

Nachhaltiges Recycling von Traktionsbatterien

Forschungsansätze im Kompetenzcluster Recycling & Grüne Batterie (greenBatt)

Christoph Herrmann, Mark Mennenga, Alexander Kaluza, TU Braunschweig, Bernd Friedrich, Elinor Rombach, RWTH Aachen University, Alexander Michaelis, Mareike Partsch und Constantin Wolf, Fraunhofer IKTS

Sustainable Recycling of EV Traction Batteries

In the course of the shift to electromobility, the use of battery cells as energy storage is facing exponential growth. The goal in research and industry is to design the entire life cycle of these battery cells in the light of global sustainability goals and to ensure the necessary supply of raw materials. In this context, the establishment of efficient recycling technologies plays a central role. In particular, there is a need for research into the further development of process routes according to technological, ecological, economic and social criteria. The competence cluster Recycling & Green Battery (greenBatt) addresses these challenges in 15 research projects. This article presents overarching solution approaches and project highlights.

Keywords:

traction batteries, recycling, process technology, digitalization, life cycle engineering

Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann leitet das Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik an der Technischen Universität Braunschweig sowie das Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST.

Dr.-Ing. Mark Mennenga ist stellvertretender Leiter und Abteilungsleiter System of Systems Engineering am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik an der Technischen Universität Braunschweig.

Alexander Kaluza, M. Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik an der Technischen Universität Braunschweig.

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Bernd Friedrich ist Institutsleiter des IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen University.

Dr.-Ing. Elinor Rombach arbeitet als wissenschaftliche Angestellte und Lehrbeauftragte am IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen University.

Prof. Dr. rer. nat. Alexander Michaelis leitet das Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS Dresden und ist Lehrstuhlinhaber am Institut für Werkstoffwissenschaft der TU Dresden.

Dr.-Ing. Mareike Partsch ist Abteilungsleiterin Mobile Energiespeicher und Elektrochemie am Fraunhofer IKTS Dresden.

Dipl.-Ing. Constantin Wolf ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Mobile Energiespeicher und Elektrochemie am Fraunhofer IKTS Dresden.

c.herrmann@tu-braunschweig.de
www.tu-braunschweig.de/iwf/nplce
www.greenbatt-cluster.de

Im Zuge des Wandels zur Elektromobilität steht die Nutzung von Batteriezellen als Energiespeicher vor einem exponentiellen Wachstum. Ziel in Forschung und Industrie ist es, den gesamten Lebenszyklus dieser Batteriezellen vor dem Hintergrund globaler Nachhaltigkeitsziele zu gestalten und die notwendige Rohstoffversorgung sicherzustellen. Hierbei kommt der Etablierung leistungsfähiger Recyclingtechnologien eine zentrale Rolle zu. Insbesondere besteht Forschungsbedarf in der Weiterentwicklung von Prozessrouten nach technologischen, ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Kriterien. Das Kompetenzcluster Recycling & Grüne Batterie (greenBatt) adressiert diese Herausforderungen in 15 Forschungsprojekten. Dieser Beitrag stellt übergreifende Lösungsansätze und Projekthighlights vor.

Leistungsfähige Energiespeicher sind eine Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität und für das Erreichen der gesteckten Klimaziele. Nach Szenarien der EU kann die jährliche benötigte Kapazität an Batteriezellen allein für Elektromobilität von derzeit 77 GWh auf 4.000 GWh im Jahr 2040 anwachsen [1]. Um einen Betrag zur Erreichung globaler Nachhaltigkeitsziele zu leisten, müssen diese Energiespeicher nicht nur technisch-wirtschaftlich, sondern auch im Hinblick auf ökologische und soziale Nachhaltigkeit überzeugen. Eine zentrale Voraussetzung hierfür sind Rohstoffe für Batteriezellen, welche in Europa zu großen Teilen importiert werden müssen. Durch Etablierung einer Circular Economy könnte die Nachfrage nach Batteriematerialien 2030 bereits zu etwa 10% aus Rezyklaten gedeckt werden [2, 3]. Die Ausschöpfung der Potenziale effizienter Recyclingtechnologien zur Rückgewinnung dieser Materialien ermöglicht so die Realisierung nachhaltiger Batterielebenszyklen mit reduzierten CO₂-Emissionen. Parallel können internationale Wettbewerbsvorteile durch die Senkung der Abhän-

gigkeit von Materialimporten erschlossen werden [2].

