf eine Optimierung der Rückgewinnung der Ausbeuten, zur gezielteren Rückgewinnung von Lithiumverbindungen und ggfs. der Abtrennung und Nutzung von Graphit.

Das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderte Verbundprojekt MERCATOR¹³ der Partner Accurec Recycling GmbH (Verbundkoordination), IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen, CTG GmbH, UVR-FIA GmbH und Öko-Institut e.V. geht in einem umfassenden Forschungsansatz diese Zielsetzungen an. In der

¹³ Projektwebseite: <https://accurec.de/mercator?lang=de>

folgenden Abbildung ist die Prozessroute des MERCATOR-Vorhabens, die im Mittelpunkt der F+E-Aktivitäten steht als Fließbild dargestellt (MERCATOR 2022).

Abbildung 3 Prozessschema des MERCATOR-Projektes für LiB-Recycling



Im Rahmen der Untersuchungen des MERCATOR-Vorhabens zur dargestellten Prozesskette sind folgende wesentliche Arbeitsschwerpunkte hervorzuheben:

- Optimierung des Prozessmoduls „Thermische Deaktivierung und Li-Transformation“,
- Konzipierung und Realisierung der „Hydro-mechanischen Separation“,
- Untersuchung und Konzipierung der nachfolgenden Weiterverarbeitung bzw. Aufreinigungsschritte, mit den Detailschritten:
 - CO₂-Behandlung zur Gewinnung von Lithiumcarbonat,
 - Reinigung von Rohgraphit und Weiterverarbeitung zu z. B. Graphitbauteilen,

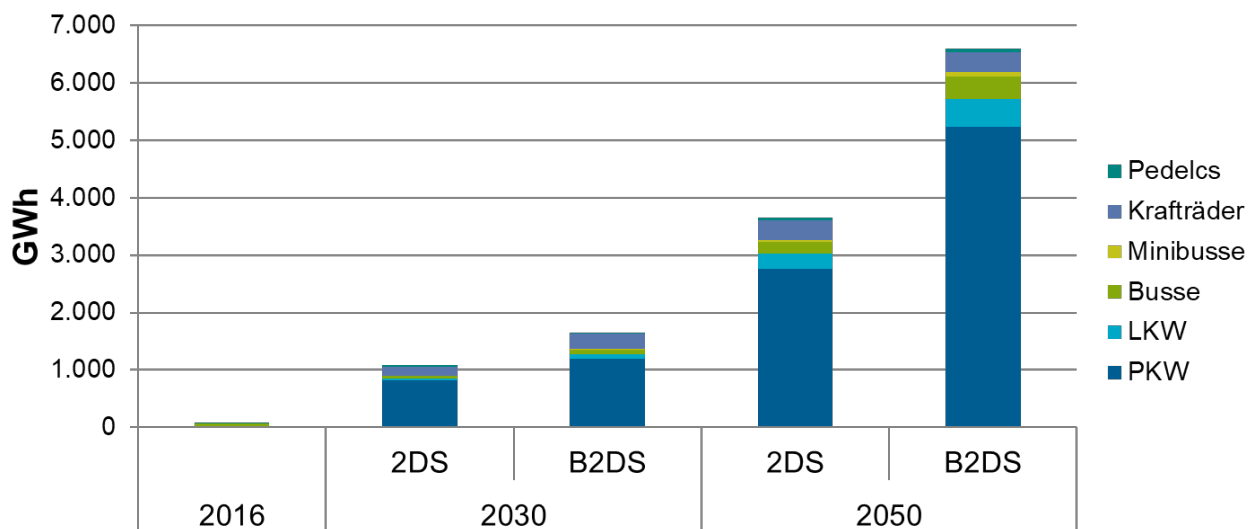
- Laugungs- und Fällungsschritte zur Gewinnung von Ni-, Co-, Mn- und Li-Salzen

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten innerhalb von MERCATOR werden von 2019 bis 2022 stattfinden und sollen maßgebliche Innovationen bzgl. des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus der Elektromobilität liefern. Das Öko-Institut wird zu den neuen Prozessrouten Ökobilanzen erstellen und den Partnern bereits während des Vorhabens wichtige Detailinformationen zur ökologischen Bewertung der Prozessmodulen liefern.

