

Rahmenplan zum Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“ (Green Battery)



Clusterkoordinatoren

Prof. Dr. rer. nat. habil. Alexander Michaelis (Sprecher Recycling)

Fraunhofer IKTS

Institut für Keramische Technologien und Systeme

Winterbergstraße 28, 01277 Dresden

Telefon: 0351/2553 7512

Email: Alexander.michaelis@ikts.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann (Sprecher Grüne Batterie)

Technische Universität Braunschweig

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

Fraunhofer Institut für Schicht und Oberflächentechnik

Langer Kamp 19b, 38106 Braunschweig

Telefon: 0531/391 7149

Email: c.herrmann@tu-braunschweig.de

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Bernd Friedrich

RWTH Aachen University

Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling

Intzestraße 3, 52056 Aachen

Telefon: 0241 80 95851

Email: bfriedrich@metallurgie.rwth-aachen.de

Inhaltsverzeichnis

1.	Mission & Ziele	3
1.1.	<i>Mission und Ziele – Zusammenfassung</i>	3
1.2.	<i>Ausführliche Beschreibung des Lösungsansatzes</i>	4
2.	BMBF-Dachkonzept Forschungsfabrik Batterie	11
3.	Cluster- & Governancestruktur	13
3.1.	<i>Clusterstruktur</i>	13
3.2.	<i>Governance-Struktur</i>	14
3.3.	<i>Kooperation mit weiteren Clustern</i>	16
4.	Kompetenzen	17
4.1.	Projektbezogene Vorarbeiten	17
4.2.	Vorhandene Infrastrukturen	20
4.3.	Weitere Clusterteilnehmer	22
5.	Ideen-, IP- & Technologietransfer - Verwertungsplan	24
5.1.	Wissens- und Technologietransfer zur Stärkung nationaler Unternehmen	24
5.2.	Beitrag zur Innovationspipeline „Batterie“	25
6.	Finanzierung & Kostenplan	26
Anhang		27
	Literatur- / Quellenverzeichnis	27
	Weiterführende Literatur aus dem Cluster	28

1. Mission & Ziele

1.1. Mission und Ziele – Zusammenfassung

Mission:

Die Mission des Forschungsclusters „Recycling & Grüne Batterie“ zielt auf die Schaffung der Grundlagen für nachhaltige Batteriespeicher durch Entwicklung, Gestaltung und Anwendung innovativer Technologien, Methoden und Werkzeuge für einen energie- und materialeffizienten Lebenszyklus und geschlossene Stoff- und Materialkreisläufe.

Kurzbeschreibung der Ausgangssituation

Leistungsfähige Energiespeicher sind eine Schlüsseltechnologie für die zukünftige Elektromobilität und für das Erreichen der gesteckten Klimaziele. Die benötigte Kapazität an Batteriezellen allein für mobile Anwendungen wird von derzeit 77 GWh auf 4.000 GWh im Jahr 2040 anwachsen (Tsiropoulos I., et al 2018). Damit verbunden ist eine Vielzahl an Herausforderungen, insbesondere im Hinblick auf den Bedarf an dafür nötigen Rohstoffen. Viele dieser Rohstoffe sind in Deutschland (und Europa) nicht verfügbar und müssen daher importiert werden. Die Gebiete mit umfangreichen Rohstoffvorkommen wiederum liegen häufig in Schwellen- oder Entwicklungsländern, wo die vorherrschenden Abbaubedingungen nicht mit einer umwelt- und sozialverträglichen Sourcingstrategie für nachhaltige Batterien vereinbart werden können. Für die deutsche Wirtschaft entsteht darüber hinaus mittel- bis langfristig ein hohes, internationales Konflikt- und Abhängigkeitspotenzial. Die Gestaltung nachhaltiger Batterielebenszyklen unter Ausschöpfung aller Potentiale effizienter Recyclingtechnologien und Betrachtung nachhaltiger Primär- und Sekundärrohstoffketten schafft für deutsche Unternehmen vor diesem Hintergrund ein Differenzierungsmerkmal im weltweiten Wettbewerb und ermöglicht die Erschließung von Wettbewerbsvorteilen im internationalen Vergleich.

Energiespeicher müssen nicht nur technisch-wirtschaftlich, sondern auch im Hinblick auf ökologische Anforderungen überzeugen. Aus diesen Anforderungen lassen sich zwei Handlungsfelder für die Gestaltung nachhaltiger Batterien (Grüne Batterie) ableiten:

- (1) die systematische Gestaltung des gesamten Batterielebenszyklus und
- (2) das Schließen von Material- und Stoffkreisläufen und damit die Integration von rückgewonnenen Materialien und Rohstoffen in die Batteriezellproduktion.

Das langfristig angelegte Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“ bündelt vor diesem Hintergrund die umfassenden Erfahrungen, Kompetenzen und anlagentechnischen Infrastrukturen führender Akteure auf dem zugehörigen Themenbereich der Batterieforschung. Das Kompetenzcluster erweitert dabei als Querschnittsinitiative die bestehenden Module des Dachkonzeptes „Forschungsfabrik Batterie“ insbesondere in den Feldern: Demontagesysteme, Prozessentwicklung für mechanische und hydrometallurgische Prozesse, thermische Verwertung, elektrochemische Aufbereitung, Primärrohstoffkompetenz, Materialsynthese, Entwicklung von Digitalisierungslösungen sowie Computational Life Cycle Engineering und Systemsimulation.

Gesamtziele und Themenschwerpunkte

Die adressierten Ziele überspannen den gesamten Wertschöpfungs- und Lebenszyklus einer Batterie mit den Schwerpunkten:

- Schaffung einer „Grünen Materialbasis“ durch Einsatz recycelter Rohstoffe und umweltverträgliche Rohstoffgewinnung
- Entwicklung, Gestaltung und Anwendung innovativer Prozesse für ein energie- und ressourceneffizientes Recyclingsystem mit dem Ziel der möglich vollständigen Rohstoffrückgewinnung

- Bereitstellung von multidisziplinären Lebenszyklus-Modellen, -Methoden und -Werkzeugen zur Ableitung und Bewertung von Material- und Prozessinnovationen für die Grüne Batterie
- Bereitstellung von digitalen Technologien sowie Methoden und Werkzeugen zur Erhöhung der Qualität und Verfügbarkeit von Daten/Informationen über den gesamten Batterielebenszyklus und in den einzelnen Lebenszyklusphasen mit besonderem Fokus auf die Phase End-of-Use/End-of-Life, hier ist eine enge Kooperation mit den anderen Kompetenzclustern vorgesehen, insbesondere Aqua, InZePro, ProZell
- Entwicklung und Beurteilung von Handlungsempfehlungen für die optimale Gestaltung für End-of-Use bzw. End-of-Life Batterien

1.2. Ausführliche Beschreibung des Lösungsansatzes

Ausgehend von der inhaltlichen Ausrichtung des Kompetenzclusters „Recycling & Grüne Batterie“ ist nachfolgend der relevante Stand der Technik und Forschung als Grundlage für die Darlegung des Clusterlösungsansatzes dargestellt.

Für aktuelle Batterierecyclingprozesse können Batteriesysteme bis auf Modul- oder Zellebene in manuellen bzw. teilautomatisierten Prozessen demontiert und anschließend mechanisch zerkleinert werden. In der Folge kann es zu Verunreinigungen der Zielmaterialien des Recyclingprozesses kommen, da in der Regel gemischte Fraktionen von Aktivmaterialien und Materialien der Zell- und Modulgehäuse vorliegen (Diekmann et al. 2017). Zur Bewertung von möglichen Re-Use Strategien sowie zur Unterstützung eines sicheren Umgangs finden weiterhin Sortier- und Entladeprozesse statt. Hierzu bestehen gegenwärtig noch keine standardisierten Verfahren und, aufgrund mangelnder Verfügbarkeit, wenig Erfahrungen im Umgang mit gebrauchten Zellen (Harper et al. 2019).

Im industriellen Umfeld der mechanischen und metallurgischen Prozessierung existieren verschiedene Routen für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (Elwert et al. 2018). Grundlage des auf der mechanischen Aufbereitung basierenden Prozesswege ist ein Intertgas-Schredder-Prozess in Kombination mit einer Trocknung des Materials unter Vakuum und anschließender Klassierung der jeweiligen Batteriefractionen (Folien, Verschalung, Schwarzmasse) (Hanisch et al. 2019).

Die im wesentlichen Graphit, Co, Ni, Li, und Mn enthaltende Aktivmasse kann im Folgenden in nasschemischen Trennprozessen in Produktfraktionen (einzelne Metallsalze) überführt werden (Elwert et al. 2018; Kwade et al. 2018). Rein thermische Verfahren werden auf Smelter-Basis verfolgt, dabei werden die Batteriezellen einem Schmelzprozess unterzogen, um die Wertmetalle Cu, Ni und Co in einer Metallphase anzureichern (Heelan et al. 2016). Die unedleren Batteriekomponenten (bezogen auf die elektrochem. Spannungsreihe) wie Al, Fe, Mn und Li hingegen werden in der Schlackenphase angereichert. Diese Schlackenphase wird aktuell unzureichend verarbeitet, obwohl mittels nasschemischer Nachbehandlung wichtige Wertstoffe zurückgewonnen werden könnten. Einen möglichen Wiedereinsatz der Rohstoffe in der Schlackenphase, beispielsweise als Baustoffe, gilt es zu prüfen (Martens et al. 2016; Mayyas et al. 2018).

Des Weiteren haben sich Hybridverfahren in der Batterie-Recyclingbranche etabliert. Hier zu nennen ist das Kombinationsverfahren bestehend aus thermischer Vorbehandlung (Pyrolyse), mit dem Ziel der sicheren Deaktivierung der Batteriezellen, mechanischer Aufbereitung und anschließender pyrometallurgischer Verhüttung zur Rückgewinnung der Aktivmaterialien wie Co, Ni und Cu (Sojka 2020; Espinosa et al. 2004).

Im Hinblick auf die nachhaltige Gestaltung primärer und zirkulärer Rohstoffwertschöpfungsketten von Batterien sind die verfügbaren Datensätze zu deren Bewertung bislang wenig differenziert und nur unzureichend detailliert (Schmidt et al. 2016). Sie können einerseits die Heterogenität der Vielzahl an sehr unterschiedlichen Rohstoffvorkommen und Produktionsstätten mit unterschiedlichen Erzqualitäten und -arten (Sulfite, Limonite) bisher nicht berücksichtigen. Andererseits fehlen fundierte Kennzahlen zur Bewertung von Sekundärrohstoffketten. Zuletzt wurden Multi-Skalen-Simulationsmodelle innerhalb computerunterstützter Ansätze des Life Cycle Engineerings verfolgt (Cerdas et al. 2018). Diese fokussieren jedoch bisher auf die

Produktion, die Berücksichtigung der Rohstoffwertschöpfungskette und des Recyclings sind nicht ausreichend abgebildet.

Eine über diese kompakte Darstellung des Stands der Technik und Forschung hinausgehende Übersicht der relevanten projekt- und forschungsbezogenen Vorarbeiten und bereits verfügbaren Forschungsinfrastrukturen führender Akteure im Bereich „Recycling & Grüne Batterie“ ist in Kapitel 4 dargestellt und weitere Literaturquellen der am Cluster beteiligten Akteure im Anhang aufgeführt.

Hier wurden in Kooperationsprojekten aus Industrie und Forschung bereits vielschichtige Erkenntnisse für die industrielle Umsetzung nachhaltiger Batterien und ihres Recyclings hervorgebracht. Die Vorarbeiten und die skizzierten Handlungsbedarfe zeigen die weiteren Forschungsbedarfe auf. Dies betrifft u.a. die Optimierung der Schnittstellen zwischen Demontage und mechanischer Aufbereitung sowie der anschließenden metallurgischen Verarbeitung. Es bedarf geeigneter material- und variantenflexibler automatisierter Demontageverfahren zur Vorbereitung von Recyclingprozessen, wodurch sich die Arbeitsplatzbelastung der Operatoren in den bislang vornehmlich manuell durchgeführten Fertigungsschritten reduzieren lässt.

Im Rahmen der nasschemischen und thermischen Prozessrouten besteht Optimierungspotential hinsichtlich der Material-Ausbeute und Reinheit der Produkte, sowie der Vermeidung von Abfällen und Abwässern (Zhao et al. 2019). Insbesondere die Rückgewinnung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe wie Lithium wird in bisherigen Recyclingverfahren unzureichend adressiert (Swain 2017). Es kommt in diesem Fall zur Verzettlung und Wertstoffverlusten während des Recyclings (Elwert et. al. 2020). Darüber hinaus besteht Bedarf zur Evaluierung der sicheren, mechanischen Aufbereitung im Hinblick auf einen ‚Thermal Runaway‘ (Zeng et al. 2014). Weiterhin besteht Bedarf zur Weiterentwicklung von Verfahren im Hinblick auf die Aufnahme von Rückständen aus dem primären Produktionsprozess, sodass Ausschüsse aus der Elektrodenfertigung direkt dem Produktionsprozess wieder zugeführt werden können. Zudem besteht Bedarf an innovativen Raffinationstechniken zur Rückführung der im Recycling generierten Produkte in die Fertigung neuer Batterien (Re-Synthese) (Harper et al. 2019). Erkenntnisse für die Gestaltung nachhaltiger Wertschöpfungsketten können zielführend abgeleitet werden, wenn die nötigen Detailmodelle der Primär- und Sekundärrohstoffherstellung vorliegen und für eine techno-ökonomische, soziale sowie ökologische Bewertung integriert werden. Dabei bedarf es einer Kopplung dieser Modelle mit der virtuell abzubildenden Wertschöpfungskette, um die Prozessierung maßgeblich effizienter und zielgerichteter zu gestalten.

Das Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“ schafft vor diesem Hintergrund die Voraussetzungen für eine energie- und materialeffiziente Batterieentwicklung durch die konsequente Umsetzung eines ganzheitlichen Life Cycle Engineerings und die Schließung von Material- und Stoffkreisläufen. Der Bezugsrahmen des Clusters umfasst den vollständigen Batterielebenszyklus mit einem besonderen Fokus auf dem Recycling, der systematischen Betrachtung der Vorketten von der Rohstoffgewinnung bis zur Materialsynthese bzw. Re-Synthese für bestehende und neue Batteriematerialien sowie die Potenziale der Digitalisierung an der Schnittstelle zum Recycling bzw. zum End-of-Life (vgl. Abbildung 1). Hieraus leiten sich sieben Forschungsfelder (A bis G) des Clusters ab. Angefangen bei der Recyclingprozesskette umfassen die Forschungsfelder die Prüfung und Demontage (Forschungsfeld A), die mechanische Aufbereitung (Forschungsfeld B) sowie die thermische und chemische Prozessierung (Forschungsfeld C). Hierauf aufbauend können Ansätze für eine nachhaltige Rohstoffgewinnung sowie Resynthese (Forschungsfeld D) sowie ganzheitliche Ansätze für das Life Cycle Design & Engineering (Forschungsfeld E) untersucht werden. Der Bereich der Digitalisierung für Recycling & Grüne Batterie (Forschungsfeld F) dient der virtuellen Abbildung der Recyclingprozesskette mittels Ansätzen der Datenerfassung und -analyse sowie des Daten- und Wissensmanagements im Forschungscluster zur Identifikation von Optimierungspotentialen. Hierauf aufbauend kann im übergreifenden Forschungsfeld „2nd Use & Grüne Batterie“ der Querschnittsinitiative Batterie-Lebenszyklus die Cluster-übergreifende Integration von Daten, Modellen, Methoden und Werkzeugen mit dem Ziel erfolgen, nachhaltige Batteriekonzepte für zukünftige Applikationen bereitzustellen. Nachfolgend werden die Forschungsfelder detaillierter vorgestellt.

Im Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“ sollen analog zum Vorgehen im Themenfeld Batterieproduktion innovative Lösungen und Innovationsmodule bis zu TRL 6 entstehen. Dafür setzen die

Projekte auf Vorarbeiten bis mindestens TRL3 auf, so dass ein TRL-Sprung im Rahmen der Projektarbeit um bis zu 3 TRL-Stufen möglich ist.

