



Berg Huettenmaenn Monatsh
<https://doi.org/10.1007/s00501-023-01368-x>
© Der/die Autor(en) 2023

BHM Berg- und
Hüttenmännische
Monatshefte

COMET Module FuLIBatteR – Auf der Suche nach der besten Lösung für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien der Zukunft

Bettina Rutrecht¹, Johannes Rieger¹ und Thomas Nigl²

¹K1-MET GmbH, Linz, Österreich

²Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

Eingegangen 3. Mai 2023; angenommen 22. Mai 2023

Zusammenfassung: FuLIBatteR, ein Modul (bestehend aus drei Sub-Projekten) koordiniert vom metallurgischen Kompetenzzentrum K1-MET GmbH, und gefördert im Rahmen des österreichischen Kompetenzzentrums COMET der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG), untersucht in Zusammenarbeit mit internationalen Partnern aus Industrie und Wirtschaft die Steigerung der Recyclingfähigkeit von Lithium-Ionen-Batterien (LIB). Im Fokus steht dabei die Rückgewinnung von Wertmetallen wie Aluminium, Kupfer, Kobalt, Mangan und Nickel und der kritischen Rohstoffe Lithium, Phosphor, Silizium und Graphit. Am Ende des Moduls mit einer Laufzeit von vier Jahren wird die Weiterentwicklung und Kombination bestehender LIB-Behandlungsverfahren aus den Bereichen Pyrometallurgie, (Bio-)Hydrometallurgie und mechanisch-physikalischer Aufbereitung erwartet, welche zu einer Best-Practice-Behandlungsrouten führen kann. Diese optimierte Route wird am Ende der Projektzeit einer ökologischen Bewertung im Vergleich zum bestehenden Referenzverfahren (LIBRES/REDUX) unterzogen, um Maßnahmen brach liegender Verbesserungspotentiale für das LIB-Recycling aufzuzeigen. Stoffkreisläufe kritischer Rohstoffe werden geschlossen und die Versorgungssicherheit der darauf angewiesenen Industriezweige verbessert. Durch die Bewertung ökologischer Auswirkungen werden Daten generiert, die bisher nicht oder kaum öffentlich zugänglich waren. Das ermöglicht die Diskussion über ökologisch sinnvolles LIB-Recycling im Sinne einer nachhaltigen Produktion.

Schlüsselwörter: Lithium-Ionen-Batterien, Kritische

T. Nigl (✉)
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft,
Montanuniversität Leoben,
Franz-Josef-Straße 18,
8700 Leoben, Österreich
Thomas.nigl@unileoben.ac.at

Rohstoffe, Ökobilanz, LCA, Verantwortungsvolle Produktion, Mechanische Aufbereitung, Pyrometallurgie, Hydrometallurgie, Zero Waste, Nachhaltigkeit

COMET Module FuLIBatteR—Searching for the Best Solution for the Future Recycling of Lithium-ion Batteries

Abstract: FuLIBatteR, a module (comprising three sub-projects) coordinated by the metallurgical competence centre K1-MET GmbH and funded within the framework of the Austrian competence centre COMET of the Austrian Research Promotion Agency (FFG), investigates the increase of the recyclability of lithium-ion batteries (LIBs) in cooperation with international partners from industry and science. The main focus is on the recovery of valuable metals aluminium, copper, cobalt, manganese, and nickel, as well as the critical raw materials, such as lithium, phosphorus, silicon, and graphite. The immediate result at the end of the module with a four-year duration is the further development and combination of existing LIB treatment processes from the fields of pyrometallurgy, (bio-)hydrometallurgy, and mechanical-physical pre-treatment into a best-practice treatment route. At the end of the project period, this optimized route will be subjected to an ecological evaluation in comparison to the LIBRES/REDUX reference process to identify measures of untapped improvement potential for LIB recycling. Material cycles of critical raw materials are closed and the security of supply of the industries that depend on them is improved. By evaluating the ecological impacts, data is generated that was previously not or hardly publicly accessible. This enables the discussion of ecologically sensible LIB recycling in terms of sustainable production.