Nachhaltiges Recycling von Traktionsbatterien

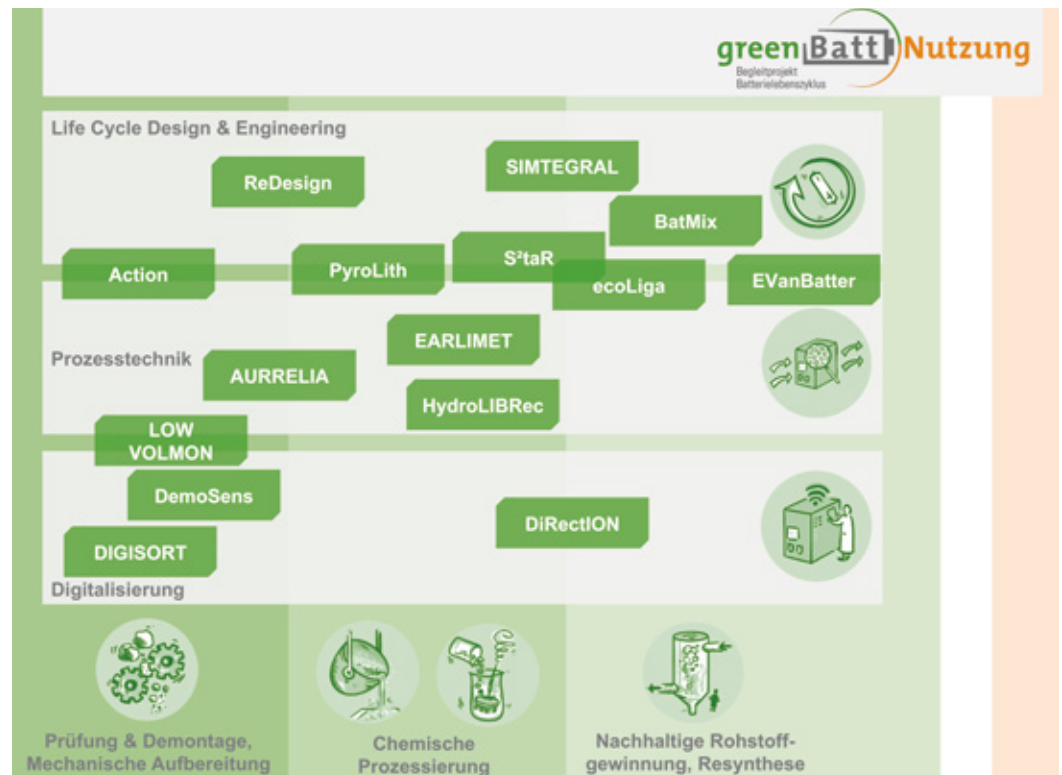
Recyclingprozessketten für Traktionsbatterien kombinieren verschiedene Prozessschritte. Diese umfassen Entlade- und Demontageprozesse, Prozesse für die Zerkleinerung, die mechanische Aufbereitung, die thermische Vorbehandlung sowie pyro- und hydrometallurgische Verfahren [4, 5]. Resyntheseprozesse ermöglichen zudem den Wiedereinsatz von Rezyklaten in der Batterieproduktion. Für das Recycling und die Resynthese können die zuvor genannten Prozessschritte in verschiedener Weise kombiniert werden [4, 5]. Hieraus resultieren verschiedene Prozessketten, welche in Konkurrenz hinsichtlich der Effizienz der Rückgewinnung einzelner Materialien sowie Wirtschaftlichkeit, sozialer Kriterien und resultierenden Umweltwirkungen stehen [4, 5]. Neben der Betrachtung von Batterien am Lebensende ist die Rückführung von Produktionsabfällen ein zentrales Thema, da durch den schnel-