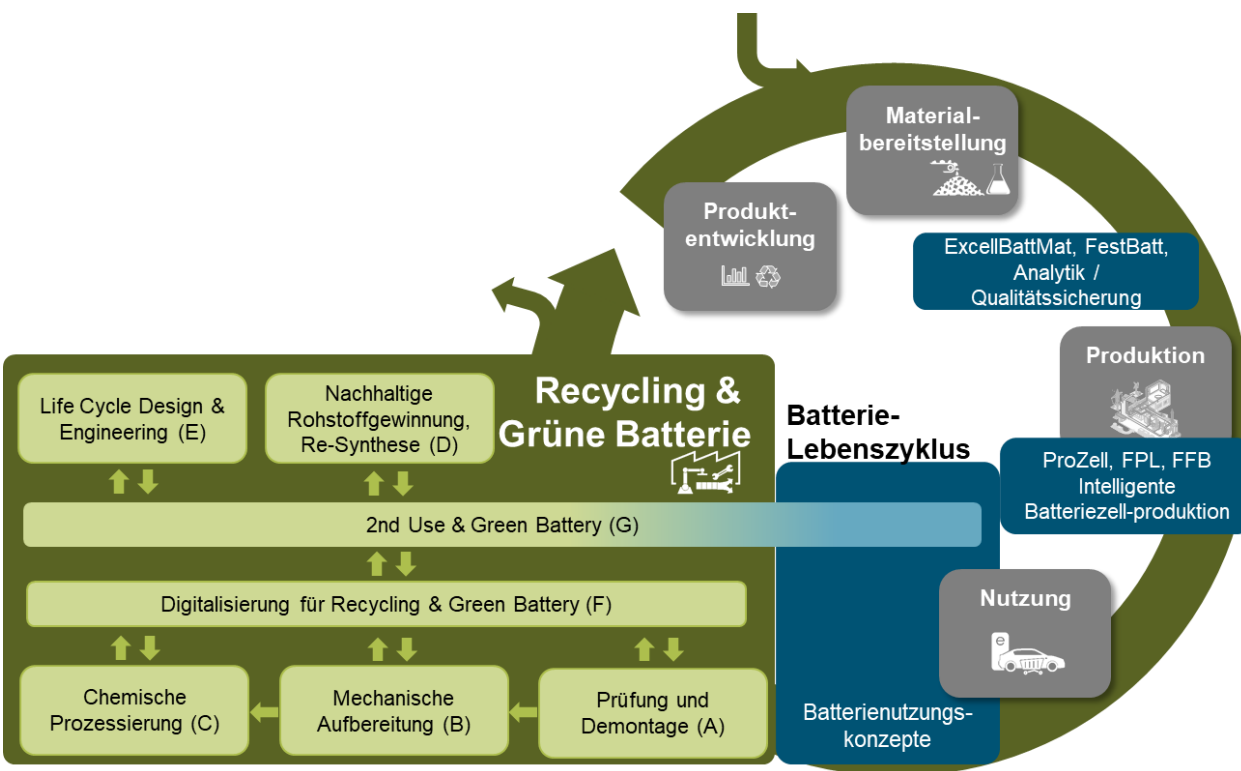


Abbildung 1: Batterielebenszyklus

A – Prüfung und Demontage

Am Ende der Lebensdauer von Batteriesystemen entscheidet sich, ob diese bzw. einzelne Teilkomponenten weiter genutzt werden können, oder ob sie einer mechanischen, thermischen und/oder chemischen Aufbereitung zugeführt werden müssen. Zu diesem Zweck bedarf es umfassender Prüfmethoden, welche elektrische und mechanische Eigenschaften erfassen und die ggf. um spezifische Informationen aus der Produktions- und Nutzungsphase (Digital Twin, Fehlerspeicher, Labeling) der Batterie ergänzt werden können. Datensätze aus Sonderprüfungen von kritischen, verunfallten oder aus der Spezifikation fallenden Batterien liefern dafür weitere Informationen. Darauf aufbauend ist die Entwicklung adaptiver (teil-)automatisierter Prüf- und Demontageprozesse für den Rückbau auf Zell- bzw. Elektrodenebene geplant. Durch die Erweiterung dieser Prozesse mit Methoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) kann auf die Heterogenität der Batterietypen und -zustände (SOH, SOC, mechanische Integrität, etc.) in Demontageprozessen reagiert werden. Der Einsatz neuer Technologien, z. B. Augmented Reality (AR) oder Virtual Reality (VR), unterstützt perspektivisch die Interaktion zwischen Mensch und Maschine im Demontageprozess.

Im Fokus der Startphase des Kompetenzclusters „Recycling & Grüne Batterie“ stehen die Entwicklung von Ansätzen und Prozessen der Demontage sowie Verfahren zur sicheren und energieneutralen Entladung von Batterien als vorbereitende Schritte zur Optimierung von Recyclingprozessen. Die Flexibilität der Prozesse in der intelligenten und (teil-)automatisierten Prüfung und Demontage bei gleichzeitiger Integration verschiedener Prozessschritte unterstützt hierbei die Handhabung unterschiedlichster Batterietypen (u.a. hinsichtlich Zellchemie, Bauform, Größe, etc.). Ansätze zur Demontage, welche vorrangig auf die Optimierung der Lebensdauerverlängerung und Nachnutzung (2nd Use, 3rd Use etc.) abzielen, sind in der Gesamtschau der Querschnittsinitiative Batterielebenszyklus zu betrachten und geeignet zu verorten.

B – Mechanische Aufbereitung

Heute etablierte mechanische Aufbereitungsprozesse für Li-Ionen-Batterien weisen Recyclingquoten im Bereich der gesetzlichen Vorgaben¹ auf. Für eine zukünftig erfolgreiche Kreislaufwirtschaft müssen jedoch die Reinheit der Materialströme gesteigert und der Umgang mit organischen und fluorhaltigen Elektrolyt-Komponenten optimiert werden.

Daher ist es Ziel der Arbeiten im Forschungsfeld „Mechanische Aufbereitung im Bereich der Trenntechnik signifikante Weiterentwicklungen voran zu treiben, um die Qualität der Recyclingstoffströme zu erhöhen und damit eine bessere Verzahnung zur anschließenden thermischen und chemischen Prozessierung sowie der Re-Synthese der verschiedenen Materialien zu erreichen.

Eine erhöhte Ausbeute und effizientere Prozessführung kann zukünftig insbesondere durch optimierte Schnittstellen und prozessseitige Anpassung einerseits an den vorgelagerten Demontage-Schritten sowie die nachgelagerte metallurgische Prozesstechnik ermöglicht werden.

Beispielsweise sollen innovative Zerkleinerungsprozesse auf Zellebene entwickelt werden, um die Teilprozesse Zerkleinerung und Sortierung effizienter umsetzen zu können. Zum einen werden hier sichere Prozesse zur Zerkleinerung von Zellen mittels Nassaufbereitungstechnik (Nass-Schredder-Technik) oder unter geschützter Atmosphäre (Inertgas bzw. Unterdruck/Vakuum) untersucht. Zum anderen werden Methoden, wie die automatisierte Demontage bis auf Elektrodenlevel, um die Zellkomponenten voneinander zu separieren, oder eine elektrohydraulische Fragmentierung zur Zerlegung an Fügestellen betrachtet. Für die weitere Sortierung können trockene Verfahren wie die Siebtechnik oder die Windsichtung und alternativ nasse Verfahren wie die Zentrifugation eingesetzt werden, wobei ein störungsfreies und kontaminationsarmes Materialhandling sichergestellt werden muss.

Hierunter fällt auch die Organik-Abtrennung aus Elektrolyt und Separator, welche vor der mechanischen Aufbereitung oder während bzw. nach dem Zerkleinerungsprozess stattfinden kann. Hierbei sollen sowohl pyrolytische als auch destillative Prozesse betrachtet werden.

Weiterhin können durch die Einführung von Digitalisierungslösungen und Verfahren für die sensorgestützte mechanische Aufbereitung auf Basis eines Modelltrainings heterogene Altbatterieströme robust behandelt werden, indem eine gezielte Zuführung zu geeigneten *unit operations* sichergestellt wird. Demnach können dann die Zerkleinerung wie auch die anschließende Sortierung zielgerichtet und speziell auf anfallende Schrottströme zugeschnitten werden. Ziel ist es hier, die Aktivmasse der Batteriezellen möglichst verunreinigungsarm zu extrahieren, und die Aktivmasse von metallischen Fraktionen, wie dem Gehäuse, abzutrennen.

So soll zukünftig eine Flexibilisierung durch Monitoring und adaptive Prozesskontrolle auf Basis von Echtzeitdaten (Materialeigenschaften, Maschinendaten) ermöglicht werden. Mittels Digitalisierung und Datenerfassung, unter Berücksichtigung der geeigneten Hardware, können so Prozessabhängigkeiten transparent und Verbesserungspotentiale sichtbar gemacht werden. Diese Methoden erlauben darüber hinaus eine parallele Prozessoptimierung durch den Aufbau eines digitalen Zwillings des Recyclingprozesses und die Gewinnung von belastbaren Daten für die Durchführung eines Life Cycle Assessments (LCA).

¹ RICHTLINIE 2006/66/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES; 6. September 2006; Anhang III; Teil B; Pkt c) Recycling von 50 % des durchschnittlichen Gewichts sonstiger Altbatterien und -akkumulatoren.

C – Thermische und Chemische Prozessierung

Eine innovative thermische und chemische Prozessierung ist Voraussetzung für die zukünftige Rückgewinnung von weitergehenden Rohstofffraktionen aus Lithium-Batterie-Zellen. Wesentliche Herausforderung dabei ist die Realisierung einer stofflichen Reinheit, die der der Ausgangsmaterialströme (Battery Grade) aus den primären Rohstoffen vergleichbar ist. Ziel ist es, im Rahmen dieses Forschungsfeldes geeignete Prozesse zu entwickeln, die diese Anforderungen bei effizienter und wirtschaftlicher Prozessführung erfüllen können. Hierbei müssen auch unterschiedliche bzw. sich stetig ändernde Zellchemien berücksichtigt werden.

Aus heutiger Sicht kommen dafür unterschiedliche Ansätze in Betracht, die untersucht und bewertet werden sollen.

Eine Prozessoption stellt die pyrometallurgische Verarbeitung sowohl von Batterien mit als auch ohne mechanische oder thermische Vorbehandlung dar. Hierfür ist zukünftig eine Effizienzsteigerung mittels wissensbasierter Prozessgestaltung insbesondere hinsichtlich von Vorbehandlungsprozessen zur Lithium-Rückgewinnung notwendig. Zusätzlich ist ein wesentliches Ziel der thermischen Behandlung die möglichst verlustfreie Separation der werthaltigen Schwarzmasse und anderer Zellkomponenten.

Eine weitere Prozessoption neben der der thermischen Prozessierung sind hydro- (nasschemische) Prozessschritte für das Recycling. Ziel ist hierbei die Rückgewinnung der Rohstoffe aus Aktivmaterial und Leitsalz, wofür effiziente hydrometallurgische und elektrochemische Prozesse entwickelt werden sollen. Dabei muss neben der Rückgewinnung von Kobalt und Nickel das Recycling von Lithium im Fokus stehen.

Um chemische Prozesse zukünftig wirtschaftlich und in großem Maßstab realisieren zu können, sind insbesondere deren Effizienzsteigerung durch eine möglichst hohe Wiederverwendungsquote bei Laugungsreagenzien und Lösungsmitteln sowie an die stoffliche Spezifik angepasste hocheffiziente Prozesswasserbehandlungstechnologien zwingend erforderlich. Andernfalls ist ein kostendeckendes stoffliches Recycling nicht realistisch. Hierbei müssen nicht nur die kostenintensiven Rohstoffe Kobalt und Nickel kostengünstig und in hoher stofflicher Qualität zurück gewonnen werden, sondern auch die in bisherigen Recyclingprozessen wenig im Vordergrund stehenden Bestandteile wie Lithium und Graphit. Für Graphit kommt beispielsweise die flotative Rückgewinnung in Frage. Für das Lithium können sowohl thermische, als auch nasschemische Prozessoptionen verfolgt werden.

D – Nachhaltige Rohstoffgewinnung und Re-Synthese

Die Rohstoffgewinnung und -verarbeitung bis hin zum Aktivmaterial schlägt für heutige Zellgenerationen mit ca. einem Drittel der Zellkosten zu Buche. Außerdem belasten Sie bei der Gewinnung der Ausgangsstoffe in hohem Maße die Umwelt, tragen bei der Kalzinierung zum CO₂-Rucksack der Zellherstellung bei und erfordern in der Sinterung insbesondere der Kathodenmaterialien große Energiemengen. Durch modellbasierte Ansätze können diese Fragestellungen im Hinblick auf die gesamte Wertschöpfungskette analysiert, bewertet und gestaltet werden. Hierzu werden multi-disziplinäre Modelle zum Material Sourcing erarbeitet, welche zukünftig eine Entscheidungsunterstützung für die Auswahl nachhaltiger Sourcingstrategien (Rohstoffgewinnung „fair-trade“) ermöglichen. Weiterhin werden konkrete technische Lösungen entwickelt, bspw. Membranreinigungs- und -destillationsprozesse für die Rohstoffgewinnung (Laugung) und Reinigung von Prozesswässern, für die Kreislaufführung des entstehenden CO₂ zur Fällung des Li₂CO₃-Fällung und Strategien zur Reduzierung des Roh- und Hilfsstoffverbrauchs im Syntheseprozess bspw. durch Nutzung von Rohstoffen aus dem Recyclingprozess. Die Re-Synthese schließt den Kreis zwischen Recyclingstoffströmen und Wiedereinsatz von Materialien. Insbesondere bei den Aktivmaterialien ist dies ein entscheidender Schritt für eine Kreislaufwirtschaft mit hoher Wertschöpfung und reduziertem CO₂-Abdruck. Hier ist es das Ziel, aus der Re-Synthese stoffliche Qualitäten zu generieren, die gemeinsam mit Primärrohstoffen verarbeitet werden können. Wichtig ist die Schnittstelle zu den mechanischen und chemisch-thermischen Prozessen, die geeignete Vorkonzentrate bereitstellen, die Re-Synthese vereinfachen bzw. erst ermöglichen, die Evaluation der Qualitäten basierend auf den gewählten Aufbereitungsverfahren und die Korrelation zum anschließenden Re-Synthese-Verfahren.

In der ersten Phase der Arbeit im Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“ steht die Entwicklung modellbasierter Ansätze zur Analyse, Simulation, Bewertung und Prädiktion der Nachhaltigkeit von Primär- und Sekundärmaterialherstellungsprozessen mit dem Ziel im Fokus eine effiziente Schließung des Roh- und Werkstoffkreislaufes für Lithium-Ionen-Batterien zu ermöglichen. Auf der Grundlage integrierter Ansätze zur Abbildung, Analyse und (ökologischen) Bewertung der Wertschöpfungsketten von Batterierohstoffen soll mittels prädiktiver Verfahren ein Benchmarking der CO₂-Belastung und der Umweltauswirkungen von derzeitigen industriellen Prozessen möglich werden. Die Gestaltung nachhaltiger Wertschöpfungsketten für Batteriematerialien erfolgt auf Basis techno-ökonomischer Kriterien und der ökobilanziellen Bewertung auf der Grundlage von Detailmodellen der im Kompetenzcluster entwickelten Prozesslösungen. Die Detailmodelle sind wesentliche Grundlage zur virtuellen Abbildung der Recyclingprozesskette als Vorbereitung für die erfolgreiche Digitalisierung (siehe Forschungsfeld F). Die zuvor genannten modellbasierten Ansätze ermöglichen durch Kombination mit geeigneten Verfahren die Bewertung des Beitrags von Recycling zur Reduktion der Umweltwirkungen der globalen Produktion von Batterierohstoffen. Hierbei spielt die Entwicklung von effizienten Prozessen zur Resynthese und damit Rückführung von Aktivmaterialien in den Prozesskreislauf der Elektrodenproduktion eine besondere Bedeutung. Schließlich kann die Einführung biobasierter Materialien einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Gestaltung von Batterie leisten, welche in einer Folge-Phase des Kompetenzclusters „Recycling & Grüne Batterie“ intensivere Berücksichtigung finden sollte.