Keywords: Lithium-ion batteries, Critical raw materials, Ecological impact, LCA, Responsible production, Pyrometallurgy, Hydrometallurgie, Bioleaching, Physical processing, Zero-waste, Sustainability

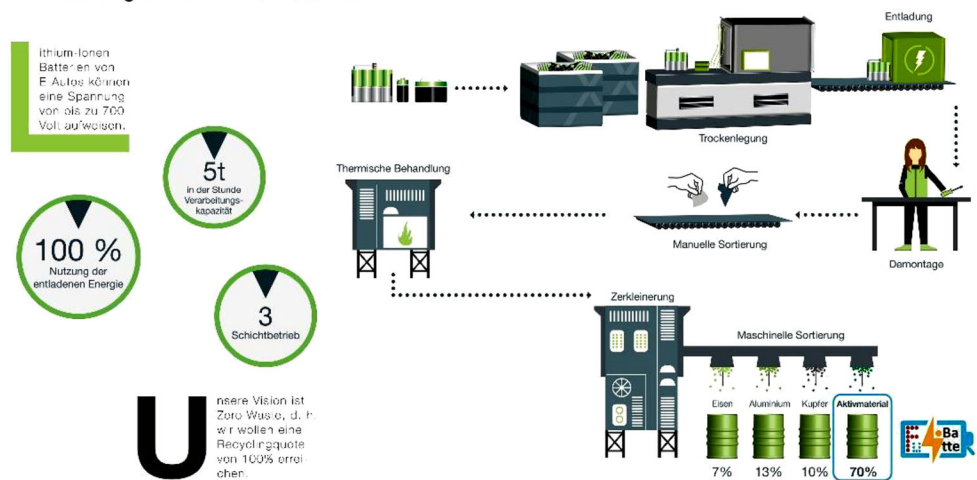
1. Einleitung

Je mehr Lithium-Ionen-Batterien (LIB) durch die E-Mobilität zum Einsatz kommen, desto schwieriger wird es, die dafür notwendigen Rohstoffe zu beschaffen. Eine Möglichkeit, den Bedarf für die Produktion in Europa (EU) abzufedern, besteht im Recycling ausgedienter Energiespeichersysteme. Es gibt mehrere unterschiedliche Verfahren, die in diesem Bereich als Stand der Technik gelten. Momentan konkurrieren pyrometallurgische, hydrometallurgische und direkte Recyclingverfahren darum, sich am Markt durchzusetzen. Haupttreiber für Innovationen in diesem Bereich sind einerseits die anstehende Novelle der Europäischen Batterieverordnung, die nach einer höheren Sammelquote (65–70% für LIB) sowie einer höheren Recyclingquote (z. B. 90% Verwertung von Co, Cu und Ni, 35% Verwertung von Li im Jahr 2025 und noch höhere Ziele für 2030 [1]) verlangt. Andererseits erfordert der politische und gesellschaftliche Druck hinsichtlich grüner und emissionsarmer Technologien sowie die Ressourcenknappheit und die damit verbundenen steigenden Rohstoffpreise auf dem Hochtechnologiesektor innovative und nachhaltige Lösungen für eine gesteigerte Versorgungssicherheit. Die Produktion der LIB ist ressourcenintensiv, und einige Rohstoffe stammen aus Ländern mit einem hohen Risiko von Versorgungsengpässen [2]. Darüber hinaus ist die LIB-Produktion mit relevanten umwelt- und humantoxischen Auswirkungen verbunden, die es zu reduzieren gilt. Eine Wiederverwendung rückgewonnener Wertstoffe muss aber den Qualitätsanforderungen der Hersteller genügen [3, 4]. Hier ist die Forschung gefragt, innovative, effiziente und nachhaltige Recyclingverfahren zu entwickeln, die dies gewährleisten können.

Abb. 1: Schematische Darstellung der LIB-Aufbereitung

Ein ewiger KREISLAUF

Aufbereitung Lithium-Ionen Batterien



Mit unseren innovativen Verfahren sind wir der führende Batterie-Recycler weltweit. Diesen Vorsprung wollen wir zum Nutzen unserer KundInnen weiter ausbauen und gleichzeitig wertvolle Ressourcen schonen.

www.redux-recycling.com | www.saubermacher.at

1.1 Stand der Technik

Die Stand-der-Technik Batterie-Recyclingverfahren konzentrieren sich hauptsächlich auf die mechanische Behandlung mit optionaler vorheriger thermischer Zelldeaktivierung (Pyrolyse), wie zum Beispiel im Referenzprozess zur LIB-Aufbereitung der Firma REDUX respektive Saubermacher Dienstleistungs AG, (dargestellt in Abb. 1).