len Markthochlauf von einer großen Verfügbarkeit dieser Materialien zu rechnen ist. Es wurden bereits vielschichtige Erkenntnisse für die industrielle Umsetzung nachhaltiger Batterien und ihres Recyclings hervorgebracht und teilweise in industrielle Anlagen umgesetzt. Jedoch bestehen weitere Forschungsbedarfe:

- Material- und variantenflexible, automatisierte Demontageverfahren
- Evaluierung der sicheren mechanischen Aufbereitung
- Optimierung der Materialausbeute und Reinheit der Produkte, sowie der Vermeidung von Abfällen und Abwässern in naschemischen und thermischen Prozessrouten
- Weiterentwicklung von Verfahren für die Aufnahme von Ausschüssen aus der primären Elektrodenfertigung
- Innovative Raffinationstechniken zur Rückführung der im Recycling generierten Produkte in die Fertigung neuer Batterien (Resynthese)
- Gestaltung nachhaltiger Wertschöpfungsketten basierend auf Detailmodellen der Energie- und Stoffströme für eine techno-ökonomische, soziale sowie ökologische Bewertung

Kompetenzcluster Recycling & Grüne Batterie (greenBatt)

Das im Jahr 2020 gestartete und langfristig angelegte Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“ ist Teil des Dachkonzepts „Forschungsfabrik Batterie“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Es bündelt die Erfahrungen, Kompetenzen und anlagentechnischen Infrastrukturen von 34 Forschungsinstituten in Deutschland, welche in 16 Forschungsprojekten zusammenarbeiten. Die aktuelle Projektphase bis Februar 2024 wird mit 30 Millionen Euro gefördert. Diese wird begleitet von einem Managementkreis, welcher sich aus Expertinnen und Experten aus der Industrie zusammensetzt. Bild 1 zeigt horizontal die Strukturierung des Clusters entlang der Prozesskette des Recyclings und der Resynthese zum Schließen von Stoffkreisläufen sowie vertikal die Verortung zu drei zentralen Forschungsfeldern:



- Life Cycle Design & Engineering (Koordination Prof. Christoph Herrmann, TU Braunschweig)
- Prozesstechnik (Koordination Prof. Bernd Friedrich, RWTH Aachen University)
- Digitalisierung (Koordination Prof. Alexander Michaelis, Fraunhofer IKTS)

Die Projekte sind interdisziplinär an den Schnittstellen zwischen mehreren Prozessen und Forschungsfeldern angesiedelt. Das Begleitprojekt greenBattNutzung führt Teilergebnisse aller Projekte zu einer Gesamtsystemanalyse technologischer, ökologischer und ökonomischer Aspekte des End-of-Life von Batterien zusammen. Zusätzlich besteht eine enge Schnittstelle zum Kompetenzcluster Batterienutzungskonzepte (BattNutzung). Dort werden zusätzlich Strategien der Zweitnutzung von Batterien betrachtet.

Im Folgenden werden die drei Forschungsfelder des Clusters greenBatt sowie ausgewählte Projekte vorgestellt.

Forschungsfeld Prozesstechnik

Ziel ist es, für ausgewählte Prozessabschnitte der Recyclingkette innovative Lösungen zu entwickeln, die dem folgenden Anforderungsprofil gerecht werden:

- Anpassungsfähigkeit an verschiedene Batteriesysteme,
- Best State of the Art hinsichtlich Prozess-

Bild 1: Forschungsfelder (vertikal) und Hauptprozesse (horizontal) im Kompetenzcluster greenBatt.

- qualität und Rückgewinnungsquoten,
- Ökonomische und ökologische Effizienz.