E – Life Cycle Design & Engineering für die Grüne Batterie

Eine lebenszyklusorientierte Produktentwicklung und Gestaltung (recyclinggerechtes Design, Life Cycle Design & Engineering) erfordert die Berücksichtigung der Anforderungen aller Lebensphasen. Ein Schwerpunkt dieses Forschungsfeldes liegt auf der Entwicklung von Richtlinien zur demontage- und recyclinggerechten Gestaltung von Batteriezellen, -modulen und -systemen. Da eine phasenspezifische Gestaltung nicht konfliktfrei ist, und unter Umständen einer ganzheitlichen Optimierung entgegenstehen kann, ist die Lösung von Zielkonflikten unter Berücksichtigung weiterer Ansätze wie montage-, fertigungs- und servicegerechter Produktgestaltung erforderlich. Für eine ganzheitliche Optimierung des Batterielebenszyklus bedarf es der Bewertung von Performance-relevanten Parametern, wodurch ein auf Nachhaltigkeitskriterien basierendes systematisches Life Cycle Engineering ermöglicht wird. 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).

Im Forschungsfeld E soll in der ersten Phase des Kompetenzclusters die Bewertung von aktuellen Zelldesigns erfolgen und diese hinsichtlich ihrer Recyclingfähigkeit bewertet werden. Im Vordergrund stehen hier Trennbarkeit, Sortierbarkeit und Unverträglichkeiten. Abgeleitet aus den Ergebnissen der Forschungsfelder A bis D werden außerdem Kostentreiber im Recyclingprozess identifiziert. Abgeleitet aus diesen Ergebnissen sollen Gestaltungsmerkmale für ein *Design for Recycling* abgeleitet werden. Hier stehen nicht allein aktuelle Zellgenerationen im Vordergrund, vielmehr sollen Empfehlungen für neue Batteriechemien abgeleitet werden. Diese sind die Basis für eine gezielte Untersuchung des Recyclings kommender Zellgenerationen, die für die nächste Phase des Kompetenzclusters „Recycling & Grüne Batterie“ vorgesehen ist.

F – Digitalisierung für Recycling und Grüne Batterie

Eine systematische Gestaltung des Batterielebenszyklus resultiert in hohen Anforderungen an die Datenqualität und -transparenz. Das Forschungsfeld Digitalisierung entwickelt daher Technologien und Methoden, welche die Qualität und Verfügbarkeit von Daten/Informationen über den gesamten Batterielebenszyklus stärken und in den einzelnen Lebenszyklusphasen, insbesondere dem End-of-Life, einsetzbar sind. Die Digitalisierung des Recyclingprozesses wird hierbei als ein zentraler Faktor für die wirtschaftliche und sichere Aufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien gesehen. Eine wesentliche Herausforderung liegt in der digitalen Erkennung unterschiedlicher Zellchemien und -aufbauten mit dem Ziel einer sauberen Stoffstromtrennung für ein energie- und rohstoffeffizientes Recycling in Primärrohstoffqualität. Solche Techniken können bspw. durch KI-basierte

Regelsysteme flankiert werden, die auf geometrische oder spektrale Informationen trainiert werden. Bei der Integration von Monitoringlösungen, Datenerfassung und -verarbeitung kann auf umfangreiche Vorarbeiten in der Zellherstellung sowie deren Übertragung auf Recyclingprozesse zurückgegriffen werden. In der Umsetzung sollen existierende Pilotanlagen mit In-line-Sensoren ausgestattet werden, deren Daten im Datenraum verknüpft und in Echtzeit analysiert werden. Darüber hinaus sollen innovative Ansätze eine transparente und manipulationssichere Rückverfolgbarkeit der Batteriekomponenten in der Batterie-Supply-Chain (z. B. materialbasierte Marker bspw. Isotopenmarkierung, Labeling-Konzepte) sicherstellen.

Im Fokus der Startphase des Kompetenzclusters „Recycling & Grüne Batterie“ steht die Schaffung der erforderlichen Grundlagen für die virtuelle Abbildung von Recyclingprozessketten. Hierzu bedarf es des Aufbaus der erforderlichen Infrastruktur für die Datenerfassung und -verarbeitung sowie das Daten- und Wissensmanagement im gesamten Forschungscluster. Aufbauend auf den Teilmodellen der Recyclingprozessketten (vgl. Forschungsfeld D) sind geeignete Schnittstellen dieser Infrastruktur mit den Teilmodellen zu definieren, auf deren Grundlage Ansätze der stationären und mobilen Visualisierung sowie cyber-physischer Recycling-Systeme möglich werden. Dies erlaubt erste technisch-ökonomische und ökologische Bewertungen basierend auf live Prozessdaten sowie die Identifikation von Optimierungspotentialen.

G – Begleitprojekt „2nd Use & Grüne Batterie“

Im Begleitprojekt „2nd Use & Grüne Batterie“ erfolgt die Gesamtsystemanalyse, -bewertung und -gestaltung unter integraler Berücksichtigung der Schnittstellen zu den weiteren Forschungsclustern entlang des Batterielebenszyklus in den Bereichen Material (ExZellBatMat, FestBatt), Prozessentwicklung (ProZell, Intelligente Batterieherstellung, QS/Analytik) und industrielle Fertigung (Forschungsfertigung Batterie) innerhalb des Dachkonzepts „Forschungsfabrik Batterie“. Das Begleitprojekt „2nd Use & Grüne Batterie

" bündelt hierzu Aktivitäten aus den Clustern „Batterienutzungskonzepte“ sowie „Recycling & Grüne Batterie“. Ziel ist die Entwicklung eines Instrumentariums zur Entscheidungsunterstützung für die aus ökologischer, ökonomischer und sozialer Sicht optimale Gestaltung des End-of-Use bzw. End-of-Life. Basierend auf den in den verschiedenen Clustern erhobenen Daten, der Prozessentwicklung im Cluster, entwickelten Teil-Modellen sowie Methoden und Werkzeugen erfolgen der Aufbau einer virtuellen Recyclingkette und Simulation für die Grüne Batterie. Diese erlaubt optimale Entscheidungen hinsichtlich einer aus Nachhaltigkeitssicht bestmöglichen Auswahl von Nachnutzungs- und Recyclingwegen. Für Batterien, welche am Ende ihres Lebenszyklus stehen, werden mit Hilfe der Ergebnisse der Prozessentwicklung und der Simulation zentrale Performance-Parameter unter Berücksichtigung von material- und prozessbedingten Innovationen entlang des Lebenszyklus prognostiziert, um auf dieser Grundlage Handlungsempfehlungen für die Gestaltung des jeweils nächsten Lebenszyklus ableiten zu können. Hierauf aufbauend können Handlungsempfehlungen für politische Entscheidungsträger ausgesprochen werden.

Die Querschnittsinitiative „Batterielebenszyklus“ umfasst zwei Kompetenzcluster:

- „Batterienutzungskonzepte“ und
- „Recycling & Grüne Batterie“.

Durch die enge Verzahnung werden die Ergebnisse beider Cluster in Kontext miteinander gebracht und eine Anschlussfähigkeit zu den übrigen Kompetenzclustern in der ‚BMBF Forschungsfabrik Batterie‘ hergestellt.

Im Rahmen des Projekts ist ein Austausch mit weiteren parallellaufenden Aktivitäten in Deutschland, der EU und darüber hinaus geplant, um vorhandene Synergien zu nutzen und den wissenschaftlichen Austausch zu fördern. Hierzu werden zu Beginn des Begleitprojekts relevante Initiativen recherchiert und die für die Clusterpartner relevanten Partner und Schnittstellen transparent in den beiden Clustern kommuniziert. Dies betrifft u.a. die Aktivitäten der Arbeitsgemeinschaft Traktionsbatterien der Circular Economy Initiative sowie das Future Battery Industries Cooperative Research Centre in Australien.

2. BMBF-Dachkonzept Forschungsfabrik Batterie

Das Dachkonzept „Forschungsfabrik Batterie“ unterstreicht die zentrale Rolle, die Batterietechnologien für die zukünftige wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands haben.

*„Die Batterietechnologie ist aufgrund ihrer Relevanz für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen eine Schlüsseltechnologie für den Standort Deutschland. ... Die Beherrschung dieser Technologie entlang der gesamten Wertschöpfungskette vom Material über die Batteriezelle bis hin zum Batteriesystem für die jeweilige Anwendung und das entsprechende Recycling ist deshalb als vorrangiges politisches Ziel im aktuellen Koalitionsvertrag und in der HighTech-Strategie der Bundesregierung verankert. Angestrebt wird die vollständige Kompetenz entlang der Wertschöpfungskette inklusive der Kontrolle der Integrationsstufen von den Rohstoffen über Materialien und Batteriezellen weiter über das Batteriesystem bis hin zum Recycling mit Rückgewinnung der Rohstoffe.“
(Batterieforschung und Transfer stärken – Innovationen beschleunigen Dachkonzept „Forschungsfabrik Batterie“, BMBF)*

Dies ist von besonderer Bedeutung, da völlig unabhängig von ihrem Herstellungsort flächendeckend und in nennenswertem Umfang Batterien anfallen, die am Ende ihres Lebenszyklus angelangt sind. Dieser Effekt wird sich in den kommenden Jahren massiv verstärken. Da von diesen Batterien nicht nur ein Sicherheitsrisiko ausgeht, sondern diese eine nicht zu vernachlässigbare Sekundärrohstoffquelle darstellen, soll mit dem Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“ auch in der Forschungslandschaft ‚der Kreislaufes geschlossen‘ werden.

Aus der High-Tech Strategie der Bundesregierung und dem Dachkonzept „Forschungsfabrik Batterie“ ergibt sich die klare Vision und Mission zum Aufbau geschlossener Wertschöpfungsketten rund um die Batteriezellfertigung und die Flankierung dieser Aktivitäten durch Entwicklung einer lebendigen Wissenschaftslandschaft (Abbildung 2). So konnte in den letzten Jahren eine Innovationspipeline geschaffen werden, die von der Grundlagenforschung bis hin zu industriellen Anwendungen reicht. Die Querschnittsinitiative „Batterielebenszyklus“ mit den Kompetenzclustern „Batterienutzungskonzepte“ und „Recycling / Grüne Batterie“ ist dabei im Bereich der Vorlaufforschung angesiedelt (TRL 3-6). Diese baut auf grundlegenden Arbeiten auf (TRL <3) und bereitet industrielle Forschung (TRL >6) vor. Die Innovationspipeline wird durch eine Kombination von „top down“-Ansatz (missionsorientiert) und „bottom up“-Ansatz (nicht-missionsorientiert) befüllt. Die Kompetenzcluster und damit auch die Initiative ‚Recycling/ Grüne Batterie‘ sind dabei auf Ebene der missionsorientierten Forschung angesiedelt.

In diesem Zusammenhang bietet das Cluster „Recycling & Grüne Batterie“ zahlreiche Anknüpfungspunkte für den Standort in Ibbenbüren, wo derzeit eine Forschungsinfrastruktur im Pilotlinien-Maßstab für Recycling-Prozesse in Planung ist. Es wäre denkbar, für Module, Zellen und Produktionsabfälle aus Münster wie auch externer Quellen, modular aufgebaute Pilotbehandlungslinien bereitzustellen, um auf Basis wissenschaftlicher Ergebnisse aus den mittlerweile stark vernetzten Forschungseinrichtungen in Deutschland ein Up-Scaling zu erproben. Zuzüglich sollte eine Bewertung durch eine Life Cycle Analyse (LCA) den Beitrag der verschiedenen Konzepte für die ökologische Nachhaltigkeit transparent machen. Die Betrachtung sollte alternative Methoden zur sicheren Lagerung, Entladung und Sortierung umfassen, wie auch die Analyse und Bewertung teils konkurrierender Verfahrensschritte wie thermischer Konditionierung und metallurgischer Prozessierung.

Aus der entstehenden Forschungsinfrastruktur soll sich die Möglichkeit für Unternehmen ergeben, die verwendeten Anlagen an den jeweiligen Standorten zu integrieren. Des Weiteren soll den OEM's die Möglichkeit gegeben werden, Batterien neuester Generation frühzeitig IP-gesichert auf ihre Recyclierfähigkeit testen zu lassen. Die gewonnenen Kreislaufmaterialien sollen anschließend, u.a. in der FFB in Münster, auf ihre Eignung in der Batteriefertigung getestet werden. Die Bereitstellung einer virtuellen Recyclingprozesskette und deren Kopplung mit Methoden und Werkzeugen der ganzheitlichen lebenszyklusorientierten Bewertung erweitern die bereits bestehenden Möglichkeiten der Digitalisierung des Batterielebenszyklus und bieten die ideale Grundlage für die weitere Erforschung von Batterien entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Die Ergebnisse

unterstützen die deutschen Recyclingunternehmen und Stärken gezielt durch fundierte Analysen zu best-available-Technologien, als Basis für eine Spitzenposition auf dem internationalen Markt.

Ebenfalls nicht zu vernachlässigen ist die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses sowie von Know-How-Trägern für die deutsche Wirtschaft. Somit wird über den Ideentransfer und die Verwertung der Projektergebnisse hinaus, eine enge Anbindung an die industrielle Wertschöpfung erreicht. Somit resultiert aus den Projekten des Kompetenzclusters nicht nur eine anwendungsorientierte Themenumsetzung, wobei ein TRL 6 Level entstehen könnte, sondern eine Stärkung der deutschen Wirtschaft und Forschung auf allen Ebenen.

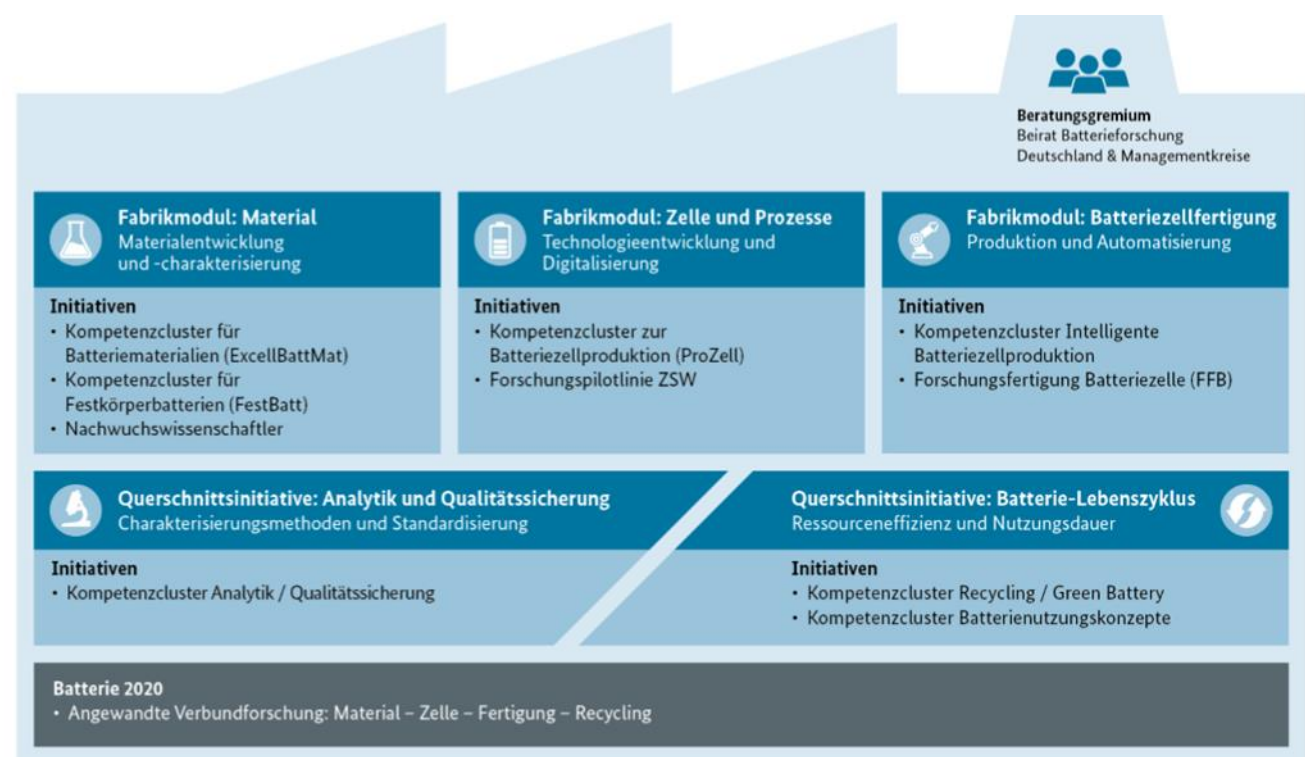


Abbildung 2: Integration der missionsorientierten Module im Dachkonzept „Forschungsfabrik Batteriezelle“ (BMF)

Die vielfältigen Anknüpfungspunkte zu den Bereichen Material (ExZellBatMat, FestBatt), Prozessentwicklung (ProZell, Intelligente Batteriefertigung, QS/Analytik) und industrielle Fertigung (Forschungsfertigung) erfordern einen intensiven Austausch zwischen den einzelnen Kompetenzclustern im Rahmen der Forschungsfabrik Batterie. So soll gewährleistet werden, dass neueste Erkenntnisse in der Materialentwicklung im Recyclingprozess Berücksichtigung finden und recyclinggerechte System- und Zellaufbauten in die Entwicklung von Fertigungsprozessen einfließen. Dieser Austausch wird über das Querschnittsprojekt „2nd use und Grüne Batterie“ sichergestellt. Details sind in Kapitel 3.3 dargestellt.