4. Ausblick

Der globale Vormarsch der Elektromobilität wird nicht zuletzt auch für Europa erhebliche Konsequenzen auf Wertschöpfungsketten und Rohstoffbedarfe haben. Innerhalb des BMBF-Verbundvorhabens Fab4LiB wurden Szenarien für die globale Entwicklung der Mobilität – mit besonderem Schwerpunkt auf Elektromobilität – erstellt (Fab4LiB 2019). In der nachfolgenden Graphik ist für zwei Szenarien (2DS folgt einem 2-Grad-Ziel bis 2100 bzgl. der Erderwärmung durch die Emission von Treibhausgasen; B2DS ist das ambitionierte Szenario hinsichtlich der Reduktion von Treibhausgasen). Im B2DS erreicht der Energiesektor Klimaneutralität im Jahr 2060, um den künftigen Temperaturanstieg bis 2100 auf 1,75 °C zu begrenzen. In der nachfolgenden Abbildung ist der wachsende jährliche Bedarf an Produktionskapazitäten von Lithium-Ionen-Zellen zur Befriedigung der Nachfrage der Elektromobilität aufgeführt.

Abbildung 4: Projizierter jährlicher GWh-Bedarf der globalen Elektromobilität



Aus diesen Szenariodaten für die globale Produktion der Lithium-Ionen-Zellen wurden schließlich die globalen Rohstoffbedarfe für Schlüsselmaterialien errechnet (Fab4LiB 2019). In den drei nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse für Lithium, Kobalt und Nickel für das B2DS-Szenario aufgeführt.