Die thermische Vorbehandlung erleichtert die spätere Handhabung durch Zerstörung des leicht entzündlichen Elektrolyten und versprödet das an den Elektrodenableiterfolien anhaftende Aktivmaterial. Das am Ende des Batterierecyclingprozesses gewonnene Aktivmaterial ist ein feinkörniges schwarzes Pulver (Korngröße $d_{50} < 50 \mu\text{m}$), das bis zu 70 Gew.-% der Batteriemasse ausmacht [5] (siehe Abb. 2).

Es besteht zum Großteil aus pulverförmigem Kohlenstoff (C) und enthält die kritischen Elemente Lithium (Li), Phosphor (P), Kobalt (Co), und Silizium (Si hauptsächlich aus neuen Elektrodenmaterialien) sowie weitere wirtschaftlich wichtige Metalle, wie Kupfer (Cu), Nickel (Ni) und Mangan (Mn) in unterschiedlichen Konzentrationen. Bisherige Forschungsarbeiten ergaben, dass je nach angewandter Methode der mechanischen Behandlung Unterschiede in der Zusammensetzung, den physikalischen Eigenschaften und dem Gehalt an Verunreinigungen vorliegen, was in den nachgeschalteten Recyclingprozessen zu berücksichtigen ist [6].

Nach der mechanischen Vorbehandlung wird das Aktivmaterial derzeit extern in pyrometallurgischen oder hydrometallurgischen Verfahrensrouten weiterverarbeitet. In kommerziellen pyrometallurgischen Verwertungswe-



Abb. 2: Aktivmasse aus dem LIB-Recycling

gen, wie zum Beispiel in Anlagen der Umicore NV/SA [7], werden die ausgedienten LIB ohne Vorbehandlung durch direkten Einsatz in Schächten pyrometallurgisch verarbeitet (Temperaturen von 300°C bis 1450°C). Organische Komponenten aus Plastik, Elektrolyt und Graphit werden als Reduktionsmittel und Energieträger genutzt. Das metallische Produkt des Schachtes enthält Cu, Co, Ni, Li und Spuren von Eisen (Fe). Da der Aufwand für die Metallrückgewinnung aus Schlacken hoch und der wirtschaftliche Nutzen eher als gering eingeschätzt wird, werden die in der Schlacke enthaltene Elemente Aluminium (Al), Si, Kalzium (Ca), Fe, Mn, Li und Seltene Erden (REE) nicht selektiv zurückgewonnen, sondern in der Regel auf Deponien entsorgt. Die darin enthaltenen Metalle können daher nicht in den Stoffkreislauf rückgeführt werden. Darüber hinaus ist eine Anwendung in der Bauindustrie, eine gängige alternative Anwendung in anderen Ländern, zum Beispiel als Straßenbaumaterial in Österreich durch gesetzliche Beschränkungen des Gesamtgehalts und Gehalts an leicht löslichen Stoffen nicht möglich (Auszug Grenzwerte Gesamtgehalt: Co 50 mg/kg TM, Ni 100 mg/kg TM, Cu 100 mg/kg TM) [8]. Bei der hydrometallurgischen Aufbereitung von Aktivmaterialien werden die Metalloxide gelöst, während der Graphit als fester Rückstand abgetrennt wird. Die Rückgewinnung von Graphit wird durch den prognos-

tizierten Anstieg der LIB-Produktion in Europa und dem bestehenden Versorgungsrisiko zunehmend wichtiger.