3. Cluster- & Governancestruktur

3.1. Clusterstruktur

Derzeit gibt es keine nationale Hochschule oder außeruniversitäre Forschungseinrichtung, die in allen genannten Aspekten und deren komplexem Wechselspiel über Kompetenz und apparative Ausstattung verfügt. Allerdings weisen verschiedene Einrichtungen ein hohes Maß an hohe Kompetenzen in einzelnen Bereichen, wie der Material(re-)synthese, Zell(retro)produktion, dem stofflichen Recycling oder Methoden zur lebenszyklusorientierten Analyse und Bewertung aus. Um zielgerichtet und kurzfristig ein tiefgehendes und systemisches Verständnis zu erreichen, ist es daher erforderlich, die relevanten Forschungsaktivitäten und damit deren Kompetenzen in einer Struktur zu verknüpfen. Die Vielzahl der Fragestellungen, die sich aus der inhärenten Komplexität ergeben, können erst durch die intensive Zusammenarbeit in diesem Forschungscluster erfolgreich bearbeitet werden. Dabei ist nicht nur die Erarbeitung technischer Lösungen erforderlich, sondern es bedarf auch einer umfassenden industriellen Akzeptanz und Unterstützung, welche durch die geeignete Einbindung von industriellen Partnern in Entscheidungsprozesse des Clusters sicherzustellen ist.

Für das Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“ wurde vor diesem Hintergrund die in Abbildung 3 dargestellte Cluster-Struktur entwickelt.

Um die durchzuführenden Forschungsaktivitäten eng zu verknüpfen, und die Kompetenzen beteiligter Forschungseinrichtungen sinnvoll zu bündeln, Synergien zu nutzen, und eine effiziente Zusammenarbeit zu fördern ist eine enge Zusammenarbeit mit den übrigen Kompetenzclustern der ‚Forschungsfabrik Batterie‘ vorgesehen.

Um die Orientierung auf industrielle Anforderungen abzusichern, wird die Querschnittsinitiative Batterielebenszyklus durch einen Managementkreis unterstützt. Dieser hat die Aufgabe, die Kompetenzcluster ‚Batterienutzungskonzepte‘ und ‚Recycling/ Grüne Batterie‘ bei der Initialisierung und der zielgerichteten Arbeit zu unterstützen. Dafür werden die Projekte über die Laufzeit aktiv durch den Managementkreis begleitet, bewertet und im Dialog mit den Projektbeteiligten angepasst.

Die wissenschaftliche Koordination und das organisatorische Management des Kompetenzclusters „Recycling & Grüne Batterie“ erfolgt basierend auf den Empfehlungen des Managementkreises durch ein 3-köpfiges Koordinatorenteam in Abstimmung mit dem BMBF und Projektträger PTJ. Zum Zweck der fachlichen Beratung und Lenkung des Forschungsclusters können das BMBF und der Projektträger PTJ den BMBF-Beirat „Batterieforschung Deutschland“ hinzuziehen.

Das Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“ ist in sieben thematische Forschungsfelder (siehe Abschnitt 1.2) gegliedert. Um das wissenschaftliche Management aller Projekte und die zielführende Kommunikation zwischen den Projekten in den Forschungsfeldern sicherzustellen, wird als Begleitmaßnahme das Querschnittsprojekt „2nd Use & Grüne Batterie“ angelegt. Dies ermöglicht es darüber hinaus, die Fortschritte in den einzelnen Projekten kontinuierlich zusammenzutragen, und für den Managementkreis aufzuarbeiten, und so einen effizienten Informationsaustausch mit dem Managementkreis zu gewährleisten.

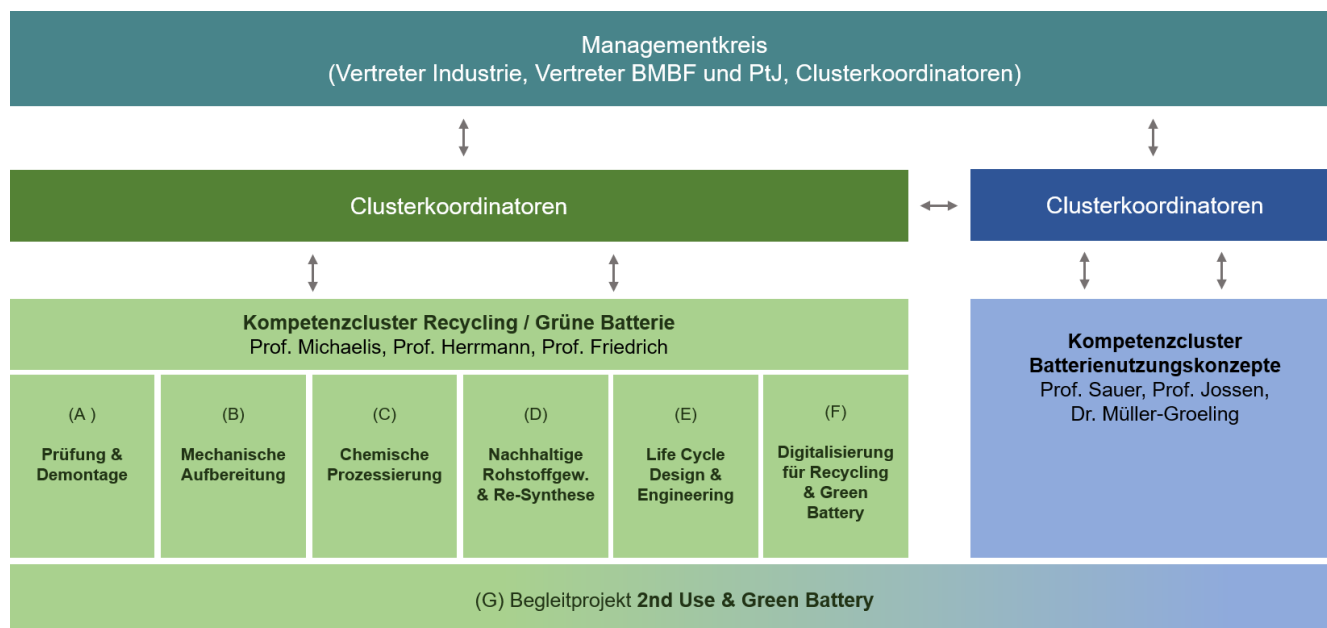


Abbildung 3: Organisationsstruktur des Clusters „Recycling & Grüne Batterie“

3.2. Governance-Struktur

Im Folgenden werden die wichtigsten Organe des Clusters sowie ihre Aufgaben, Verantwortlichkeiten und Befugnisse weiter detailliert.

Managementkreis

Der Managementkreis im Cluster „Recycling & Grüne Batterie“ setzt sich aus dem Koordinatorenteam, Vertretern des BMBF und des PTJ sowie Vertretern der Industrie zusammen.

Letztere werden vom BMBF ad personam berufen. Die Mitglieder des (industriellen) Managementkreises werden von den Koordinatoren der Cluster „Batterienutzungskonzepte“ sowie „Recycling & Grüne Batterie“ vorgeschlagen.

Bei begründetem Bedarf kann der Managementkreis erweitert werden. BMBF und PTJ sind als nicht stimmberechtigte Mitglieder im Managementkreis integriert (Gaststatus).

Der Managementkreis tritt mindestens halbjährlich zusammen. Er begutachtet und priorisiert vorgelegte Projektskizzen, bewertet Zwischenergebnisse und fördert die Zusammenarbeit der Forschungseinrichtungen sowie die Vernetzung der Projekte und formuliert entsprechende Empfehlungen. Er achtet darauf, dass Doppelarbeiten vermieden und Zusammenarbeiten gestärkt werden. Im Bedarfsfall werden zusätzliche Treffen einberufen. In halbjährlich stattfindenden Fortschrittskolloquien und -workshops berichten die Einzel- und Verbundvorhaben dem Managementkreis in Form von wissenschaftlichen Kolloquien ausführlich. Der Managementkreis begleitet die Projekte und beobachtet dabei insbesondere die Erreichung der Meilensteine. Sofern erforderlich und sinnvoll ist er angehalten, Arbeitsplanänderungen (per Mehrheitsentscheid) zu empfehlen. Die Arbeiten des Clusters werden diskutiert und dessen strategische Weiterentwicklung beurteilt. Dazu werden Leistungskennzahlen (KPI) definiert, welche den Reifegrad, das Transferpotential und die Auswirkungen der Forschungsaktivitäten im Hinblick auf die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit beurteilen. Neben der inhaltlichen Begutachtung der Forschungsvorhaben, sollen die Industrievertreter frühzeitig Bedarfe und eigene Impulse in das Cluster hineingeben und durch Erfahrungsberichte und Marktentwicklungen die Weiterentwicklung des Verbundes begleiten.

Aufgaben der Mitglieder des Managementkreises:

- ✓ Begleiten Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“
- ✓ Nehmen an regelmäßigen Status-Meetings teil
- ✓ Festlegung von KPIs
- ✓ Strategische Weiterentwicklung des Clusters
- ✓ Aussprechen von Empfehlungen gegenüber dem BMBF
- ✓ Feedbackgeber für die Forschungsprojekte in den Forschungsfeldern
- ✓ Vernetzung mit weiteren Clusterinitiativen (national und international)
- ✓ Bedarfe des Marktes aufzeigen

Vorsitzender des Managementkreises ist Dr. Peter Lamp, BMW AG.

Die Mitglieder des Managementkreises kommen für entstehende Reisekosten selbst auf. Für sonstige Kosten der Workshops/Treffen des Managementkreises wird ein separates Budget im Rahmen der Querschnittsinitiative „2nd Use & Grüne Batterie“ veranschlagt.

Die Mitwirkenden im Managementkreis, Industrievertreter und Clusterkoordinatoren, verpflichten sich, alle Unterlagen und Informationen, die ihnen im Rahmen des BMBF-Kompetenzclusters zur Verfügung gestellt werden, vertraulich zu behandeln.

Koordinatorenteam

Das wissenschaftliche und organisatorische Management des Clusters erfolgt in Abstimmung mit dem BMBF und PTJ durch das 3-köpfige Koordinatorenteam Prof. Michaelis (Fraunhofer IKTS), Prof. Herrmann (Technische Universität Braunschweig) und Prof. Friedrich (RWTH Aachen). Den Koordinatoren obliegt die Organisation von regelmäßigen Statustreffen und Workshops mit Vertretern der Forschungseinrichtungen. Unterstützt werden sie dabei durch das Querschnittsprojekt „2nd Use & Grüne Batterie“. Die Sprecher-Rollen des Kompetenzclusters teilen sich Prof. Michaelis (inhaltlicher Schwerpunkt „Recycling“) sowie Prof. Herrmann, (inhaltlicher Schwerpunkt „Grüne Batterie“). Die Sprecher repräsentieren das Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“ gegenüber dem BMBF, PTJ und sind Kommunikationsschnittstelle zum BMBF und PTJ sowie zu anderen Initiativen und der Öffentlichkeit.

Aufgaben:

- ✓ Kommunikation gegenüber BMBF, PTJ, Industrie und Öffentlichkeit
- ✓ Organisation wissenschaftlicher Workshops und Kolloquien zum Technologietransfer
- ✓ Repräsentation des Kompetenzclusters „Recycling & Grüne Batterie“ in der Fachwelt

Rahmenbedingungen

In den Vorhaben sollen mindestens 3 Meilensteine definiert werden, welche die Erreichung der Projektziele in regelmäßigen, engen Zeitabständen überprüfbar machen. Die Planung soll darüber hinaus für das Forschungsvorhaben min. ein zentrales, quantifizierbares Abbruchkriterium enthalten, welches Bezug zur Erreichung der Gesamtziele des Kompetenzclusters hat. Sind die Erfolgsaussichten des Projektes zum Zeitpunkt eines solchen Abbruchmeilensteins sehr gering, so kann dieses Projekt abgebrochen werden. Falls während der vorherigen Bearbeitungsphase Kenntnisse erlangt worden sind, mit Hilfe derer unter Anpassung des Arbeitsplanes die Erfüllung der Projektziele noch gewährleistet werden kann, so kann als Alternative zum Projektabbruch eine Arbeitsplanänderung in Frage kommen. Die Änderungen des Arbeitsplans müssen vom BMBF (ggf. vertreten durch PTJ) genehmigt werden.

Der Managementkreis begutachtet die Arbeit in den Projekten regelmäßig in halbjährlichen Forschungskolloquien. Nach der Hälfte der Projektlaufzeit (nach 1 ½ Jahren) erfolgt eine kritische Bewertung der

Projekte in Bezug auf die Erreichung der Teil- und Globalziele und die Ausrichtung der Projekte hinsichtlich der zentralen Anforderungen. Der Managementkreis kann Arbeitsplanänderungen empfehlen.

Grundsätzliche Nebenbestimmungen

- NB 1: Der Rahmenplan ist integraler Bestandteil der Antragsunterlagen und damit Bestandteil der Bewilligung.
- NB 2: Die Verbundvorhaben erstatten dem Managementkreis innerhalb der Forschungskolloquien regelmäßig Bericht.
- NB 3: Jeder Projektpartner ist zum Austausch der Ergebnisse innerhalb des Projektes und zur Integration der wesentlichen Erkenntnisse in das Begleitprojekt „2nd Use & Grüne Batterie“ verpflichtet.
- NB 4: Zwischen den wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen des Clusters muss eine Kooperationsvereinbarung abgeschlossen werden.
- NB 5: Es wird erwartet, dass die Projektteilnehmer sich an begleitenden und evaluierenden Maßnahmen beteiligen, Informationen für die Bewertung des Erfolgs der Fördermaßnahme bereitstellen und einen institutionsübergreifenden, intensiven Erfahrungsaustausch durch Unterstützung eines Begleitprojekts aktiv mitgestalten.

3.3. Kooperation mit weiteren Clustern

Die Inhalte des Kompetenzclusters „Recycling und Grüne Batterie“ interagieren sehr eng mit den in anderen Kompetenzclustern bearbeiteten Themen. Dies betrifft bspw. zukünftige Materialien und Zellkonzepte. Verwendete Fertigungsverfahren, Systemdesign und Anknüpfungspunkte im Bereich Digitalisierung. Daher ist eine intensive Kooperation mit anderen Kompetenzclustern erforderlich und gewünscht. Dies betrifft den Austausch von Daten, Proben und die wissenschaftliche Diskussion.

Für einen engen Wissensaustausch mit den übrigen Kompetenzclustern und der Forschungsfertigung Batteriezelle sollen spezifische Austauschformate (z.B. Workshops) erarbeitet und in die Clustertreffen integriert werden. Hierzu werden die entsprechenden Vertreter der übrigen Cluster bzw. der FFB durch das Koordinatorenteam eingeladen. Ziel ist die Initiierung eines anlassorientierten effizienten fachlichen und organisatorischen Austauschs verbunden mit dem Ziel der Vernetzung und des Informationsaustauschs. Eine Übersicht über die geplanten Treffen ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Schnittstellen des Kompetenzclusters zur Forschungsfertigung Batteriezelle sind im Kapitel 5.2 ausführlicher dargestellt.

Tabelle 1: geplante Projekttreffen und Meeting - Koordinatorenteam (KT), Projektmitarbeiter (PM), Managementkreis (MK)

Maßnahme	Häufigkeit	Teilnehmerkreis
Treffen der Querschnittsinitiative Batterielebenszyklus +Treffen des MK	Jährlich	KT, MK, BMBF-Kompetenzcluster
Clustertreffen Recycling & Grüne Batterie + Treffen des MK	Halbjährlich	KT, PM, MK, FFB, BMBF-Kompetenzcluster
Forschungsfeldtreffen	Vierteljährlich	PM
Industriedialog, Workshop	Jahr 1 und 2	KT, PM, MK, Industrievertreter
Industrietag, Konferenz	Jahr 3	KT, PM, MK, Industrie, FFB, BMBF-Kompetenzcluster
Austausch FFB	Jährlich	KT, FFB-Vertreter

Für den Austausch von Daten, Proben und spezifischem Know-How werden im Rahmen der Kooperationsvereinbarung Regelungen getroffen, die die Basis für einen offenen Austausch bilden und das IP der Projektpartner schützen.