Abbildung 5: Rohstoffbedarf in Tonnen Lithium im B2DS Szenario

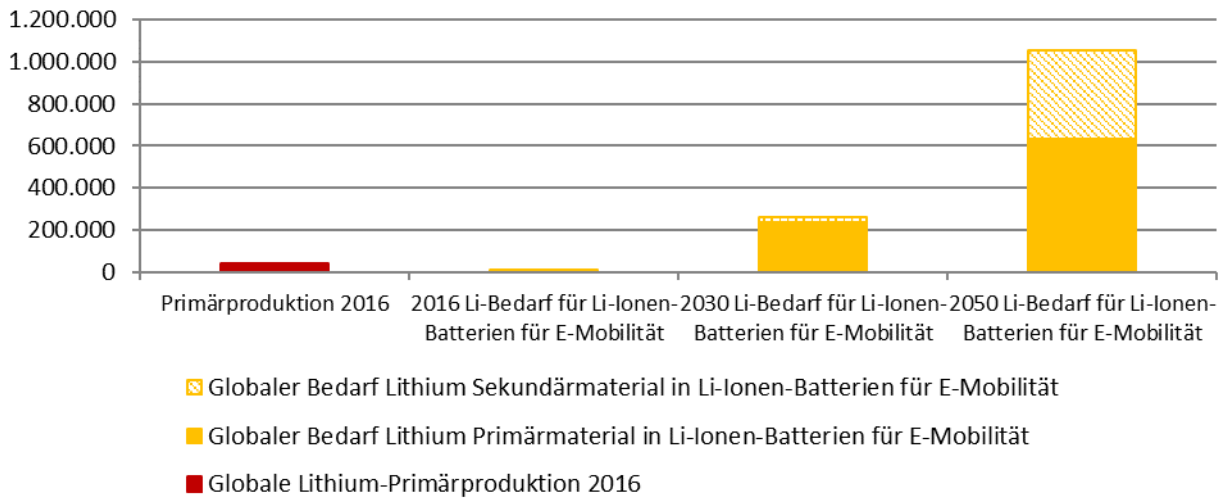


Abbildung 6: Rohstoffbedarf in Tonnen Kobalt im B2DS Szenario

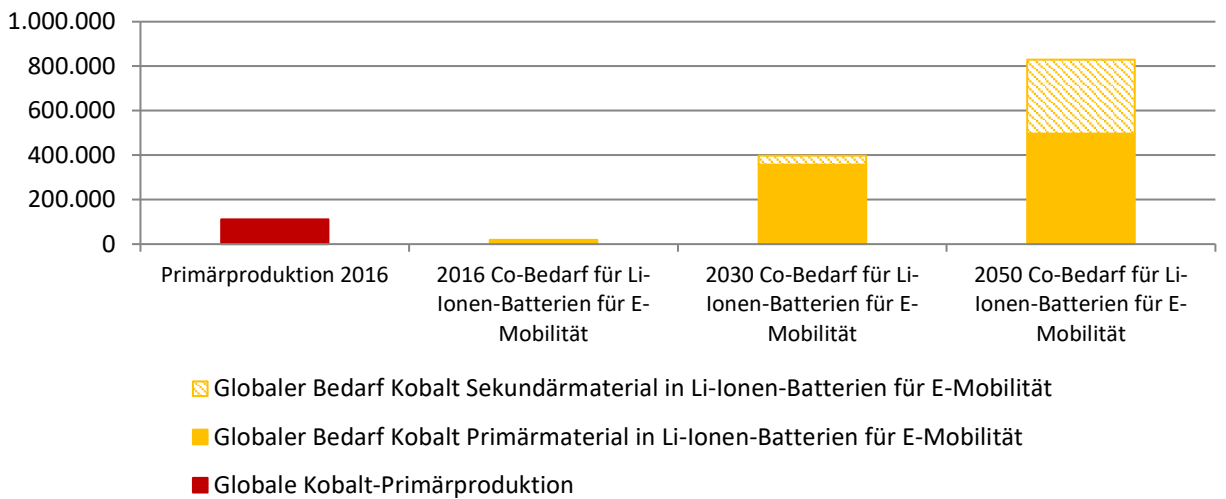
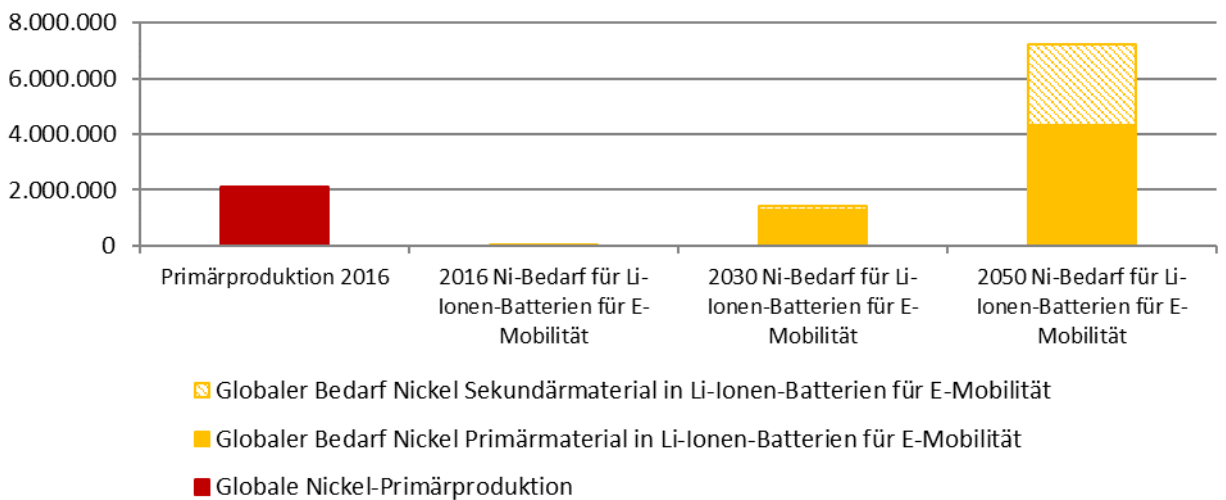


Abbildung 7: Rohstoffbedarf in Tonnen Nickel im B2DS Szenario



Aus den Graphiken gehen einerseits die erheblich wachsenden Rohstoffbedarfe bis 2030 und noch stärker bis 2050 hervor. Auf der anderen Seite zeigen die schraffierten Teilsäulen, dass bei einem ambitionierten Recycling von Lithium-Ionen-Batterien steigende Anteile der Rohstoffbedarfe für Lithium-, Kobalt- und Nickelverbindungen für neue Batteriezellen aus dem Recycling gewonnen werden können.

Da ein beträchtlicher Anteil des Marktwachstums der globalen Elektromobilität in Europa erwartet wird und in diesem Zusammenhang viele Gigafactories zur Produktion von Lithium-Ionen-Zellen in Europa aufgebaut werden sollen, kommt der Optimierung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien zur Stärkung einer umwelt- und sozialverträglichen Sekundärrohstoffquelle für Schlüsselmaterialien eine große strategische Bedeutung zu.

