Fraunhofer

TRAWEBA Transformations-HUB Wertschöpfungskette Batterie

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Highlights aus der Wissenschaft und Forschung

Summary Briefing des TraWeBa-Projektes (Q4/2023)

www.traweba.de

Ansprechpartner Projekt TraWeBa

ACOD GmbH
August-Bebel-Str. 73 | 04275 Leipzig
Tel.: +49 (0) 341 9939 3884
E-Mail: info@traweba.de

Ansprechpartner TraWeBa Summary Briefing

Fraunhofer Institut für Keramische Technologen und Systeme
Am St.-Niclas-Schacht 13 | 09599 Freiberg
Ansprechpartner: Dr. Christian Kensy
Tel.: +49 (0) 3731 2033-158
E-Mail: christian.kensy@ikts.fraunhofer.de

Abstract

Disclaimer

Die Forschungslandschaft zu Lithium-Ionen-Batterien entwickelt sich laufend weiter. Mit dem nachfolgenden Quartalsbericht möchten wir Ihnen ausgesuchte, jüngere Entwicklungen aus dieser Landschaft vorstellen. Unsere Einschätzung zu deren Bedeutung findet sich in ergänzenden, ausgewählten Punkten unter *Chancen* und *Herausforderungen*, die als Anregung zu verstehen und nicht vollständig sind. Bei Interesse an einer tieferen Diskussion stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung (siehe Ansprechpartner auf S.2).

Rückblick 2023: Aufbau von Batteriewertschöpfungsketten in Deutschland

In Deutschland steht das Jahr 2023 weiter im Fokus des "Aufbaus von technologisch souveränen, wettbewerbsfähigen und nachhaltigen Batteriewertschöpfungsketten", welche zu Beginn des Jahres im aktualisierten BMBF-Dachkonzept Batterieforschung erneut als von herausragender Wichtigkeit adressiert wurde. [1] Mit Schnittstellen zu der vom BMBF angestoßenen Grundlagenforschung (Technology Readiness Level (TRL) 1-6) und F&E zu Batterietechnologien (Förderprogramm B@TS) [2] sowie in 2023 gestarteten Projekten unterstützt das BMWK durch die IPCEI Projekte und Förderinitiativen anwendungsnahe Forschungsprojekte (TRL 3-7) und Reallabore (TRL7-9)[1]. Hierbei liegt u.a. ein besonderer Fokus auf einem nachhaltigen Ökosystem der Batteriezellfertigung. [4] Der Transfer von Forschungsergebnissen in die (industrielle) Anwendung soll unter Fortführung der Forschungskompetenz in den vielseitigen Batterie-Kompetenzclustern des BMBF mit der Förderrichtlinie "Clusters Go Industry" [5] weiter vorangetrieben werden. Dies wird durch den Aufbau einer deutschen bzw. europäischen Souveränität bspw. durch die Richtlinie "Batterietechnologien für nachhaltige Batteriewertschöpfungsketten" [1] flankiert.

Legislativ wurde außerdem Ende Juli die EU-Batterieverordnung 2023 veröffentlicht [6], die am 18.02.2024 in Kraft tritt und insbesondere auch Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge und für Leichtfahrzeuge (LV) adressiert. Neben der Kennzeichnungspflicht zu Performance-Parametern sowie Recycling- und Sammelquoten von Altbatterien wird auch der digitale Batteriepass bei Batterien > 2 kWh verpflichtend eingeführt. Was das genau bedeutet, wurde u.a. in einem Online-Workshop - veranstaltet vom Traweba Partner Circular Valley - intensiv diskutiert. [7]

[1] Solche Projekte befassen sich bspw. mit der Effizienzsteigerung und Synergieeffekten in der Batteriezellfertigung für die Elektromobilität (SynBatt) [3] sowie im Sinne einer Grünen Batterie mit der nachhaltigen Kreislaufführung.

Inhalt

Abstract 3

Review 2023: Aufbau von Batteriewertschöpfungsketten in Deutschland Fehler! Textmarke nicht definiert.