Die Komplexität der damit verbundenen Problematik verdeutlicht das in dem folgenden Bild gezeigte „battery wheel“: Aus der Vielzahl an Multi-Metall-Systemen innerhalb der beiden Prozessstufen des Batterierecyclings (innere Ringe in Bild 2) gilt es, die hierzu geeigneten mechanischen-, thermischen- und chemischen Einzelprozessmodule so anzupassen bzw. zu kombinieren, dass eine Integration in die bestehende Infrastruktur der Grundstoffproduktion (Ausgangsmaterialien, äußerer Ring in Bild 2) bestmöglich gelingt.

Das Ziel des hier exemplarisch vorgestellten Clusterprojekts EarLiMet (Early-Stage-Metallrückgewinnung für das energie- und ressourceneffiziente Recycling von Li-Ionen-Batterien) ist die Prozessentwicklung bis zum Demomaßstab (TRL 5/6) für eine frühzeitige nasschemische Lithiumentfernung inklusive eines hoch-effizienten stofflichen Recyclings für Kobalt, Kupfer, Nickel sowie anfallende Prozesschemikalien und -wässer. Hierdurch sollen Schwächen bestehender Recyclingprozesse beseitigt werden, wie

- kaum kostendeckendes Recycling zur Sicherstellung der zukünftigen Versorgung mit wichtigen Batterie-Rohstoffen (Rohstoffpreise, -verfügbarkeit von Co, Ni, Li, P, Cu, ...) [6,7],
- suboptimale Recyclingquoten insbesondere für Lithium (Verzettelung/Verlust innerhalb mehrstufiger Prozessabfolgen) [8,9],
- Prozesschemikalien und -wässer werden kaum rezykliert [10].

Die Motivation für das Clusterprojekt ecoLiga (Recycling und Resynthese von Kohlenstoffmaterialien aus Lithium-Batterien: Rückgewinnung, Aufbereitung, Wiedereinsatz und angepasstes Zelldesign) fokussiert sich dagegen auf Graphit, der z. B. für die Elektrodenherstellung von zukunftssträchtigen Lithium-Schwefel-Batteriesystemen essenziell ist. Obwohl dieser Batterierohstoff wegen der Abhängigkeit von China (mit 69 % Top 1 Förderer; mit 71 % Top 1 Reservenhalter [11]) von der EU als versorgungskritisch eingestuft ist, wird er derzeit nicht recycelt. Dies liegt insbesondere daran, dass ein Graphitrecycling in der neuen EU-Batteriedirektive nicht berücksichtigt wird und somit ein echter politischer Anreiz fehlt. Das Gesamtziel der entsprechenden Forschungsarbeiten ist:

- Optimierung/Erweiterung des Lithiumbatterie-Recyclings durch die Prozessmodule Thermische Behandlung und Nasschemische Aufreinigung,
- Erzeugung eines High-Grade-RE-Graphits und dessen Wiedereinsatz in Lithium-Ionen-Batterien oder erneut in Lithium-Schwefel-Batterien (Recycling/Resynthese),
- Ganzheitliche Prozessbewertung (Life Cycle Assessment).