4. Kompetenzen

Das Kompetenzcluster erweitert im Rahmen der Querschnittsinitiative ‚Batterielebenszyklus‘ die bestehenden Module des Dachkonzepts „Forschungsfabrik Batterie“ insbesondere in den Feldern: Demontagesysteme² (Braunschweig), Prozessentwicklung für mechanische und hydrometallurgische Prozesse³ (alle Standorte), thermische Verwertung⁴ (Aachen), elektrochemische Aufbereitung⁵ (Dresden), die Primärrohstoffkompetenz (Freiberg/Dresden), Materialsynthese (Braunschweig, Dresden), die Entwicklung von Digitalisierungslösungen⁶ (Dresden, Clausthal, Braunschweig) sowie Nachhaltigkeitsbewertung, Computational Life Cycle Engineering und Systemsimulation⁷ (Braunschweig, Freiberg). Die vorgesehenen Projekte im Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“ knüpfen an umfangreichen Vorarbeiten an und ergänzen die bereits existierenden Kompetenzcluster.

Neben den Vorarbeiten zu Technologien und Methoden werden bestehende Infrastrukturen eingebracht, darunter: (a) Zentrum für die Batteriezellproduktion mit Recyclingpilotanlage (BLB Braunschweig), (b) Projektzentrum für Energiespeicher und Systeme ZESS der Fraunhofer-Gesellschaft, (c) Applikationszentrum für stoffliches Recycling (Fraunhofer IKTS, Freiberg), (d) Aufbereitungstechnik mit Pilotanlagencharakter für die mechanische, hydro-/pyrometallurgische sowie chemische Aufbereitung, (e) Prozesstechnik für die Re-Synthese sowie (f) diverse Prüftechnik (g) Systemanalyse und Economic Geology an TU BAF und HIF.

Das langfristig angelegte Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“ bündelt die umfassenden Erfahrungen, Kompetenzen und anlagentechnischen Infrastrukturen der Partner. Die projektbezogenen Vorarbeiten und vorhandenen Infrastrukturen sind nachfolgend detailliert dargestellt.

4.1. Projektbezogene Vorarbeiten

Im Forschungsprojekt „**LithoRec I und II** – Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (16EM1024) wurden verschiedene Recyclingverfahrenswege evaluiert und eine Pilotanlage einer mechanischen Aufbereitung entwickelt und umgesetzt. Hierbei wurde neben der mechanischen Trennung und Aufbereitung der Batteriematerialien ebenfalls die (teil)automatisierte Demontage sowie eine Kreislaufführung recycelter Aktivmaterialien untersucht. BMU gefördert, 2009-2016. U.a. IPAT, AIP, IWF.

Im Forschungsprojekt „**LiBri** – Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge“ (16EM0008) wurden Wege untersucht, über Vordemontage, pyrometallurgische Verarbeitung von Zellen/Zellblöcken und gezielter Prozessführung im Ofenprozess insbesondere im Bereich der Schlackenführung und –beeinflussung eine effiziente und gegenüber Inputschwankungen robuste Technologie zu entwickeln, auf deren Basis Co, Ni, Cu und Li zurückgewonnen werden können. BMU gefördert, 2009–2011. U.a. IFAD, umgesetzt im UMICORE UHT-Prozess und anschließenden Prozessstufen.

Das Ziel des Projektes „**Rückgewinnung der Rohstoffe aus Li-Ionen-Akkumulatoren** (FKZ.01 RW 0405)“ war die Entwicklung eines reststoffminimierten, prozessstufenarmen Recyclingprozesses, der die metallischen Wertkomponenten (Co, Cu, Al, Fe, Li) aus den Li-Ion-Batterien zurückgewinnt und in eine solche Form überführt, dass diese direkt möglichst weitgehend wieder in den Prozess der Batterieherstellung eingesetzt werden können. Weiterhin sollte zur Vertiefung der Wertschöpfungskette das hochwertige Leitsalz LiPF₆ selektiv zurückgewonnen werden. BMBF-gefördert, 2004-2008.

In dem EU-finanzierten Forschungsprojekt "High energy lithium-ion storage solutions" (**HELIOS**) (ID Finanzhilfevereinbarung: 233765) wurden die verschiedenen Batteriezelltypen in Bezug auf ihre Leistung, Lebensdauer, Kosten, Wiederverwertung und Sicherheitsmerkmale gegen Missbrauch verglichen – die zentralen

² LithoRec I & II, BaSiS, BaSS

³ LithoRec, LiBri, CycleNet, Hybride Lithiumgewinnung, Automotive Battery Recycling, LiBat, AutoBatRec, InnoRec, Mercator, Si-Drive, Libero, HELIOS

⁴ EcoBatRec, LiBri, ‚Rückgewinnung der Rohstoffe aus Li-Ionen-Akkumulatoren‘, LiVe; ‚Rückgewinnung der Wertstoffe aus zukünftigen Li-Ion-basierten Automobil-Batterien‘, LIB2015

⁵ Anlagenentwicklung im Industrieauftrag, MEXEM; GraKon, BSTW, PAKmem; LCD; SONEKTRO;

⁶ Industriekooperationen, Optospeck, Zell-Rö-Therm, Cast Monitor, CellMonitor, Recycling 4.0

⁷ BenchBatt, BattLCE, BattLTech, CycleNet, GeProNet, MaLiFest, Recyclingpass PAS 1049

Fragen, die zu einer erfolgreichen Vermarktung für Elektrofahrzeuge beitragen sollen. EU (FP7-Transport)-gefördert, 2009-2013.

LiVe Lithiumbatterie-Verbundstrukturen des (BMBF; FKZ. 03X4601E) befasste sich mit der Ausarbeitung eines Recyclingkonzeptes speziell für Li-Ion-Batterie-Elektrodenmaterialien aus Nanokompositen und Core-Shell-Materialien. BMBF-gefördert, 2009-2013.

Das Projekt „Rückgewinnung der Wertstoffe aus zukünftigen Li-Ion-basierten Automobil-Batterien“ (**LIB2015**) (BMBF, FKZ. 03X4610 A+B) befasste sich mit der Entwicklung eines reststoffminimierten, prozess-stufenarmen Recyclingverfahrens für Li-Ion basierte Automobilbatterien, das die produktspezifisch enthaltenen Wertmetalle Li, Co, Ni, Cu und Al zurückgewinnt und die Verwendungsmöglichkeiten des Elektrolyten prüft, BMBF-gefördert, 2009-2012.

Ausgehend von den Anforderungen im Recycling von Elektro- und Elektronik-Altgeräte wurde das Konzept eines Recyclingpasses und geeigneter internetbasierter Plattformen für den Informationsaustausch entwickelt und in der **PAS 1049** „Übermittlung recyclingrelevanter Produktinformationen zwischen Herstellern und Recyclingunternehmen – Der Recyclingpass“ zusammengefasst (PAS 1049:2004-12). U.a. darauf aufbauend werden im Forschungsprojekt „**Recycling 4.0** – Digitalisierung als Schlüssel für die Advanced Circular Economy“ (ZW 6-85018080) Technologien und Methoden für die Digitalisierung von (Retro)Produktionssystemen und die Informationsgewinnung und -verarbeitung entlang der Closed-loop Supply Chain von Traktionsbatterien entwickelt. EFRE gefördert, 2018-2021. TU Braunschweig, u.a. AIP, IFAD, IWF.

Im Forschungsprojekt **EcoBatRec** (BMU, FKZ. 16EM1062) mit dem Hauptziel der Entwicklung und Erprobung von wirtschaftlich tragfähigen Recyclingtechnologien für Lithium-Ionen-Batterien von Elektrofahrzeugen. Ein neuer Prozessschritt, die autotherme Vakuumpyrolyse, ermöglicht dabei neue Verfahrensabläufe im Bereich der Zerkleinerung, Klassierung und Sichtung und Trennung der verschiedenen Materialfraktionen. BMU-gefördert, 2012-2016.

Das Forschungsprojekt „**BenchBatt** – Benchmarking und Evaluation der Leistungsfähigkeit und Kosten von Hochenergie- und Hochvolt-Lithium-Ionen Batterien im Vergleich zu Post-Lithium-Ionen Technologien“ (BMBF, FKZ: 03XP0047C) befasste sich mit der theoretischen Beurteilung von HE-LIBs und PLIBs (Li/S, Li/O₂, Na-Systeme, Feststoffbatterien) auf Material-, Prozess-, Zell- sowie Systemebene bzgl. der Energiedichte, Kosten und Ressourcen sowie die experimentelle Validierung dieser Technologien auf Material-, Prozess- und Zellebene. BMBF gefördert, 2016-2019. U.a. IPAT, IWF.

Das Projekt „**BattLCE** - Lebenszyklusgerechte Auslegung von Batteriezellen und -systemen“ (Startprojekt im Projektzentrum für Energiespeicher und Systeme ZESS) befasst sich mit der Entwicklung und Umsetzung von effizienten Methoden und Werkzeugen zur Analyse, Bewertung und Gestaltung der ökologischen und ökonomischen Leistungsfähigkeit von Batteriezellen und -systemen über den Lebenszyklus. Im Fokus steht die Bewertung von Wechselwirkungen, die durch Verbesserungsmaßnahmen auf technologischer Ebene verursacht werden.

Das Projekt „**BattLTech** - Battery Life Cycle Technologies“ (Startprojekt im Projektzentrum für Energiespeicher und Systeme ZESS) befasst sich mit der Identifikation und prototypische Entwicklung von Lebenszyklustechnologien (Life Cycle Technologies, LCT) zur Erfassung und Analyse aller für die lebenszyklusorientierte Analyse, Bewertung und Gestaltung von Energiespeichern benötigten Lebenszyklusdaten.

Im Projekt „**MaLiFest** - Materialfertigung für Lithium-Festkörperbatterien“ (Startprojekt im Projektzentrum für Energiespeicher und Systeme ZESS) erfolgt die entwicklungsbegleitende Analyse und Bewertung der Leistungsfähigkeit verschiedener Materialkonzepte für Festkörperbatteriesysteme über den Lebenszyklus im Hinblick auf Kosten und potentielle Umweltwirkungen. Ziel ist die frühzeitige Integration von Erkenntnissen aus der Lebenszyklusanalyse und -bewertung in die Materialauswahl und die Gestaltung des Zellkonzepts im Sinne eines Designs for Life Cycle bzw. Life Cycle Engineering.

Das Projekt „**GeProNet** - Geschäftsprozesse und Netzwerkmanagement in der erweiterten Supply Chain zum Schließen von Produktkreisläufen“ (BMBF, FKZ: 01RI0623) befasst sich mit der Gestaltung und Koordination dynamischer Netzwerke zur aktiven, herstellereinspezifischen Rücknahme von Geräten. Hierdurch soll eine ökonomisch darstellbare Anwendung von verschiedenen Optionen eines hochwertigen, funktionellen Produktrecyclings erreicht werden. Das Ziel des Projektes besteht zudem in der Entwicklung von Referenzgeschäftsprozessen für diese Abläufe in einer erweiterten Supply Chain und der Umsetzung in einem integrierten Konzept für eine durchgehende IT-Unterstützung. BMBF-gefördert, 2006–2009. U. a. AIP, IWF.

Das Projekt „**CycleNet** - Gestaltung und Lenkung von Stoffstromnetzwerken zum Recycling komplexer Verbundprodukte“ (DFG, HE 1890/16-1) befasst sich mit Handlungsempfehlungen zur strategischen Gestaltung von Recycling-Netzwerken sowie der optimierten Lenkung der Stoffströme innerhalb der Netzwerke. Darüber hinaus werden Handlungsempfehlungen zur Auslegung und Dimensionierung von Demontagesystemen sowie der Kostenminimierung durch Einsatzteilautomatisierter Demontagesysteme gegeben. DFG-gefördert, 2001–2005. U. a. AIP, IWF.

Im Projekt „**Hybride Lithiumgewinnung**“ (BMBF, FKZ: 03WKP18A) wurde eine energiesparende und damit umweltfreundliche Aufbereitungstechnologie sowohl für das heimische fluorhaltige Erz Zinnwaldit als auch für Sekundärrohstoffe (Akkumulatorenrückstände) entwickelt. Die Untersuchungen bildeten die Grundlage für den COOL-Prozess (CO₂-leaching) zur Rückgewinnung von Lithium in „battery grade“ Qualität. Neben der eigentlichen Verfahrensentwicklung erfolgte auch eine umfangreiche Studie zur Erschließung von Sekundärrohstoffen. Die Studie beinhaltet den Umfang, die Vielfalt und die Zusammensetzung von Akkumulatoren und Batterien. Es wurden die Anforderungen an deren Recycling hinsichtlich Kosten sowie technischen, ökologischen und wirtschaftlichen Aspekten aufgezeigt. Konzepte zur Entsorgungslogistik wurden entwickelt. BMBF gefördert, 2011-2013.

Libero (AiF-ZIM, FKZ. ZF4696501CM9) stellt einen robusten und flexiblen, nahezu abfallfreien Prozess dar, der designt wurde, um alle in gebrauchten Li-Ionen-Batterien (LIBs) enthaltenen Wertmetalle, den Elektrolyten und Graphit für die zukünftige industrielle Umsetzung zurückzugewinnen. Dieses Projekt unterscheidet sich von allen gegebenen industriellen Prozessen dadurch, dass es selektiv und effizient das gesamte Spektrum der LIBs enthaltenen Metalle zurückgewinnt, indem es mechanische Behandlungs- sowie hydrometallurgische Verfahren einsetzt, um höhere Produkterlöse als erwartete Prozesskosten zu erzielen. AiF-ZIM Förderung 01.09.2019 – 31.08.2021.

Ziel des Projektes **MERCATOR** (BMU, FKZ. 16EM4007-2) ist die Optimierung des Li-Ionen Batterierecyclingprozesses vor dem Hintergrund ökologischer, ökonomischer und versorgungstechnischer Aspekte. Im Vordergrund steht die Rückgewinnung aller werthaltigen und zum Teil als kritisch eingestuften Sekundärstoffe unter Verbesserung der Ökobilanz der Batterien. Dafür wird ein innovativer Zonen-Ofen im Pilot-Maßstab entwickelt, in dem Fahrzeugbatterien thermisch deaktiviert und für einen anschließenden, materialeffizienten Aufbereitungsprozess vorbehandelt werden. Bisher nicht recyclingfähige Stoffe wie Lithium sollen in einem frühen Prozessstadium mittels Phasentransformation verlustarm zurückgewonnen werden. Parallel ist beabsichtigt, die enthaltenen Oxide zu elementaren Metallen zu reduzieren und diese vorzeitig auszuschleusen, sodass der anschließende hydrometallurgische Prozess entlastet wird. Zusätzlich wird die Aufbereitung des enthaltenen Graphits untersucht, um diesen wieder als Rohstoff bereitzustellen. BMU Förderung 01.08.2019 – 31.07.2022.

Si-DRIVE (ID Finanzhilfvereinbarung 814464) wird die nächste Generation von wiederaufladbaren Li-Ionen-Batterien entwickeln, die kostengünstige Elektrofahrzeuge durch Innovationen in den Bereichen Materialien und Zellchemie ermöglichen und mit nachhaltigen und recycelbaren Komponenten mehr Sicherheit bei überlegener Energiedichte, Lebensdauer und Schnellladefähigkeit bieten. Die Technologie umfasst amorphes Si, das als Anode mit polymeren / ionischen flüssigen Elektrolyten und Li-reichen Hochspannungskathoden (Co-frei) auf ein leitfähiges Cu-Silizidnetzwerk aufgetragen wurde, und zwar über Prozesse, die skalierbar und nachweislich in der EU herstellbar sind. Auch die Eignung für 2nd-Life-Anwendungen bei reduzierter Energiedichte wird nachgewiesen, sodass kosteneffizientes Materialrecycling durchgeführt wird. Das Konsortium verfügt über die erforderliche Partnerkompetenz, um diese Technologie bereitzustellen und umfasst Materialdesign und -

synthese, elektrochemische Tests, Prototypenbildung, Ökobilanzierung und Recycling. European Union's Horizon 2020 Förderung 01.01.2019 – 31.12.2023.