2. COMET Modul FuLIBatteR

Das von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) geförderte COMET-Modul FuLIBatteR (Details siehe Tab. 1) möchte das fehlende Bindeglied zur Schließung von Stoffkreisläufen und vorhandenen Datenlücken für Entscheidungsträger im Bereich LIB-Recycling sein. Das Projekt mit einer Laufzeit von vier Jahren (gestartet am 01.07.2022) hat das Ziel, unterschiedliche Rückgewinnungsmöglichkeiten von (kritischen) Rohstoffen aus dem Aktivmaterial von LIB zu untersuchen und neue Möglichkeiten der Recyclingeffizienzsteigerung aufzuzeigen. In drei Sub-Projekten beschäftigen sich wissenschaftliche und Unternehmenspartner aus Österreich, Deutschland und Großbritannien mit physikalischen (Sub-Projekt 1), pyrometallurgischen (Sub-Projekt 2) bis hin zu bio-hydrometallurgisch-elektrochemischen (Sub-Projekt 3) Aufbereitungsprozesse (siehe Abb. 3). Hauptaugenmerk liegt auf der Rückgewinnung der Elemente Li, Co, P, Graphit (laut EU als kritische Rohstoffe eingestuft), den Wertmetallen Ni, Co und Mn, sowie Si aus neuen LIB-Systemen. Alle Teilprojekte werden durch das Querschnittsthema der ökologischen Bewertung verbunden. Dabei soll ein Maßnahmenkatalog beziehungsweise eine Grundlage für Entscheidungsträger und Anlagenbetreiber im Sinne nachhaltiger Batterieproduktion und Batterierecycling entstehen.

2.1 Geplante Innovationen

FuLIBatteR wird ein wirtschaftlich sinnvolles und nachhaltiges LIB-Recycling ohne Deponierung von Abfällen ermöglichen. Daher sind Rückgewinnungsstrategien für wertvolle Materialien und Lebenszyklusanalysen Teil der künftigen Forschungsausrichtung. Darüber hinaus stellen Zero-Waste und nachhaltige Metallurgie neue Wege der Ressourceneffizienz dar, welche im Einklang mit den

TABELLE 1 Überblick COMET Modul FuLIBatteR	
Name	Beschreibung
Name	FuLIBatteR – Future Lithium Ion Battery Recycling for Recovery of Critical Raw Materials
Leitung	K1-MET GmbH, Linz, Österreich
Dauer	01.07.2022–30.06.2026
Budget	3,75 Mio €
Beschäftigte	8 VZÄ, davon 7 Wissenschaftler*innen
Konsortium (13 Partner aus AT, DE, und UK)	

Abb. 3: Projektskizze COMET Modul FuLIBatteR. (MFA Material Flow Analysis, LCA Life Cycle Assessment)

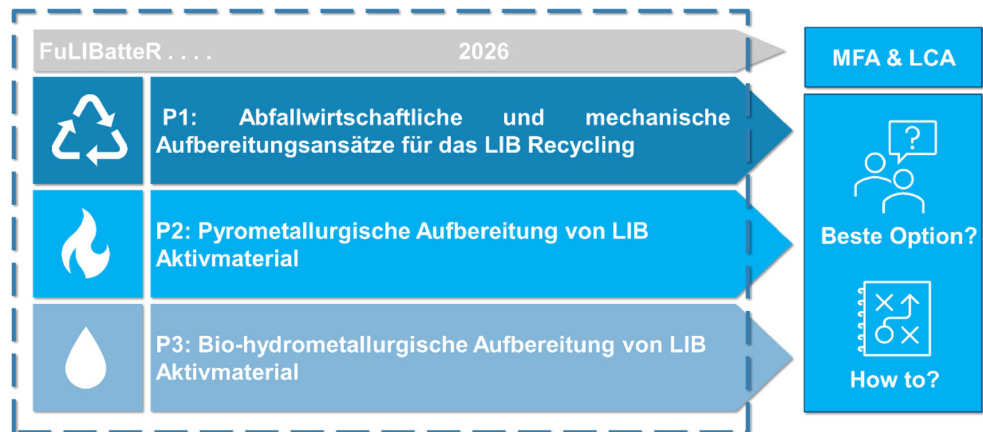


TABELLE 2
Vergleich Stand der Technik und der geplanten Innovationen durch Modul FuLIBatteR