5. Quellen

- ACEA 2020 Fuel types of new cars: petrol +11.9%, diesel -3.7%, electric +80.5% in fourth quarter of 2019, ACEA – European Automobile Manufacturers Association, 06.02.2020, <https://www.acea.be/press-releases/article/fuel-types-of-new-cars-petrol-11.9-diesel-3.7-electric-81.3-in-fourth-quart>
- Buchert 2018 Buchert, M.: Elektromobilität – Ausgebremst durch Rohstoffmangel?, in Spektrum der Wissenschaft 7.18, Juli 2018.
- Bundesreg. 2019 Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, Ersteller BMU, Stand 08.10.2019.
- EcoBatRec 2016 Demonstrationsanlage für ein kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Li-Ion-Batterien der Elektromobilität“ (Projektwebseite: <http://www.ecobatrec.de/index.html>), gefördert durch das BMU, Berlin 2016.
- E-Auto News 2019 BASF, Eramet und SUEZ erarbeiten Kreislaufsystem für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien, Elektroauto News, 18.9.2019, <https://www.elektro-auto-news.net/2019/basf-eramet-suez-kreislaufsystem-recycling-lithium-ionen-batterien/>
- Fab4Lib 2019 Buchert, M.; Dolega, P.: Gigafactories für Lithium-Ionen-Zellen - Rohstoffbedarfe für die globale Elektromobilität bis 2050, Kurzstudie im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes Fab4Lib - Erforschung von Maßnahmen zur Steigerung der Material- und Prozesseffizienz bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Batteriezellen über die gesamte Wertschöpfungskette, Förderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Berlin, Januar 2019.
- Handelsblatt 2019 Europa startet Aufholjagd bei E-Auto-Batterien: EU-Kommission genehmigt Milliarden-Beihilfen, Handelsblatt online-Ausgabe vom 09.12.2019, <https://www.handelsblatt.com/politik/international/freigabe-der-eu-kommission-europa-startet-aufholjagd-bei-e-auto-batterien-eu-kommission-genehmigt-milliarden-beihilfen/25314166.html>
- LiBRi 2011 Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – Lithium-Ionen Batterierecycling Initiative – LiBRi“ (Abschlussbericht abrufbar unter http://erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-libri_1.pdf), gefördert durch das BMU, Berlin 2011.

- LithoREC I 2012 Recycling von Lithium-Ionen-Batterien _LithoRec I (Abschlussbericht abrufbar unter <https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-lithorec.pdf>), gefördert durch das BMU, Berlin 2012.
- LithoREC II 2016 Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – LithoRec II (Abschlussbericht abrufbar unter http://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/Abschlussbericht_LithoRec_II_20170116.pdf), gefördert durch das BMU, Berlin 2016.
- MERCATOR 2022 Sojka, R. et al.: Material Effizientes Recycling für die Circular Economy von Automobilspeichern durch Technologie Ohne Reststoffe – MERCATOR, Verbundprojekt der Partner Accurec Recycling GmbH (Verbundkoordination), IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen, CTG GmbH, UVR-FIA GmbH, Öko-Institut e.V.; gefördert mit Mitteln des BMU, Berlin 2019 – 2022.
- Ramboll et al. 2020 Stahl, H.; Mehlhart, G.; Dolega P.; Buchert, M.; Sutter, J. et al.: Assessment of options to improve particular aspects of the EU regulatory framework on batteries, Ramboll in association with Oeko-Institut and Environment Agency Austria, commissioned by European Commission, DG Environment, Brussels 2020 (ongoing).
- Šefčovič 2019 „Šefčovič prophezeit einen ‘Airbus für Batterien, für 5G, KI und Green Tech‘“, Interview mit Maroš Šefčovič, Vizepräsident der Europäischen Kommission in EURACTIVE am 27. Sept. 2019; <https://www.euractiv.de/section/all/news/sefcovic-prophezeit-einen-airbus-fuer-batterien-fuer-5g-ki-und-green-tech/>
- Sojka 2020 Sojka, R., Sichere Verwertung von Li-Ion Batterien durch thermische Konditionierung, R. Sojka (Accurec Recycling GmbH), Berliner Recycling und Sekundärrohstoffkonferenz 3.3.2020.
- Trinomics et al. 2020 Vermeulen, J., Buchert, M. Stahl, H., Mehlhart, G. et al.: Study to identify and assess the feasibility of measures to enhance the impact of Directive 2006/66/EC on the protection of the environment, on the promotion of circular economy and on the smooth functioning of the internal market, Trinomics B.V. in association with Oeko-Institut, commissioned by European Commission – DG Environment, Brussels 2020 (ongoing).
- Weyhe/Buchert 2019 Weyhe, R. (Accurec Recycling); Buchert, M. (Öko-Institut e.V.): Der Weg zu Sekundärrohstoffen: Risiken und Potenziale, Vortrag auf der Lithiumbatterie-Konferenz, 21. Januar 2019, Frankfurt a. Main, Deutschland.