Im Projekt **InnoRec**, welches im ProZell 2 Cluster verortet ist (BMBF, FKZ: 03XP0245A) sollen innovative Recyclingprozesse für neue Lithium-Zellgenerationen entwickelt werden. Hierbei wird das komplette Knowhow aus den bisher in Clausthal, Braunschweig, Aachen, Freiberg und Münster entwickelten Prozessen für das Recycling aktueller Batteriegenerationen über den derzeitigen Forschungsstand auf Basis der Arbeiten im ProZell Cluster (1+2) sowie der Outreach für die künftig zu erwartenden Feststoffelektrolyt-Zellen zugrunde gelegt und mechanisch-thermisch-chemische Prozessrouten für die mittel- bis langfristig erwarteten Batteriegenerationen entwickelt. BMBF-gefördert, 2019–2022. U.a. IFAD, iPAT, IME, MVTAT, MEET.

LiBat-Rückgewinnung – Aufbereitung von Produktionsabfällen und kompletten Li-Ionen Batteriezellen zur Rückgewinnung und Wiederverwertung des Aktivmaterials, Förderkennzeichen 16SBS007C, BMBF, 2012-2016 (Fh IKTS) Automotive Battery Recycling and 2nd Life.

AbattReLife (BMW / ERANET Electro-mobility+) Mechanical processing of EV-batteries; save processing strategy, mechanical sorting of liberated materials, development of overall process scheme, 2012-2015.

Adoption of process technology to BWM battery cells. Proof of concept for recycling rates above 50 %. Continuous adoption of process strategy to development of battery technology, i.e. battery composition, 2015-2019.

AutoBatRec (EU, EIT RawMaterials) Combination of mechanical pre-treatment and pyro-metallurgical processing; generation of concentrates for Umicore smelter technology, 2018-2021.

Projekt „ARTEMYS“ (BMBF), Skalierbare, kostengünstige Fertigungstechnologien für Kompositkathoden und Elektrolytseparatoren in Festkörperbatterien.

Kompetenzcluster „**Festbatt**“ (BMBF), Kompetenzcluster Festelektrolyte und Feststoffbatterien: Phosphatelektrolyte – Skalierung und Eigenschaftsmodifikation.

Projekt „**ePadFab**“ (SAB), „Innovative Technologien zur industriellen Herstellung integrierter, großformatiger Bipolarbatterien mit Flüssigelektrolyt“.

Projekt „**EMBATT2.0**“ (BMBF), „Material- und Prozessentwicklung für die effiziente Fertigung von großformatigen Bipolarbatterien mit Polymerelektrolyt“.

Projekt „**EMBATTgoesFab**“ (BMW), „Entwicklung von Prozessen zu Herstellung von Bipolarelektroden auf metallischen Ableitern für das Elektrodensystem NCM/Graphit“.

4.2. Vorhandene Infrastrukturen

Fraunhofer IKTS/TU Bergakademie Freiberg, vertreten durch Prof. Michaelis:

- Aufbereitungstechnik mit Pilotanlagencharakter (Vorsortierung, Thermische Behandlung, Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung)
- Prüffeld für Entwicklung von Monitoringtechnologien (incl. Prüftechnik und Sensorik)
- Prozesstechnik und Wärmebehandlung für Re-Synthese von Rohstoffen (bis Batchgröße 100 kg)
- Primärrohstoffkompetenz an TU Bergakademie Freiberg
- Laugung, Fällung, selektive Adsorption, flüssig-flüssig-Extraktion
- Elektrochemische Behandlungsschritte (Abscheidung, Oxidation/Reduktion) bis Pilotmaßstab
- Rückgewinnung und Reinigung Aufschlussmedien, Abwasserbehandlung bis Pilotmaßstab einschließlich toxische Spurenstoffe, Organik etc.
- Bilanz- und Verweilzeitanalysen mit Radiotracer

TU Braunschweig/Fraunhofer IST/TU Clausthal, vertreten durch Prof. Herrmann:

- Battery LabFactory Braunschweig als bestehende Infrastruktur für die digitalisierte und nachhaltige Produktion von Lithium-Ionen Batterien mit vollausgestatteter Datenerfassung und angeschlossener Recycling-Pilotanlage
- Automatisierte und sensorgestützte Laborzellaufbaustation unter Inertgasatmosphäre
- Flexible Roboterzelle geeignet zur Demontage von Batteriemodul und -systemen
- Mechanische Aufbereitungstechnik im Labor- und Pilotmaßstab (Demontage, Zerkleinerung, Elektrolyt-Rückgewinnung, Klassierung und Sortierung)
- Thermische Vorbehandlung für nachgeschaltete hydrometallurgische Separationsprozesse im Labor- und Kleintechnikumsmaßstab
- Hydrometallurgische Aufbereitung (Laugung unter verschiedenen p/T Bedingungen, Solventextraktion, ionenselektive Abscheidung, Strippung, Fällung, Flotation) im Labor und Pilotmaßstab
- Prozesstechnik für Re-Synthese
- Prüffeld für Analyse von Traktionsbatterien, Modulen und Zellen, inkl. Prüftechnik und Sensorik

RWTH Aachen, vertreten durch Prof. Friedrich:

- Gewinnung von Batterie-Rohstoffen durch nachhaltigen Bergbau, angepasster Erzaufbereitung und metallurgischer Prozesstechnik („Green Metallurgy®“) in numerischer Simulation sowie Experimente in Skalen von Labor bis Demonstration
- Forschungsplattform „Batterierecycling“ umfassend: Grundlagenexperimente, Prozesssimulation und (semi-)kontinuierliche Demonstrationsanlagen für:
 - mechanische Aufbereitung (Demontage z.T. automatisiert, Zerkleinerung, Flotation, Sortierung z.T. Sensor basiert, Klassierung)
 - thermische Vorbehandlung (Pyrolyse, Thermolyse, Wärmebehandlung, Mikrowelle, supercritical CO₂-Behandlung)
 - Schmelzreaktoren in unterschiedlichen Dimensionen vom Labor- bis in den Technikumsmaßstab (Elektrolichtbogenöfen, TBRC, Induktionsöfen, Abgasmessung über FTIR)
 - hydrometallurgische Technologien (Laugung, Fällung, Extraktion) mit Prozesswasserbehandlung (Organik-Separation, Potential gesteuerte Trennung)
 - Stoffstromanalyse, LCA, Umweltfolgeabschätzung, rechtliche Rahmenbedingungen, soziale Akzeptanz
- Chemische Analytik (z.B. ICP-OES/MS, RFA/XRD, TG/DTA, TOC, LIBS, Laser-Particle-Sizer, Bildanalyse, SEM/TEM, FIB, ...)

National:

- Prof. Martin Bertau, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Technische Chemie
- Prof. Klaus Dröder, Technische Universität Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), Professur für Fertigungstechnologien und Prozessautomatisierung
- Prof. Sabine Flamme, FH Münster, IWARU - Institut für Infrastruktur, Wasser, Ressourcen und Umwelt
- Prof. Dr. Georg Garnweiter, Technische Universität Braunschweig, Institut für Partikeltechnik (iPAT)
- Prof. Daniel Goldmann, Technische Universität Clausthal, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (IFAD), Lehrstuhl für Rohstoffaufarbeitung und Recycling
- Prof. Olivier Guillon, FZ Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK-1): Werkstoffsynthese und Herstellungsverfahren
- Prof. Dr.-Ing. Jana Kertzsch, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Elektrotechnik
- Prof. Arno Kwade, Technische Universität Braunschweig, Institut für Partikeltechnik (iPAT), Fraunhofer Institut für Schicht und Oberflächentechnik (IST)
- Prof. Holger Lieberwirth, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Aufbereitungsmaschinen
- Prof. Urs A. Peuker, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik
- Prof. Andreas Jupke, RWTH Aachen University, Aachener Verfahrenstechnik (AVT)
- Prof. Thomas Pretz, RWTH Aachen University, IAR mechanisches Recycling und sensorgestützter Sortierung
- Prof. Thomas Spengler, Technische Universität Braunschweig, Institut für Automobilwirtschaft und industrielle Produktion (AIP), Lehrstuhl für Produktion und Logistik
- Prof. Thomas Vietor, Technische Universität Braunschweig, Battery LabFactory Braunschweig (BLB), Institut für Konstruktionstechnik (IK)
- Prof. Hermann Wotruba, RWTH Aachen University, Lehr- und Forschungsgebiet Aufbereitung mineralischer Rohstoffe (AMR)
- Prof. Dr. Jürgen Janek, Justus Liebig-Universität Gießen, Physikalisch-Chemisches Institut
- Prof. Dr. Gerhard Sextl, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Lehrstuhl Chemische Technologie der Materialsynthese; Fraunhofer Institut für Silicatsforschung ISC
- Prof. Jens Gutzmer, Prof. Reuter, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR/HIF)
- Prof. Albrecht Wolter, TU Clausthal, Institut für Nichtmetallische Werkstoffe: Bindemittel und Baustoffe (INW)
- Prof. Christoph Leyens, TU Dresden, Institut für Werkstoffwissenschaft, Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS)
- Prof. Matthias Wesseling, RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Chemische Verfahrenstechnik (AVT.CVT)
- Prof. Hermann Nirschl, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik
- Prof. Johannes Heitmann, TU Freiberg, Institut für Angewandte Physik
- Prof. Jürgen Fleischer, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Produktionstechnik (WBK)
- Prof. Michael Kurrat, TU Braunschweig, Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen
- Prof. Klaus Dilger, TU Braunschweig, Institut für Füge und Schweißtechnik (IFS)
- Prof. Uwe Schröder, TU Braunschweig, Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie (IÖNC)
- Prof. Rainer Krull, TU Braunschweig, Institut für Bioverfahrenstechnik
- Prof. Anke Weidenkaff, Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie (IWKS)
- Prof. Michael Fischlschweiger, TU Clausthal, Institut für Energieverfahrens- und Brennstofftechnik (IEVW)
- Dr. Thorsten Graupner, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Geozentrum Hannover (BGR)
- Prof. Achim Kampker, RWTH Aachen University, Production Engineering of E-Mobility Componente (PEM)
- Prof. Bernd Kühlenkötter, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS)
- Prof. Wilhelm Schabel, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institute Thermal Process Engineering/ Thin Film Technology

- Dr. rer. nat. Univ. Prof. Dirk Uwe Sauer, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik

International:

- Prof. Helmut Antrekowitsch, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie
→ Wissenschaftlicher Austausch, auch Einladungen von Wissenschaftlern, im Themenbereich **Pyrometallurgie/Schlacke-Metall Gleichgewichte/Zero Waste**, gegenseitige Zweitgutachter bei Doktorarbeiten
- Prof. Christian Ekberg, Chalmers University of Technology, Chemistry and Chemical Engineering, Industrial Materials Recycling and Nuclear Chemistry, Schweden
→ Wissenschaftlicher Austausch, auch Einladungen von Wissenschaftlern, im Themenbereich **Hydrometallurgie/Solventextraktion/chemische Fällung**, gegenseitige Zweitgutachter bei Doktorarbeiten
- Prof. Sami Kara, University of New South Wales, Sydney Australien, School of Mechanical and Manufacturing Engineering:
→ Wissenschaftlicher Austausch im Themenbereich Life Cycle Engineering und Nachhaltigkeitsbewertung, Austausch von Informationen und Modellen zum Rohstoffmining und zur Materialvorkette für wichtige Batteriematerialien, Austausch von wissenschaftlichen Mitarbeitenden, gegenseitige Zweitgutachter bei Doktorarbeiten, Förderung des "Industrial Networking" innerhalb der Wertschöpfungskette zwischen Deutschland und Australien.
- Assistant Prof. Mari Lundström, Aalto University, Department of Chemical and Metallurgical Engineering, Finnland
→ Wissenschaftlicher Austausch, auch Einladungen von Wissenschaftlern, im Themenbereich **Synthese wiederverwertbarer Batterierohstoffe, Verbindungsraffination**, gegenseitige Zweitgutachter bei Doktorarbeiten

5. Ideen-, IP- & Technologietransfer - Verwertungsplan

Die Überführung der Projektergebnisse und die Bereitstellung neuer Technologien sind von übergeordnetem Interesse für das Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“. Nur wenn die Entwicklungen von der Industrie übernommen werden, kann ein langfristiger Mehrwert und technologischer Fortschritt im Bereich Batterieforschung aber auch in der Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands erreicht werden. Nachfolgend wird auf den Wissens- und Technologietransfer zur Stärkung nationaler Unternehmen sowie auf den Beitrag zur Innovationspipeline „Batterie“ eingegangen.

5.1. Wissens- und Technologietransfer zur Stärkung nationaler Unternehmen

Um den vielfältigen Verwertungsmöglichkeiten gerecht zu werden, setzt das Cluster verschiedene bereits etablierte Instrumente des Technologie- und Wissenstransfers ein (Abbildung 4).

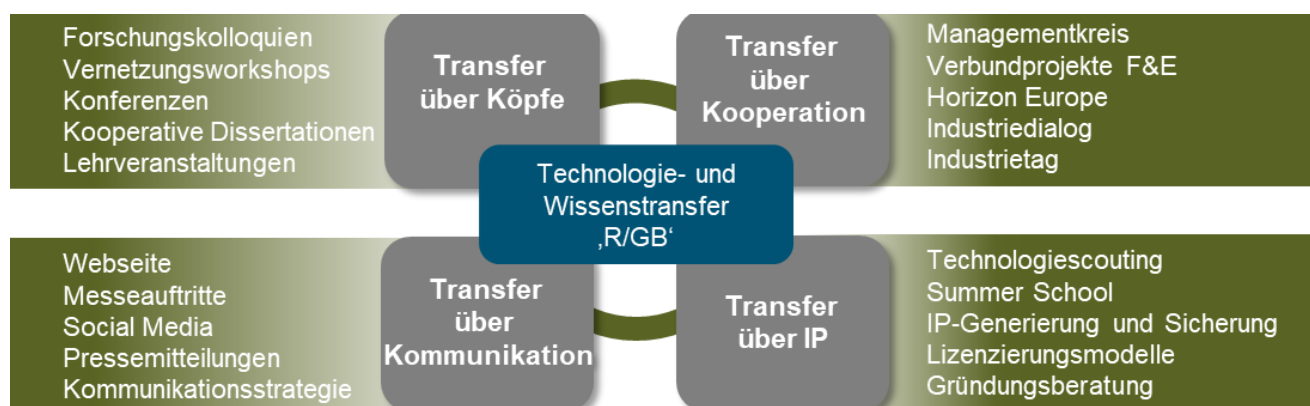


Abbildung 4: Wissens- und Technologietransfer im Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“

Transfer über Köpfe

Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedener Standorte und Arbeitsgruppen wird innerhalb des Clusters ein steter Wissensaustausch garantiert. Mit dem engen Austausch im Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“, der Abstimmung zwischen den Clustern durch gemeinsame Forschungskolloquien und Vernetzungsworkshops und der aktiven Teilnahme an nationalen und internationalen Konferenzen sind ideale Voraussetzungen für den wissenschaftlichen Austausch und die Einbeziehung neuester Erkenntnisse in angrenzenden Wissensbereichen geschaffen. Die Übernahme neuer Erkenntnisse und Forschungsinhalte in die Lehre und Ausbildung durch involvierte Hochschulen bilden den Grundpfeiler für die nächste Generation von Arbeitnehmern für die Industrie. Durch Promotions- und Abschlussarbeiten werden hochqualifizierte Mitarbeiter bedarfsorientiert ausgebildet. Mittel- bis langfristig werden im Cluster auch kooperative Promotionsverfahren gemeinsam mit der Industrie angestrebt.

Transfer über Kooperation

Neben der Einbeziehung des Managementkreises ist eine lebendige Anbindung an die Industrie essentiell. Die Industrievertreter sind die wichtigsten Stakeholder, um aktuelle Bedarfe und Entwicklungen dem Cluster zu spiegeln. Dazu dienen Veranstaltungen wie der geplante Industriedialog (z.B. Austausch zu Standardisierungsthemen, zukünftigen Entwicklungen aus Sicht der Industrie) und der Industrietag (Präsentation von Clusterergebnissen mit spez. Fokus auf industrielle Bedarfe).

Im Rahmen von Projektarbeiten (z.B. ZIM; KMU-innovativ, Batterie 2020) sollen im Anschluss industrieführte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit Partnern aus dem Cluster durchgeführt werden. Um international konkurrenzfähig zu bleiben, sollen neben internationalen Symposien und Konferenzen auch Forschungsprojekte unter Horizon Europe beantragt und bearbeitet werden.