Prozess	Stand-der-Technik	Innovation durch FuLIBatteR
Thermische Vorbehandlung von LIB	Wahlweise zur Deaktivierung von LIBs für eine bequemere thermische Handhabung des Materials	Erforschung der Wechselwirkung zwischen den Materialeigenschaften und den Betriebsparametern der thermischen Vorbehandlung und deren Einfluss auf nachgeschaltete Prozesse (Experimente im Labormaßstab, CFD-Simulation)
Pyrometallurgie	Ein Standardverfahren zur Behandlung von LIB Flexibel in Bezug auf die Zusammensetzung des LIB-Inputs Rückgewinnung von Co, Ni, Cu Kohlenstoff geht als CO ₂ -Emission verloren Li, Al und teilweise Mn gehen in der Schlacke verloren	Etablierung der Li-Rückgewinnung aus Abgasen Forschung zur Steigerung des thermischen Wirkungsgrads Intelligentes Schlackendesign zur Verringerung von Metallverlusten Entfernung von graphitreichem Konzentrat vor der pyrometallurgischen Behandlung Wissenschaftlicher Lead: Montanuniversität Leoben – Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik
Hydrometallurgie	Ein Standardverfahren zur Behandlung von Aktivmaterial oder von Rückständen aus pyrometallurgischen Behandlungsverfahren Kohlenstoff geht als Rückstand verloren	C-Rückgewinnung durch Schaumflotation und nachfolgender magnetischer Behandlung Optionale Si-Rückgewinnung als Nebenprodukt der magnetischen Dichtentrennung
Flotation	Standardprozess bei der Erzaufbereitung Getestet an mechanisch behandelten LIB-Zellen	Thermisch vorbehandeltes Aktivmaterial als Input Unterschiedliche LIB-Typen als Input Kaskadische Nutzung von Prozesswasser als Input in bioelektrochemischen Systemen Recycling von Li und P aus Prozesswasser unter Verwendung von natürlich vorkommendem Zeolithen und Strippen Wissenschaftlicher Lead: UVR-FIA GmbH, Montanuniversität Leoben Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes
Bio-Laugung	Ähnlich der hydrometallurgischen Behandlung, jedoch mit Mikroorganismen, zur Lösung von Metallen Hauptanwendungsgebiet ist die Aufbereitung von Mineralerzen	Aktivmaterial aus LIB als neues Einsatzmaterial Erforschung geeigneter Mikroorganismen (Reinkultur, Co-Kultur) Wissenschaftlicher Lead: acib GmbH, BOKU Universität für Bodenkultur Wien, Universität Coventry, K1-MET GmbH
Elektrolyse	Standardmethode zur Reduktion von Metallen (z. B. Al) Energieintensive Anwendung	Erforschung von bio-elektrochemischen Systemen als Alternative Null bis geringer Energieverbrauch
Umweltauswirkung	Wenig bis keine öffentlichen Daten verfügbar	Ökobilanz und MFA zur Erhellung der ökologischen Sinnhaftigkeit von Behandlungsschritten und als Grundlage für ökologisch vertretbare Entscheidungen im Einklang mit erreichbaren Entwicklungszielen Wissenschaftlicher Lead: Montanuniversität Leoben Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, K1-MET GmbH

nachhaltigen Entwicklungszielen der Vereinten Nationen [9] stehen. Ziel ist es, die Recyclingrate von End-of-Life (EoL)-LIB-Systemen aus verschiedenen Bereichen (Automobil, stationäre und portable Speichermedien) durch eine möglichst selektive Rückgewinnung hochreiner Sekundärrohstoffe aus Aktivmaterialien über den Stand der Technik hinaus zu erhöhen. Die Forschungsarbeiten zum Grundsatznachweis in den Bereichen der physikalischen, pyrometallurgischen und bio-hydrometallurgischen Behandlung werden zu Experimenten im Labormaßstab führen, die in den Technologiereifegrad (Technological readiness level – TRL) 4 münden sollen.

Im Folgenden wird beschrieben, wie die vorhin genannten Zielmaterialien rückgewonnen werden. Co als Teil einer pyrometallurgisch hergestellten Legierung, ausgefällt als Hydroxid aus der Biolaugungslösung oder nach der Peptidanreicherung und in metallischer Form in einem bioelek-

trochemischen System. Durch Schaumflotation mit nachfolgender nassmagnetischer Trennung wird C zurückgewonnen. Li wird nach der Behandlung des Flotationsabwassers durch natürliche Zeolith-Redesorption, nach der Abgasbehandlung in der Pyrometallurgie und nach der Biolaugung zurückgewonnen. P wird in einem induktiv beheizten Koksreaktor in das Abgas überführt und in der Abgasbehandlung durch eine Gaswäsche zurückgewonnen und bei der Behandlung des Flotationsabwassers durch Redesorption von natürlichem Zeolithen zurückgewonnen. Si-Metall wird als Teil von Batteriezellentypen der neuen Generation nach der Schaumflotation oder als Nebenprodukt der nas- sen Magnetabscheidung aus festen Metalloxidrückständen abgetrennt (siehe Tab. 2).