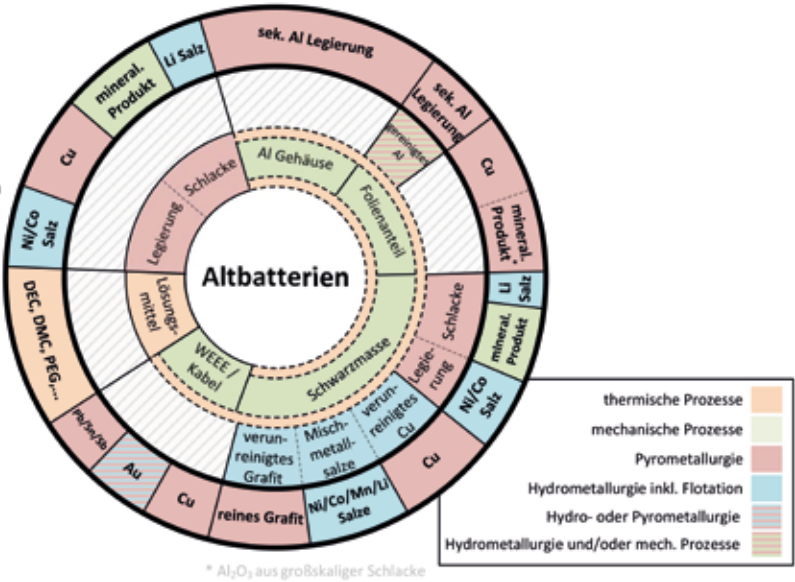
Diese zusätzlichen Anstrengungen zur Verbesserung der Recyclingeffizienz könnten durch eine angepasste Gesetzgebung manifestiert werden, z. B. durch eine Erweiterung der EU-Direktive mit einer Element Recovery Rate (ERR). Insofern besitzt dieses Projekt auch auf politischer Ebene richtungsweisendes Zukunftspotenzial.

Bild 2: Integrationsmöglichkeiten für Batterie-Recyclingprodukte in industrielle Wertschöpfungsketten der Metallherzeugung nach derzeitigem Stand der Technik [3].

innerer Ring:
1. Phase Batterierecycling

mittlerer Ring:
2. Phase Batterierecycling

äußerer Ring:
Ausgangsmaterial für Produktion



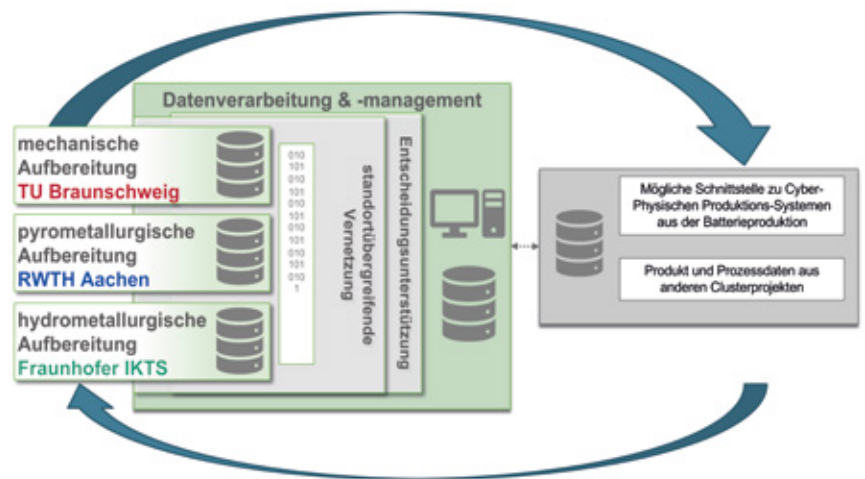
Forschungsfeld Digitalisierung

Ziel des Forschungsfelds ist es, Prozessschritte etablierter Recyclingrouten basierend auf Prozessdaten zu analysieren, um diese hinsichtlich technologischer, ökologischer und ökonomischer Zielgrößen weiterzuentwickeln. Eine enge Zusammenarbeit mit dem Forschungsfeld Prozesstechnik bildet die Grundlage zum Sammeln von Daten, um rekursiv Synergien mit der Prozesstechnik und dem Life Cycle Design & Engineering zu bilden. Kernfragen des Forschungsfelds sind:

- Konzeptionierung von Sensor- und Digitalisierungslösungen im industriellen Maßstab,
- Entwicklung von Auswertungsalgorithmen mithilfe des Data-Minings zum automatisierten Durchsuchen und Bewerten von Datensätzen,
- Aufbauen einer prozessübergreifenden Datenbasis des Batterierecyclings,
- Erstellung digitaler Zwillinge der Prozessmodule.