Highlights aus der Wissenschaft und Forschung 5

Briefing des TraWeBa-Projekts (Q4/2023) 5

Batteriechemie 5

Batterieproduktion & Digitalisierung 7

Batterierecycling 10

Literatur 13

Highlights aus der Wissenschaft und Forschung

Briefing des TraWeBa-Projekts (Q4/2023)

Im Folgenden wird ein Einblick in aktuelle Forschungsthemen, neue Materialentwicklungen und alternative Zellkonzepte für die Technologie-schwerpunkte Batteriechemie, Batterieproduktion & Digitalisierung und Batterierecycling gegeben.

Batteriechemie

Entwicklungen für Kathodenmaterialien

Im Forschungsfeld für Lithium-Ionen-Batterien (LIB) ist es bekannt, dass **mit** der **Erhöhung des Nickelanteils im Kathodenmaterial** höhere Energiedichten erzielt werden. Daher zählen diese Schichtoxide als vielversprechendes Kathoden-materialien für LIB der nächsten Generation. Allerdings verhindern die starke Pulverisierung des Materials und der schnelle Kapazitätsabfall während der Zyklierung eine breite Anwendung. [8]

Eine Forschungsgruppe der Universität Nankai (Tianjin, China) präsentieren ein Gallium-dotiertes $Li(Ni_{0.96}Co_{0.04})_{0.99}Ga_{0.01}O_2$-Kathodenmaterial. Durch die Einführung des Metalls (Ga) kommt es während des Lithiierungsprozesses des $Ni_{0.96}Co_{0.04}(OH)_2$- Präkur-sors zu einer mikrostrukturellen Veränderung der Oxid-Mikrokugeln. Die entstandenen radial aus-gerichteten nadelförmigen Primärkörner der Mikrokugeln haben einen positiven Einfluss auf die anisotrope Volumenänderung und unterdrücken die Ausbildung von Mikrorissen während des Zyklierens. So konnten anfängliche hohe Entladekapazitäten von 228 mAh g^{-1} bei einer Rate von 0,1C und eine gute Kapazitätsretention von 74,1% nach 300 Zyklen bei erhöhter C-Rate von 1C demonstriert werden. Somit ist die Einführung von Ga in $LiNi_{0.96}Co_{0.04}O_2$ ein interessanter Ansatz, um die Zyklenstabilität von Schichtoxiden mit hohen Nickelgehalt (Ni > 0,9) zu verbessern. [8]

POTENZIALE: Die effektive Ga-Dotierung bietet eine praktikable Lösung zur Verbesserung der elektro-chemischen Leistung von Kathoden mit ultrahohen Nickel-Oxid-Anteilen.

HERAUSFORDERUNGEN: Die starke Pulverisierung des Schichtoxids und der Kapazitätsabfall während des Zyklierens schränken die kommerzielle Verwendbarkeit dieses Kathodenmaterials ein. Gallium war zudem im Jahr 2022 mit 411,33 US$/kg ein relativ teurer Rohstoff (DERA Deutsche Rohstoffagentur, 2022).

Entwicklungen für Elektrolytsysteme

Sulfidische Festelektrolyte sind aufgrund ihrer hohen Ionenleitfähigkeit ein Schlüsselelement für die Entwicklung von Festkörperbatterien. Eine wichtige Voraussetzung für die Kommerzialisierung solcher Zellen ist die **skalierbare Produktion der Batteriebestandteile** unter den Anforderungen, die die feuchtigkeitsempfindlichen Materialien an den Herstellungsprozess stellen. [9]

In der Studie von Batz *et al.* (Universität Braunschweig) wird eine kontinuierliche Herstellung von Separator- und Kathodensuspensionen mittels Extrusionsprozess unter Argonatmosphäre vor-gestellt. In Übereinstimmung mit der Literatur konnte festgestellt werden, dass die Kombination aus feinen und groben Partikeln am besten für den Festelektrolyten geeignet ist. Diese Kombination führt zur Bildung einer kompakten Partikelschicht, die sowohl die positiven Effekte der feinen Festelektrolytpartikel auf Adhäsion, Porosität und homogene Verteilung als auch die Wirkung der

groben Partikel auf die Verringerung des interpartikulären Ionenwiderstands vereint. Die Li_3PS_4-basierten Separatoren zeigen eine Haftfestigkeit von 0,031 MPa und hohe Ionenleitfähigkeit von 0,036 mS cm^{-1}. Darüber hinaus weisen die extrudierten NCM811-Kathodenschichten eine Haftfestigkeit von 0,729 MPa auf und erzielen eine spezifische Initialkapazität von 156 mAh g^{-1}. [9]