TABELLE 3

Die sechs Aspekte der Zielsetzung der LCA nach dem JRC ILCD Leitfaden für FuLIBatteR [10]

Nr	Aspekt der Zieldefinition	Kategorie	Anwendung in der Ökologischen Bewertung
1	Beabsichtigte(r) Verwendungszweck(e) der Ergebnisse	a. Vergleich einer bestimmten Dienstleistung b. Strategieentwicklung: Vorhersage und Analyse der Umweltauswirkungen allgegenwärtiger Technologien, Rohstoffstrategien usw	a. Vergleich verschiedener LIB-Recyclingprozesse b. Recycling von kritischen Rohstoffen
2	Limitierungen auf Grund der Methode, Annahmen und Einschränkung der Auswirkungen	a. Das untersuchte System b. Geographische Beschränkung c. Produkte	a. Beschränkung auf die Erforschung der Umweltauswirkungen des Recyclings von LIB; es wird davon ausgegangen, dass die Rohstoffgewinnung, die Produktions- und Nutzungsphase von LIB im Durchschnitt für alle EoL-LIB ähnlich ist und keinen signifikanten Beitrag zur Gesamtdarstellung in dem gewählten Betrachtungsraum liefert b. Die Europäische Union c. Annahme eines für den EU-Elektromobilitätsmarkt typischen LIB-Typs
3	Gründe für die Durchführung der Studie und Entscheidungskontext	a. Treiber und Motivation	a. Quantifizierung von Umweltauswirkungen untersuchter LIB-Recyclingprozesse b. Unterstützung bei der Entscheidung über nicht bindende Empfehlungen für eine ökologisch bevorzugte künftige Handhabung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien in der Europäischen Union
4	Zielpublikum für die Ergebnisse	a. Intern b. Extern c. Technisch d. Nicht technisch	a. Intern werden alle Stakeholder des Projekts FuLIBatteR adressiert b. Das externe Zielpublikum sind die Hauptakteure des LIB-Recycling- und Abfallwirtschaftssektors in der EU sowie die wissenschaftliche Gemeinschaft und die politischen Entscheidungsträger auf Regierungsebene c. Es wird davon ausgegangen, dass alle Ergebnisse von einem wissenschaftlich gebildeten Publikum interpretiert werden d. Trifft im ersten Schritt nicht zu
5	Vergleichende Studien, die der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden müssen	a. Verbreitungsstrategie für das externe Fachpublikum b. Verbreitungsstrategie für externes nicht technisches Publikum	a. Die Studie enthält vergleichende Aussagen und soll der Öffentlichkeit in Form von Zeitschriftenartikeln, Konferenzbeiträgen und Präsentationen zugänglich gemacht werden b. Die Ergebnisse werden verdichtet, um eine umfassende Wissensvermittlung in öffentlichen Vorträgen für ein interessiertes, nichttechnisches Publikum zu ermöglichen
6	Auftraggeber der Studie und andere Einflussfaktoren	a. Finanzierung b. Interessenvertreter c. Experten, die die Studie durchführen	a. Das Projekt wird von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG), zwei österreichischen Bundesministerien (BMK, BMAW) und den Projektbeteiligten von FuLIBatteR finanziert. b. Alle Projektbeteiligten werden in den Danksagungen erwähnt c. Die Autorin ist Doktoratsanwärterin bei K1-MET GmbH und führt die Ökobilanz nach bestem Wissen und Gewissen durch; Die kritische Prüfung wird von zwei Ökobilanzexperten durchgeführt. Einer vom Lehrstuhl für Abfallverwertung und Abfallwirtschaft und ein weiterer von TÜV SÜD, die auch Projektbeteiligte sind