Beispielhaft für dieses Vorhaben ist das Projekt DiRection (Data-Mining im Recycling von Lithium-Ionen-Batteriezellen). Wie in Bild 3 dargestellt, werden parallel an verschiedenen Teilen der Prozessroute des Clusters Elemente der Datenerfassung installiert und Methoden der Datenverarbeitung etabliert, um folgende Fragen zu beantworten:

- Durch welche Strategien der Datenerfassung und -verarbeitung können Zielgrößen



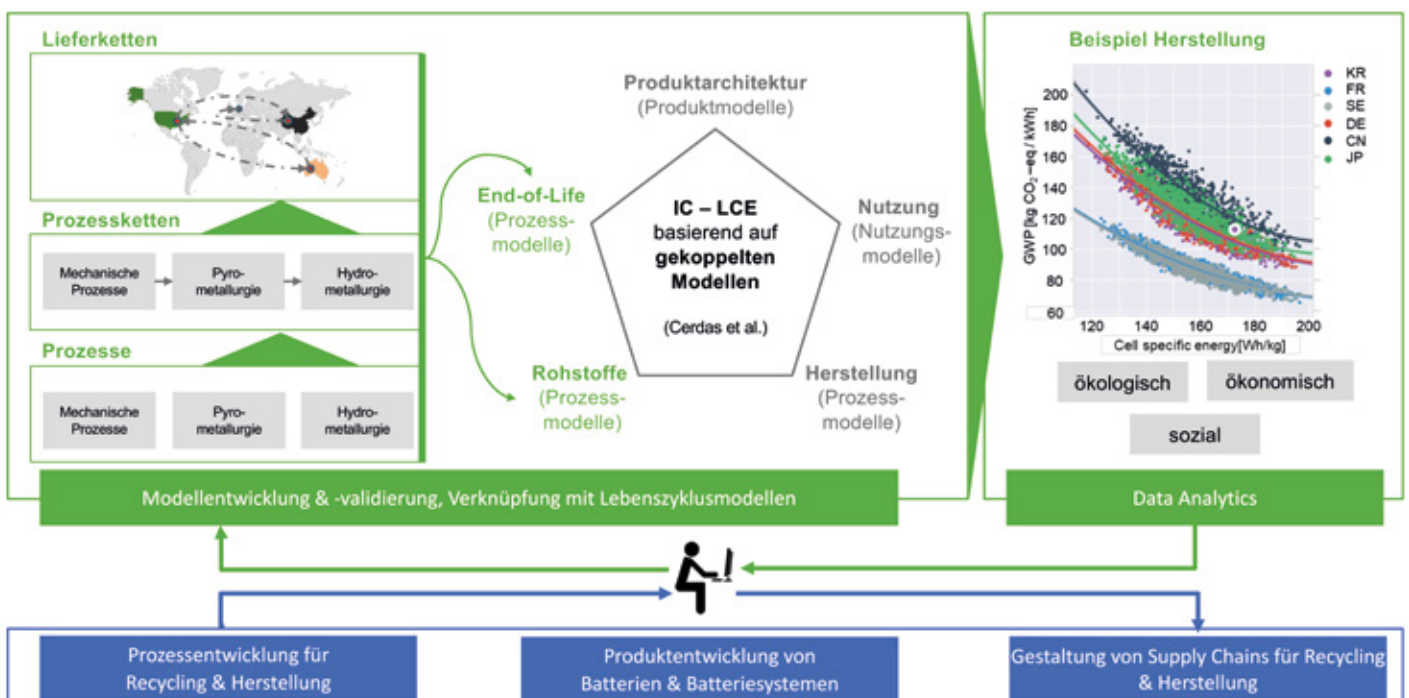
der Effizienz und Qualität mess- und bewertbar gemacht werden?

- Welche Prozesse haben den größten Einfluss auf Material- und Energieeffizienz?
- Welche Potenziale bieten Cyber-Physische Recycling-Systeme?