Transfer über Kommunikation

Eine wirksame Außendarstellung der Aktivitäten des Kompetenzclusters „Recycling & Grüne Batterie“ ist sowohl gegenüber politische Interessensträger als auch für die Neuakquise von Projektpartnern aus Industrie und Wissenschaft wichtig. Im Rahmen des Begleitprojektes „2nd Use & Green Battery“ soll ein ansprechender Internetauftritt umgesetzt werden, der als zentrale Informationsplattform dienen kann. Ausserdem sollen Templates z.B. für Berichte, Poster, etc. entwickelt und bereitgestellt werden. Weiterhin ist die Entwicklung einer Kommunikationsstrategie, welche u.a. Berichte, Newsletter, Messe- und Konferenzauftritte beinhaltet, vorgesehen.

Transfer über Ausgründungen und IP

Die Generierung und Sicherung von IP wird für eine spätere wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse und Technologien durch die Industrie frühzeitig unterstützt. Dafür wird ein Technologiescouting innerhalb der einzelnen Projekte durchgeführt und eine gezielte Unterstützung bei der Patentanmeldung, Lizenzierung und bei Gründungsbestrebungen angeboten. Die Begleitprojekte dienen hierfür als erster Kontakt und können je nach Bedarf auf zentrale Strukturen wie z.B. Technologietransferoffices und Patentbüros in ihren Organisationen zugreifen. Das Begleitprojekt unterstützt weiterhin bei der Gestaltung und Umsetzung von Schulungskonzepten hinsichtlich Technologietransfer und Gründung. Eine Maßnahme könnte eine jährlich durchgeführte "Summer School" zum Thema „Technologie – Verwertungspfade“ sein.

5.2. Beitrag zur Innovationspipeline „Batterie“

Für die schnelle Überführung von Ergebnissen des Kompetenzclusters in die industrielle Vorentwicklung ist eine enge Kooperation mit dem Standort Ibbenbüren geplant (vgl. Kap. 2). Auf diesem Wege soll Ibbenbüren als Einrichtung zur industrienahen Entwicklung und Erprobung von Recyclingprozessen genutzt werden. Dafür werden analog zum Vorgehen im Themenfeld Batterieproduktion innovative Lösungen und Innovationsmodule bis zu TRL6 entstehen, die als Beitrag eingebracht werden.

Das Kompetenzcluster „Recycling & Grüne Batterie“ beabsichtigt mit dem geplanten Standort in Ibbenbüren zu kooperieren. Darüber hinaus können Module, Zellen und Produktionsabfälle der FFB wie auch externer Quellen in den modular aufgebauten Pilotbehandlungslinien an den drei klassischen Aufbereitungs-/Recyclingstandorten in Clausthal/Braunschweig, Aachen und Dresden/Freiberg bereitgestellt werden, um auf Basis wissenschaftlicher Ergebnisse aus den mittlerweile stark vernetzten Forschungseinrichtungen in Deutschland ein Upscaling zu erproben, und eine lebenszyklusorientierte Gestaltung verschiedener Konzepte zu ermöglichen. Auf diesem Wege können alternative Methoden zur sicheren Lagerung, Entladung und Sortierung, wie auch Verfahren thermischer Konditionierung und metallurgischer Prozessierung sowie Re-Syntheseprozessen entwickelt und vergleichend bewertet werden. Unternehmen können an den unterschiedlichen Standorten ihre Anlagen integrieren und von zukünftigen Abnehmern testen lassen. OEM's können Batterien neuester Generation frühzeitig IP-gesichert auf ihre Recyclierfähigkeit prüfen. Gewonnene Kreislaufmaterialien könnten anschließend, u.a. in Münster, auf ihre Eignung in der Batteriefertigung untersucht werden. Diese Ergebnisse kommen wiederum den deutschen Recyclingunternehmen zugute, deren Position durch best-available-technology Empfehlungen international gestärkt wird. Direkt industriell anschlussfähige Ergebnisse des Kompetenzclusters werden in Verbundprojekten mit Industriepartnern weiterentwickelt.

6. Finanzierung & Kostenplan

Der Finanzbedarf des Clusters wird nach Priorisierung der Projektskizzen durch den Managementkreis festgelegt. Eine grobe Kostenzuordnung zu den Forschungsfeldern ist als Vorschlag in Tabelle 2 dargestellt. Die Kostenzuordnung wird sich im Zuge der Priorisierung konkreter Projektvorschläge durch den Managementkreis ggf. noch verschieben.

Tabelle 3: Finanzbedarf des Kompetenzclusters ‚Batterielebenszyklus – „Recycling & Grüne Batterie“ (Werte in Tausend €)

<i>Plattform</i>	<i>Personal</i>	<i>Invest</i>	<i>Material</i>	<i>Reise</i>	<i>Summe</i>
(A) Prüfung und Demontage	2.200	500	200	100	3.000
(B) Mechanische Aufbereitung	4.200	500	200	100	5.000
(C) Thermische und Chemische Prozessierung	7.200	500	200	100	8.000
(D) Nachhaltige Rohstoffgewinnung und Re-Synthese	6.200	500	200	100	7.000
(E) Life Cycle Design & Engineering	3.500	200	200	100	4.000
(F) Digitalisierung für Recycling & Grüne Batterie	3.200	500	200	100	4.000
(G) Begleitprojekt :2nd Use & Green Battery'	1670		93	62	1.825
Summe	28170	2700	1293	662	32.825

Anhang

Literatur- / Quellenverzeichnis

- 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, Ausgabe Volume 67, Issue 1.
- Diekmann, Jan, et al. "Ecological recycling of lithium-ion batteries from electric vehicles with focus on mechanical processes." *Journal of The Electrochemical Society* 164.1 (2016): A6184.
- Elwert, T., Frank, J. „Auf dem Weg zu einem geschlossenen Stoffkreislauf für Lithium-Ionen Batterien“. In *Recycling und Sekundärrohstoffe*, Band 13. Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2020. ISBN: 978-3-944310-51-0
- Elwert, T., Römer, F., Schneider, K., Hua, Q., & Buchert, M. (2018). Recycling of Batteries from Electric Vehicles. *Green Energy and Technology*, 289–321
- Espinosa, D., Bernardes, A., Tenório, J. „An overview on the current process for the recycling of batteries“. In *Journal of Power Sources* 135. 2004. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2004.03.083
- Hanisch, C., Elwert, T., Brückner, L. „Verfahren zum Verwerten von Lithium-Batterien.“ Patentschrift EP3517641A1, Duesenfeld GmbH, 2019.
- Harper, G. et al. „Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles“- In: *Nature* 575. 2019. DOI: 10.1038/s41586-019-1682-5.
- Heelan, J., Gratz, E., Zheng, Z. et al. „Current and Prospective Li-Ion Battery Recycling and Recovery Processes“. In: *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2016. DOI: 10.1007/s11837-016-1994-y
- Kwade, A. & Diekmann, J., 2018. Recycling of Lithium-Ion Batteries. The LithoRec Way. Berlin: Springer
- Martens, H., Goldmann, D. „Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis“. Zweite Auflage. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2016. ISBN: 978-3-658-02786-5
- Mayyas, A., Steward, D., and Mann, M. “The Case for Recycling: Overview and Challenges in the Material Supply Chain for Automotive Li-Ion Batteries.” United States: N. p., 2018. DOI: 10.1016/j.susmat.2018.e00087
- Schmidt et al. (2016) Investigation of the primary production routes of nickel and cobalt products used for Li-ion batteries, in: *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 112, S. 107-122.
- Sojka, R. „Sichere Aufbereitung von Lithium-basierten Batterien durch thermische Konditionierung“. In *Recycling und Sekundärrohstoffe*, Band 13. Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2020. ISBN: 978-3-944310-51-0
- Swain, B. “Recovery and recycling of lithium: A review.” In: *Separation and Purification Technology* 172, 2017. DOI: 10.1016/j.seppur.2016.08.031
- Tsiropoulos I., Tarvydas. D., Lebedeva N 2018 “Lithium-ion batteries for mobility and stationary storage applications Scenarios for costs and market growth for costs and market growth” European Commission 2018.
- Zeng, X. Li, J., Singh, N. „Recycling of Spent Lithium-Ion Battery: A Critical Review“. In *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44:10, 2014. DOI: 10.1080/10643389.2013.763578
- Zhao, C., He, M., Cao, H., Zheng, X., Gao, W., Sun, Y., Zhao, H., Liu, D., Zhang, Y., Sun, Z. “Investigation of solution chemistry to enable efficient lithium recovery from low-concentration lithium-containing wastewater” *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11705-019-1806-3>

Weiterführende Literatur aus dem Cluster

- Beier, M., et al. (2019): Silicon Waste from the Photovoltaic Industry - A Material Source for the Next Generation Battery Technology? Materials Science Forum, 2019. 959: p. 107-112.
- Bertau, M.; Voigt, W.; Schneider, A.; Martin G. (2017): Lithiumgewinnung aus anspruchsvollen Lagerstätten: Zinnwaldit und magnesiumreiche Salzseen. Chem. Ing. Tech. 2017, 89, 64-81. <https://doi.org/10.1002/cite.201600101>
- Bertau, M.; Martin, G.; Pätzold, C. (2015): Deutsche Patentanmeldung Nr. 10 2015 221 759, Verfahren zur CO₂-Behandlung von getemperten lithiumhaltigen Mineralien zur Herstellung von Lithiumcarbonat
- Bertau, M.; Martin, G.; Pätzold, C. (2016): Deutsche Patentanmeldung Nr. 10 2016 208 407, Verfahren zur Gewinnung von Lithiumcarbonat aus lithiumhaltigen Batterierückständen mittels CO₂-Behandlung
- Bertau, M.; Martin, G.; Pätzold, C. (2018): Deutsches Patent Nr. 10 2016 204 360 Verfahren zur Herstellung einer rubidium- und lithiumhaltigen wässrigen Lösung aus rubidium- und lithiumhaltigen Mineralien
- Bertau, M.; Martin, G. (2015): Deutsche Patentanmeldung Nr. 10 2015 203 395, Verfahren zur elektrodialytischen Herstellung von Lithiumhydroxid aus verunreinigten lithiumhaltigen wässrigen Diluaten
- Bertau, M.; Martin, G. (2016): Europäische Patentanmeldung Nr. 3 061 518, Verfahren zur elektrodialytischen Herstellung von Lithiumhydroxidhaltigen wässrigen Lösungen aus verunreinigten lithiumhaltigen wässrigen Lösungen
- Bockwinkel, K.; Thiede, B.; Dietrich, F.; Thiede, S.; Dröder, K.; Herrmann, C. (2018): Automated Evaluation of Battery Materials for More Efficient and Effective Battery Development. In 31st International Electric Vehicles Symposium and Exhibition & International Electric Vehicle Technology Conference 2018, Kobe, Japan.
- Borsdorff, D., et al. (2015): Aufschlusszerkleinerung von Li-Ionen Traktionsbatterien, in Jahrestagung Aufbereitung und Recycling. UVR-FIA e.V.: Freiberg.
- Cerdas, Felipe; Andrew, Stefan; Thiede, Sebastian; Herrmann, Christoph. 2017. Environmental Aspects of the Recycling of Lithium-Ion Traction Batteries. In Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management, 267–88. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70572-9_16.
- Cerdas, F.; Egede, P.; Herrmann, C. (2017): LCA of Electromobility. In Life Cycle Assessment: Theory and Practice, 669–92. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_27.
- Cerdas, F.; Gerbers, R.; Andrew, S.; Schmitt, J.; Dietrich, F.; Thiede, S.; Dröder, K.; Herrmann, C. (2018): Disassembly Planning and Assessment of Automation Potentials for Lithium-Ion Batteries. In Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management, 83–97. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70572-9_5.
- Cerdas, F.; Thiede, S.; Herrmann, C. (2018): “Integrated Computational Life Cycle Engineering Application to the Case of Electric Vehicles.” CIRP Annals 67 (1): 25–28. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2018.04.052>.
- Cerdas, F.; Titscher, P.; Bogner, N.; Schmuch, R.; Winter, M.; Kwade, A.; Herrmann, C. (2018): Exploring the Effect of Increased Energy Density on the Environmental Impacts of Traction Batteries: A Comparison of Energy Optimized Lithium-Ion and Lithium-Sulfur Batteries for Mobility Applications. Energies 11 (1): 150. <https://doi.org/10.3390/en11010150>.
- Chelgani, S.C., et al. (2015), Study of the relationship between zinnwaldite chemical composition and magnetic susceptibility. Minerals Engineering, 2015. 72: p. 27-30.

- Diekmann, J.; C. Hanisch, C.; Frobose, L.; Schalicke, G.; Loellhoeffel, T.; Folster, A.-S.; Kwade, A. (2017): Ecological recycling of lithium-ion batteries from electric vehicles with focus on mechanical processes. *Journal of the Electrochemical Society* 164(1), pp. A6184-A6191, DOI: 10.1149/2.0271701jes
- Diaz, F.; Wang, Y.; Moorthy, T.; Friedrich, B. (2018): "Degradation Mechanism of Nickel-Cobalt-Aluminum(NCA) Cathode Material from Spent Lithium-Ion Batteries in Microwave-Assisted Pyrolysis"; *Metals* 8 (2018), Online-Artikel DOI: 10.3390/met8080565
- Diaz, F.; Wang, Y.; Weyhe, R.; Friedrich, B. (2018): "Gas generation measurement and evaluation during mechanical processing and thermal treatment of spent Li-ion batteries". *Waste Management* 84 (2019), Seite 102–111 DOI: 10.1016/j.wasman.2018.11.029
- Diekmann, J; Hanisch, C.; Loellhoeffel, T.; Schällicke, G.; Kwade, A. (2016): (Invited) Ecologically Friendly Recycling of Lithium-Ion Batteries - the LithoRec Process, *ECS Trans.* 2016 73(1): 1-9; doi:10.1149/07301.0001ecst
- Elwert, T.; Hua, Qi.; Schneider, K. (2019): Recycling of Lithium Iron Phosphate Batteries: Future Prospects and Research Needs. In: *MSF* 959, S. 49–68. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.959.49.
- Elwert, T., Römer, F., Schneider K., Hua, Q., Buchert, M (2018): Recycling of batteries from electric vehicles. In: *Behaviour of Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles - Battery Health, Performance, Safety, and Cost*; Eds: Pistoia, G., Liaw, B., Springer International Publishing
- Elwert, T., Römer, F., Schneider K., Hua, Q., Buchert, M (2018): Recycling of batteries from electric vehicles. In: *Behaviour of Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles - Battery Health, Performance, Safety, and Cost*; Eds: Pistoia, G., Liaw, B., Springer International Publishing
- Elwert, T., Goldmann, D., Römer, F., Buchert, M., Schüler, D. (2016): Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen beim Recycling von Elektro- und Hybridfahrzeugen, *Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz*, Berlin, 07. - 08.03.2016. Veröffentlicht in: *Recycling und Rohstoffe*, Bd. 9, Hrsg.: K.-J. Thome-Kozmiensky, D. Goldmann, TK-Verlag, S. 275-294
- Elwert, T., Goldmann, D., Römer, F., Buchert, M., Merz, C., Schüler, D., Sutter, J. (2015): Current Developments and Challenges in the Recycling of Key Components of (Hybrid) Electric Vehicles, *Recycling*, 2015, No. 1, pp. 25-60, doi: 10.3390/recycling1010025
- Elwert, T., Goldmann, D., Schirmer, T., Strauß, K.(2012): Recycling of lithium ion traction batteries – The LiBRI project, *European Mineral Resources Conference*, Leoben, Austria, 19.-21.09.2012. Veröffentlicht in: *Raw materials are the future*, Hrsg.: L. Weber, R. Stiftner, S. 575-603
- Elwert, T., Goldmann, D., Schirmer, T., Strauß, K. (2012): Phase composition of high lithium slags from the recycling of lithium ion batteries, *World of Metallurgy – Erzmetall*, Bd. 65 (2012), No.3, p. 163-171
- Elwert, T., Goldmann, D., Schirmer, T., Strauss, K. (2012): Recycling von Li-Ionen-Traktionsbatterien – Das Projekt LiBRI, *Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz*, Berlin, 26.-27.03.2012, Veröffentlicht in: *Recycling und Rohstoffe*, Bd. 5, Hrsg. K.-J. Thome-Kozmiensky, D. Goldmann, TK-Verlag, S. 679 – 690
- Elwert, T., Goldmann, D., Schirmer, T. (2011): Rückgewinnung von Lithium aus Li-Ionen-Traktionsbatterien – Entwicklungen im Rahmen des LiBRI-Projektes, *Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz*, Berlin, 29.-30.06 2011, Veröffentlicht in: *Recycling und Rohstoffe*, Bd. 4, Hrsg. K.-J. Thome-Kozmiensky, D. Goldmann, TK-Verlag, S. 195 – 203
- Friedrich, B.; Peters, L.: "Impact of process chain design on metal recycling efficiency -A critical view on the actual total weight-based target". Conference: *ICBR 2019 Lyon*.
- Friedrich, B.; Peters, L.; Diaz, F. (2018): "Thermal conditioning of recycled Li-batteries – pre-treatment for safe and highly material efficient processing". Conference: *Circular Economy of Battery Production and Recycling (CEB) 2018*. DOI: 10.13140/RG.2.2.16211.22560/1