3. Nachhaltigkeitsbewertung

Neben der (Über)Erfüllung der geplanten Recyclingziele ist die Gestaltung von nachhaltigen Prozessen für eine effiziente Sekundärrohstoffrückgewinnung oberstes Ziel. Die in den Subprojekten des Moduls FuLiBatteR geplanten Innovationen werden daher einer ökologischen Bewertung unterzogen. Dies ist ein effizientes und umfangreiches Werkzeug, um die Nachhaltigkeit von Produkten oder Prozessen zu bewerten und vergleichbar zu machen. Die ISO-Normen 14040 und 14044 bieten einen wichtigen Rahmen für die Ökobilanzierung. Die Anwender der Ökobilanzierung haben aber den Spielraum, eine Reihe wichtiger Entscheidungen, die individuell interpretiert werden können, selbst zu treffen, was zu Unterschieden in der Konsistenz, Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit der Bewertungsergebnisse führt. Auch die methodischen Annahmen, die den Lebenszyklusdaten zugrunde liegen, können sehr unterschiedlich sein, so dass die Daten aus verschiedenen Quellen nicht miteinander kompatibel sein können. Aus diesen Gründen wurde beschlossen, im Modul FuLiBatteR, gemäß den Regeln des Handbuchs, herausgegeben vom Europäischen Joint Research Center (JRC), zu folgen bezüglich ökologischer Bewertungen (ILCD, [10]). In Tab. 3 werden die Überlegungen hinsichtlich Zielsetzung der ökologischen Bewertung dargestellt. Im nächsten Schritt sollen der Betrachtungsraum und die zu erhebenden Daten festgelegt werden.

Forschungsfrage 1: Inwiefern lassen sich die LIB-Recyclingquoten in den drei Verfahrensbereichen Aufbereitung, Pyrometallurgie und Biohydrometallurgie im Vergleich zum gewählten Referenzverfahren durch die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse steigern?

Forschungsfrage 2: Wie wirken sich die untersuchten LIB-Recyclingverfahren auf die Umwelt aus und welches ist im Vergleich als am ökologisch vorteilhaftesten zu bewerten?

Danksagung. Das Modul FuLiBatteR wird im Rahmen von COMET (Competence Center for Excellent Technologies), dem österreichischen Programm für Kompetenzzentren, unterstützt. COMET wird aus Mitteln des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, des Bundesministeriums für Arbeit und Wirtschaft, der Länder Oberösterreich und Steiermark sowie der Steirischen Wirtschaftsförderungsgesellschaft (SFG) finanziert. Darüber hinaus unterstützt die Upper Austrian Research GmbH das Modul. Neben der öffentlichen Förderung durch COMET wird dieses Forschungsprojekt von den Unternehmenspartnern Audi AG, BRAIN Biotech AG, Ebner Industriefabrik GmbH, RHI Magnesita GmbH, Saubermacher Dienstleistungs AG, TÜV SÜD Landesgesellschaft Österreich GmbH und voestalpine High Performance Metals GmbH sowie von den wissenschaftlichen Partnern acib GmbH, Universität Coventry, Montanuniversität Leoben, BOKU Universität für Bodenkultur Wien und UVR-FIA GmbH mitfinanziert.

Funding. Open access funding provided by Montanuniversität Leoben.

Interessenkonflikt. B. Rutrecht, J. Rieger und T. Nigl geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. European Commission: Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020, S. 130 (2020)
2. European Commission: Green Deal: Sustainable batteries for a circular and climate neutral economy (2020)
3. Mohr, M., Peters, J.F., Baumann, M., Well, M.: Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes. *Ind. Ecol.* **24**(6), 1310–1322 (2020)
4. Unterreiner, L., Jülch, V., Reith, S.: Recycling of battery technologies—Ecological impact analysis using life cycle assessment (LCA). *Energy Procedia* **99**, 229–234 (2016)
5. Arnberger, A., Rutrecht, B., Coskun, E.: Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. In: Thomé-Kosmiensky, T.V.K. (Hrsg.) *Recycling und Rohstoffe* (2018)
6. Windisch-Kern, S., Gerold, E., Nigl, T., Jandric, A., Altendorfer, M., Rutrecht, B., Scherhauser, S., Part, F.: Recycling chains for lithium-ion batteries: A critical examination of current challenges, opportunities and process dependencies. *Waste Manag.* **138**, 125–139 (2021)
7. Buchert, M., Sutter, J.: Stand und Perspektiven des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus der Elektromobilität. Ökoinsitut e.V., Darmstadt (2020)
8. BMLFUW: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Pflichten bei Bau- oder Abbruchtätigkeiten, die Trennung und die Behandlung von bei Bau- oder Abbruchtätigkeiten anfallenden Abfällen, die Herstellung und d. BGBl. II, Bd. 181/2015. (2015)
9. United Nations: Sustainable development goals. <https://sdgs.un.org/goals>, Zugegriffen: 11. Apr. 2023
10. Joint Research Center: ILCD handbook. Europäische Kommission, Brüssel (2010)

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.