Dieser Informationsfluss führt zu einem permanenten Austausch entlang der gesamten Wertschöpfungskette und ist ein zentraler Faktor für die wirtschaftliche und sichere Aufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien. So kann eine optimale Lösung die Zusammenarbeit von Logistik, Abfallentsorgung, Sortierung und Metallurgie erfordern. Eine wesentliche Herausforderung liegt in der digitalen Erkennung unterschiedlicher Zellchemien und -formate mit dem Ziel einer sauberen Stoffstromtrennung für ein energie- und rohstoffeffizientes Recycling in Primärrohstoffqualität. Solche Techniken können bspw. durch KI-basierte Regelsysteme flankiert

Bild 3: Anwendung von Digitalisierungsmöglichkeiten entlang der Prozessroute des Batterie-recyclings im Projekt DiRection.

Bild 4: SIMTEGRAL-Ansatz zur Multi-Skalen-Systemsimulation und Nachhaltigkeitsbewertung von primären und zirkulären Rohstoff-Supply-Chains für Lithium-Ionen-Batterien, basierend auf [12].



Literatur

- [1] Tsiropoulos, I.; Tarvydas, D.; Lebedeva, N.: Lithium-ion batteries for mobility and stationary storage applications Scenarios for costs and market growth for costs and market growth. European Commission 2018.
- [2] acatech/Circular Economy Initiative Deutschland/SYSTEMIQ (Hrsg.): Ressourcenschonende Batteriekreisläufe - Mit Circular Economy die Elektromobilität antreiben. 2020.
- [3] Buchert, M.; Dolega, P.; Degreif, S.: Gigafactories für Lithium-Ionen-Zellen – Rohstoffbedarfe für die globale Elektromobilität bis 2050, Darmstadt 2019.
- [4] VDMA e.V.: Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. URL: www.vdma.org/viewer/-/v2article/render/31877343, Abrufdatum 21.09.2021.
- [5] Friedrich, B.; Schwich, L.: New Science Based Concepts for Increased Efficiency in Battery Recycling. In: Editorial: Metals 11 (2021) 4, S. 533. <https://doi.org/10.3390/met11040533>.
- [6] Kushnir, D.: Lithium Ion Battery Recycling Technology 2015: Current State and Future Prospects. Environmental Systems Analysis. Chalmers University, Göteborg, Sweden. ESA REPORT # 2015:18, (2015).
- [7] Serna-Guerrero, R. et al.: A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. Batteries 5 (4), S.68. DOI: 10.3390/batteries5040068, 2019.
- [8] Elwert, T.; Frank, J.: Auf dem Weg zu einem geschlossenen Stoffkreislauf für Lithium-Ionen-Batterien. Recycling und Sekundärrohstoffe (13), S. 524-530, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, ISBN 978-3-944310-51-0.
- [9] Schwich, L. et al.: Early-Stage Recovery of Lithium from Tailored Thermal Conditioned Black Mass Part I: Mobilizing Lithium via Supercritical CO₂-Carbonation. Metals 11 (2) S.177. DOI: 10.3390/met11020177, 2021.
- [10] Slabon, A. et al.: Sustainable Li-Ion Batteries: Chemistry and Recycling. Adv. Energy Mater. 11 (43), S. 2003456. DOI: 10.1002/aenm.202003456, 2021.
- [11] Deutsche Rohstoffagentur: Batterierohstoffe für die Elektromobilität. DERA Themenheft: 26 S. - ISSN: 2193-5319. Berlin 2021.
- [12] Cerdas, F.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Integrated Computational Life Cycle Engineering - Application to the case of electric vehicles, In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, Elsevier B.V. Amsterdam 2018.

werden, die auf geometrische oder spektrale Informationen trainiert werden.