- Friedrich, B., Peters, L. (2017): "Status and Trends of industrialized Li-Ion battery recycling processes with qualitative comparison of economic and environmental impacts". Conference: ICBR 2017.DOI: 10.13140/RG.2.2.20429.33760
- Friedrich, H.-J., Jaeschke, R., Zschornack, D., Hielscher, M., Hinrichs, T., Wolfgramm, M. (2016): Analytisches und technologisches Screening für die Verfahrensentwicklung zur Gewinnung von strategischen seltenen Metallen aus Thermalsolen. Schlussbericht (Bundestiftung Umwelt), 2016. Projekt Nr. 31916/01-31
- Friedrich, H.-J., Jaeschke, R., Zschornack, D., Hielscher, M., Hinrichs, T., Wolfgramm, M. (2017): Verfahrensansätze zur Gewinnung strategischer seltener Metalle auf Basis von Thermalsolen in Deutschland. Vortrag Internationaler Geothermiekongress, München 2017
- Friedrich, H.-J., et. al. Verfahrensentwicklung/Prozesserprobung Gewinnung Seltene-Erden-Konzentration auf Basis sekundärer Rohstoffe (Seltene Erden AG Storkwitz)
- Friedrich, H.-J. (2016): Membrane Electrolysis – A Promising Technology for Mine Water Treatment, Radionuclide Separation and Extraction of Valuable Metals, International Mine Water Association (IMWA)-Congress, Abstracts, Leipzig/Freiberg 2016, pp. 240
- Friedrich, H.-J. (2017): Resource Extraction from Mine Water; ASSAf/Leopoldina Science Business Dialogue Conference, „Linking Science, Society Business and Policy for the Sustainable Use of Abandoned Mines in the SADC Region, Proceedings, Johannesburg (Südafrika), 2017, pp. 41
- Friedrich, H.-J. (2012): Verfahrensentwicklung/Erprobung zur elektrochemischen Rückgewinnung von reinem Tellur beim Recycling von Tandem-Solarzellen, (Forschungsbericht, unveröffentlicht), Dresden-Rossendorf 2012
- Friedrich, H.-J. (2015): Verfahrensentwicklung/Prozesserprobung Gewinnung Seltene-Erden-Konzentrate auf Basis sekundärer Rohstoffe (Forschungsbericht, unveröffentlicht, Dresden-Rossendorf)
- Friedrich, H.-J., Zaruba, A. (2006): Patentanmeldung Deutsches Patent DE 10 2006 056 017 „Verfahren zur Rückgewinnung von Edelmetallen“
- Friedrich, H.-J., Rott, H.-J., Knappik, R. (2014): Patentanmeldung Europäisches Patent Nr. 05 009 918.3-2104: „Verfahren und Vorrichtung zur Abtrennung von Sulfationen aus Wässern und zur Einbringung von Pufferkapazität in Wässer“
- Friedrich, H.-J. et.al. (2011) Patentanmeldung Europäisches Patent Nr. 101 635 06.8 / US-2011-0284391: „Verfahren und Vorrichtung zur Abtrennung von Nitroaromaten und von Natriumnitrit aus Prozesswässern und Abwässern“
- Friedrich, H.-J., Rebenklau, L. Neumeister, P., Viehweger, K. et.al. (2019): Patentanmeldung PCT/EP2019060709: „Elektrode mit integrierter mechanischer Schwingungsanregung“
- Friedrich, H.-J. Rott, H.-J., Hielscher, M., Hinrichs, T. (2018): Patentanmeldung PCT WO 002323 2018: Verfahren zur Behandlung von Geothermalfliuid- oder Formationswasserströmen durch kontinuierliche elektrochemische Abtrennung reduzierbarer Metall- und / oder Metalloidionen aus dem Förderstrom
- Furat, O., et al. (2018): Description of Ore Particles from X-Ray Microtomography (XMT) Images, Supported by Scanning Electron Microscope (SEM)-Based Image Analysis. Microsc Microanal, 2018: p. 1-10.
- Gellner, M., Jäckel, H.-G.,Peuker, U.A.(2014): Anreicherung von Wertkomponenten aus der Schwarzmasse vor-zerkleinerter Li-Ion-Batterien. in Jahrestreffen der ProcessNet-Fachruppe AuW, GAS und HTT. 2014. Karlsruhe.
- Gellner, M., Jäckel, H.-G.,Peuker, U.A.(2014): Anreicherung von Wertkomponenten aus der Schwarzmasse vor-zerkleinerter Li-Ionen-Batterien - Siebklassierung. in Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe "Zerkleinern und Klassieren". 2014. Kaiserslautern.

- Gellner, M., Jäckel, H.-G., Peuker, U.A. (2014): Anreicherung von Wertkomponenten aus der Schwarzmasse vorzerkleinerter Li-Ionen Batterien mit Hilfe der Magnetscheidung. in *Aufbereitung und Recycling*. 2014. Freiberg.
- Goldmann, D. (2019): Recycling 4.0 – Auf dem Weg zur Digitalisierung der Kreislaufwirtschaft. In: Stephanie Thiel, Olaf Holm, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann und Bernd Friedrich (Hg.): *Recycling und Rohstoffe: TK-Verlag* (12), S. 3–14.
- Hanisch, C.; Loellhoeffel, T.; Diekmann, J.; Markley, K.J.; Haselrieder, W.; Kwade, A. (2015): Recycling of lithium-ion batteries: A novel method to separate coating and foil of electrodes. *Journal of Cleaner Production* 108, pp. 1-11, 2015
- Hanisch, C., Haselrieder, W.; Kwade, A. (2017): Method for reclaiming active material from a galvanic cell, and an active material separation installation, particularly an active metal separation installation, US Patent 9,780,419, 2017.
- Herrmann, C.; Mennenga, M.; Böhme, S. (2018) (Hrsg.). *Fleets Go Green*, Springer International Publishing, Cham, 2018.
- Heubner, C.; Seeba, J.; Liebmann, T.; Nickol, A.; Börner, S.; Fritsch, M. et al. (2018): Semi-empirical master curve concept describing the rate capability of lithium insertion electrodes. In: *Journal of Power Sources* 380, S. 83–91. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.01.077.
- Hoyer, C.; Kieckhäfer, K.; Spengler, T. S. (2015): Technology and Capacity Planning for the Recycling of Lithium-Ion Electric Vehicle Batteries in Germany, in: *Journal of Business Economics*, 85 (5), 505–544. <https://doi.org/10.1007/s11573-014-0744-2>
- Jäckel, H.-G., Wuschke, L., Peuker, U.A. (2014) Probleme der Aufbereitung metallhaltiger Werkstoffverbunde aus lithiumhaltigen Geräten und Batterien. *Chemie Ingenieur Technik*, 2014. 86(6): p. 806-813. Knieke, Christoph; Lawrenz, Sebastian; Fröhling, Magnus; Goldmann, Daniel; Rausch, A. (2019): Predictive and Flexible Circular Economy Approaches for Highly Integrated Products and their Materials as Given in E-Mobility and ICT. In: *MSF* 959, S. 22–31. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.959.22.
- Kwade, A.; Diekmann J. (2018) (Hrsg): *Recycling of Lithium-Ion Batteries: The LithoRec Way*. Springer. 2018.
- Leißner, T., et al. (2012): Mineral processing of lithium-bearing mica, in *XXVI International Mineral Processing Congress*. 2012, Indian Institute of Metals: New Delhi, India.
- Leißner, T.; Peuker, U.A. (2013): Bewertung der Magnetscheidung Lithium-haltiger Glimmer am Beispiel von Zinnwaldit, in *Chemie Ingenieur Technik*. 2012. p. 1382-1382.
- Leißner, T., et al. (2013): Evaluation of mineral processing by assessment of liberation and upgrading. *Minerals Engineering*, 2013. 53: p. 171-173.
- Leißner, T., Mütze, T. Peuker, U.A. (2014): Nutzung der direkten Messung des Aufschlussgrades in Sortierkennfeldern. *Chemie Ingenieur Technik*, 2014. 86(6): p. 899-905.
- Leißner, T., et al. (2016): MLA-based partition curves for magnetic separation. *Minerals Engineering*, 2016. 94: p. 94-103.
- Lummerzheim, A., Füßler, R., Wendt, B., Ortloff, A., Seidel, M., Hartmann, M., Wolter; M. (2018): Patentanmeldung Deutsches Patent DE 10 2018 117 237, Anmeldedatum: 17.07.2018 „Hydrometallurgisches Recyclingverfahren von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien“,
- Martin, G.; Rentsch, L.; Höck, M.I.; Bertau, M. (2017): Lithium Market Research - Global Supply, Demand and Price Development, *Energy Stor. Mat.* 2017, 6, 171-179. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ensm.2016.11.004>

- Martin, G.; Schneider, A.; Bertau, M. (2018): Lithiumgewinnung aus heimischen Rohstoffen, *Chemie in unserer Zeit* 2018, 52, 298-312. <https://doi.org/10.1002/ciuz.201800827>
- Martin, G.; Pätzold, C.; Bertau, M. (2017): Integrated process for lithium recovery from zinnwaldite, *International Journal of Mineral Processing* 2017, 160, 8-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2017.01.005>
- Martin, G.; Schneider, A.; Voigt, W.; Bertau, M. (2017): Lithium extraction from zinnwaldite: Part II: Lithium carbonate recovery by direct carbonation of sintered zinnwaldite concentrate, *Minerals Engineering* 2017, 110, 75-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2017.04.009>
- Nicolas, B.; Rickert, J.; Mennenga, M.; Cerdas, F.; Herrmann, C. 2019. Evaluation of the Recyclability of Traction Batteries Using the Concept of Information Theory Entropy. In *Cascade Use in Technologies* 2018, 93–103. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57886-5_12.
- Peters, L.; Schier, C.; Friedrich, B. (2018): „Development of a Recycling Process for Portable Li-Ion-Batteries“ (2018). In: *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5 – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen*, S.338-359. ISBN 978-3-944310-41-1. Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH.
- Peters, L.; Friedrich, B. (2017): „Proven Methods for Recovery of Lithium from Spent Batteries“. Conference: DERA Workshop Lithium 2017. DOI: 10.13140/RG.2.2.28717.18408
- Stallmeister, C.; Schwich, L., Friedrich, B. (2020): „Early-Stage Li-Removal -Vermeidung von Lithiumverlusten im Zuge der Thermischen und Chemischen Recyclingrouten von Batterien“. In: *Recycling und Sekundärrohstoffe Band 13*, S. 545-557. ISBN: 978-3-944310-51-0. Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH.
- Rentsch, L.; Martin, G.; Bertau, M.; Höck, M. (2018): Lithium Extracting from Zinnwaldite: Economical Comparison of an Adapted Spodumene and a Direct-Carbonation Process, *Chem. Eng. Technol.* 2018, 41, 5, 975-982. <https://doi.org/10.1002/ceat.201700604>
- Schach, E., et al. (2019), Multidimensional characterization of separation processes – Part 1: Introducing kernel methods and entropy in the context of mineral processing using SEM-based image analysis. *Minerals Engineering*, 2019. 137: p. 78-86.
- Schneider, A.; Schmidt, H.; Meven, M.; Brendler, E.; Kirchner, J.; Martin, G.; Bertau, M.; Voigt, W. (2017): Lithium extraction from the mineral zinnwaldite: Part I: Effect of thermal treatment on properties and structure of zinnwaldite, *Minerals Engineering* 2017, 111, 55-67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2017.05.006>
- Schneider, K., Reimer, M., Elwert, T. (2018): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen, *Recy & DepoTech* 2018, Leoben, 07. – 09.11.2018. Veröffentlicht in: Tagungsband zur 14. Recy & DepoTech-Konferenz, Hrsg.: Pomberger, R. et al., *Abfallverwertungstechnik & Abfallwirtschaft Eigenverlag*, S. 711-716
- Schneider, K., Elwert, T., Hua, Q. (2018): Market overview, legal aspects, and recycling of lithium iron phosphate batteries, *EMPRC 06/25-06/26/2018*. Published in *Proceedings of the European Mineral Processing & Recycling Congress*. Ed.: GDMB, GDMB Verlag GmbH, Clausthal-Zellerfeld, ISBN: 978-3-940276-84-1
- Seidel, M.; Kugaraj, M.; Nikolowski, K.; Wolter, M.; Kinski, I.; Jähnert, T.; Michaelis, A. (2019): Comparison of Electrochemical Degradation for Spray Dried and Pulse Gas Dried LiNi 0.5 Mn 1.5 O 4. In: *J. Electrochem. Soc.* 166 (13), A2860-A2869. DOI: 10.1149/2.0621913jes.
- Thies, C.; Kieckhäfer, K.; Spengler, T. S.; Sodhi, M. S. (2019): Assessment of social sustainability hotspots in the supply chain of lithium-ion batteries, in: *Procedia CIRP*, 80, 292–297. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.12.009>
- Thies, C.; Kieckhäfer, K.; Hoyer, C.; Spengler, T. S. (2018): Economic Assessment of the LithoRec Process, in: Kwade, A.; Diekmann, J. (ed.): *Recycling of Lithium-Ion Batteries*, Springer, Cham, 253–266. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70572-9_15

- Thomitzek, M., Felipe C., Sebastian T., and Christoph H. (2019): Cradle-to-Gate Analysis of the Embodied Energy in Lithium Ion Batteries. In *Procedia CIRP*, 80:304–9. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.099>.
- Vest, M. (2016): Weiterentwicklung des pyrometallurgischen IME Recyclingverfahrens für Li-Ionen Batterien von Elektrofahrzeugen (2016), ISBN 978-3-8440-4320-4
- Wang, H. (2015): Development of a high efficient hydrometallurgical recycling process for automotive Li-ion batteries (2015), ISBN 978-3-8440-3294-9
- Wikedzi, A., et al. (2018): Comminution characterization of lithium-bearing mica ores from different devices, in XXIX IMPC. 2018: Moscow.
- Wuschke, L., et al. (2019): Crushing of large Li-ion battery cells. *Waste Management*, 2019. 85: p. 317-326.
- Wuschke, L., et al. (2016): Separation of Electrode Foils from Li-Ion Traction Batteries in XXVIII International Mineral Processing Congress IMPC. 2016, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum: Québec. p. 13.
- Wuschke, L., et al. (2015): Recycling of Li-ion batteries – a challenge. *recovery - Recycling Technology Worldwide*, 2015. 4: p. 48-59.
- Wuschke, L., et al. (2015): Zur Zerkleinerung von Li-Ion Traktionsbatterien, in Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Zerkleinern und Klassieren. 2015: Magdeburg.
- Wuschke, L., et al. (2016): Zur mechanischen Aufbereitung von Li-Ionen-Batterien. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 2016. 161(6): p. 267-276.
- Wuschke, L., et al. (2016): The recycling of Li-ion batteries from electric vehicles - Methodological approaches of Mechanical Engineering, in International Congress on Particle Technology (PARTEC). 2016: Nürnberg.
- Wuschke, L., et al. (2015): Comminution of Li-ion traction batteries, in 14th European Symposium for Comminution and Classification (ESCC). 2015: Gothenburg. p. 200-206.
- Zschornack, D., Friedrich, H.–J., Eisert, S., Böhnisch (2018): Verfahrensentwicklung für das Recycling von TFT-LCDs mit gleichzeitiger Rückgewinnung von hochwertigem Glas und seltenen strategischen Metallen, H., Schlussbericht (Bundesstiftung Umwelt), Projekt Nr. 3285/01-31, Dresden 2018