Forschungsfeld Life Cycle Design & Engineering

Ziel des Forschungsfelds ist es, Methoden und Werkzeuge zu einer lebenszyklusorientierten Gestaltung von Batteriezellen und deren Recyclingprozessen zu entwickeln. Für eine ganzheitliche Optimierung des Batterielebenszyklus bedarf es der Bewertung von Performance-relevanten Parametern, wodurch ein auf quantitativen Nachhaltigkeitskriterien basierendes systematisches Life Cycle Engineering ermöglicht wird. Grundlage bilden quantitative Methoden des Life Cycle Assessments, Social Life Cycle Assessments sowie des Life Cycle Costings. Der Forschungsfokus liegt auf der Weiterentwicklung computerunterstützter Methoden und Werkzeuge, die es ermöglichen, die inhärente Komplexität in der Nachhaltigkeitsbewertung modellbasiert handhabbar zu machen. Dazu gehören der Umgang mit Daten- und Modellunsicherheiten (z. B. aufgrund unterschiedlicher Technologiereifegrade) sowie die Variabilität der Ergebnisse in Abhängigkeit von externen Einflussgrößen (z. B. aufgrund unterschiedlicher Alterungsprozesse) [12].

Das Projekt SIMTEGRAL (Integrierte Multi-Skalen-Systemsimulation und Nachhaltigkeitsbewertung von primären und zirkulären Rohstoff-Supply-Chains für Lithium-Ionen-Batterien) setzt an der Weiterentwicklung computergestützter Methoden des Life Cycle Engineerings an. Wie in Bild 4 dargestellt, soll ein Multi-Skalen-Modell entwickelt werden, welches Prozess-, Prozessketten- und Lieferkettenmodelle kombiniert um eine integrierte Bewertung aller drei Nachhaltigkeitsdimensionen (ökologisch, ökonomisch, sozial) zu ermöglichen. Auf dieser Basis sollen Handlungsempfehlungen auf Gestaltungsparameter der Ingenieurdisziplinen, z. B. dem Design von Lieferketten, abgeleitet werden. Wissenschaftliche Herausforderungen und Alleinstellungsmerkmale umfassen:

- Entwicklung validierter thermodynamischer, chemischer und physikalischer Prozessmodelle basierend auf Flow-Sheet-Simulationen und sowie neuartiger Model-

lierungsansätze für zirkuläre Batterierohstofflieferketten

- Kopplung dieser in einem Multi-Skalen-Modell und Verknüpfung mit computergestützten lebenszyklusorientierten Nachhaltigkeitsbewertung (IC-LCE) unter Berücksichtigung der drei Nachhaltigkeitsdimensionen
- Generierung von Daten für Recyclingprozesse in bisher nicht vorhandenem Ausmaß und Qualität

Das hier exemplarisch vorgestellte Clusterprojekt ReDesign (Gestaltungsrichtlinien für die recyclinggerechte Konstruktion von Batteriesystemen) stellt einen weiteren Aspekt im Forschungsfeld dar. Hier werden Richtlinien zur demontage- und recyclinggerechten Gestaltung von Batteriezellen, -modulen und -systemen entwickelt. Folgende Teilziele werden verfolgt:

- Analyse aktueller Li-Ionen-Batteriesysteme und Kreislaufführungsoptionen
- Entwicklung einer spezifischen Tool-Box zur Unterstützung der Systemgestaltung
- Identifikation, Analyse und Bewertung von Geschäftsmodellen zur Stützung der Kreislaufführung von Batteriesystemen

Weitere Informationen

Über die dargestellten Projekte hinausgehend adressieren die Forschungsprojekte im Kompetenzcluster greenBatt weitere Herausforderungen des Batterierecyclings. Eine Übersicht über diese Inhalte bietet der Online-Auftritt unter greenbatt-cluster.de. Im Zuge der Clusterlaufzeit bietet das Cluster regelmäßig Möglichkeiten zum Austausch mit der Industrie in Form von Workshops, Schulungen und Industrietagen.

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Kompetenzclusters Recycling & Grüne Batterie (greenBatt). Das zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03XP0302 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Schlüsselwörter:

Traktionsbatterien, Recycling, Prozesstechnik, Digitalisierung, Life Cycle Engineering