POTENZIALE: Der entwickelte Extrusionsprozess weist ein sehr großes Potenzial für die skalierbare Herstellung von Sulfidelektrolyt-basierten Festkörperbatterien auf.

HERAUSFORDERUNGEN: Eine Verringerung der derzeit hohen Schichtdicke und der noch zu großen Porosität ist erforderlich, um höhere Energiedichten erreichen zu können. Ansätze dazu sind die Variation von Substraten und Rakelspaltbreiten bei der Beschichtung sowie die systematische Untersuchung von Verdichtungsprozessen.

Sulfidische Festelektrolyten wie Lithium-Thiophosphat (β-Li_3PS_4) besitzen wichtige positive Eigenschaften (z.B. hohe Ionenleitfähigkeit) für die Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Technologie. Allerdings weisen diese Elektrolyte ein enges Stabilitätsfenster in der elektrochemischen Anwendung auf. Dieses enge Fenster resultiert durch die Redoxreaktionen der Bestandteile Schwefel und Phosphor. Da diese Redoxreaktionen aber reversibel sind, können Thiophosphate auch als Elektrodenmaterialien verwendet werden. [10]
Die Arbeitsgruppe von Adelhelm *et al.* (Humboldt Universität zu Berlin, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie) stellt in Zusammenarbeit mit der Gruppe von Janek *et al.* (Universität Gießen) die Verwendung von Cu_3PS_4 als Aktivmaterial in Festkörperzellen vor. Hierbei wird der Einfluss der Elektrodenzusammensetzung und der Temperatur auf das Zellverhalten untersucht. Die höchste Initialkapazität von 776 mAh g^{-1} (bei 10 mA g^{-1}) erreichen die Elektroden mit der Zusammensetzung Cu_3PS_4:β-Li_3PS_4:C65 = 40:50:10 bei 60 °C. Unter Anwendung einer höheren Stromrate (50 mA g^{-1}, 255 µA cm^{-2}) wird erwartungsgemäß eine geringere Kapazität erzielt, jedoch werden immer noch 508 mAh g^{-1} nach 60 Zyklen beobachtet (Spannungsfenster: 0,8 – 2,8 V vs. Li/Li^+). Die Analyse mittels Röntgenbeugung (XRD) und Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) zeigt, dass sich das Aktivmaterial Cu_3PS_4 irreversibel zersetzt und die Redoxaktivität auf Cu_2S und S_8 zurückzuführen ist. [10]

POTENZIALE: Die Verwendung von ternären Verbindungen wie Cu_3PS_4 als Kathodenaktivmaterial ist eine interessante Strategie zur Aktivierung verschiedener, fein verteilter Redoxzentren und kann dadurch als innovatives Elektrodenmaterial angesehen werden.

HERAUSFORDERUNGEN: Eine deutliche Herausforderung ist durch das komplexe, undefinierte Spannungsprofil in Verbindung mit der großen Polarisation gegeben, sodass weitere Aufklärungsarbeit zum Mechanismus notwendig ist.

Es existieren viele Ansätze für die Optimierung von Elektrolytformulierungen für Lithium-Ionen-Batterien, um die Leistung und Lebensdauer zu verbessern. Dabei werden jedoch das **Abbauverhalten des Elektrolyten** und sein Einfluss auf die Kapazität sowie der Anstieg des Innenwiderstands teilweise zu wenig untersucht. Weiterhin spielt das Elektrolytvolumen eine entscheidende Rolle für das allgemeine Degradationsverhalten und hat wesentliche Auswirkungen auf den spezifischen Preis einer Zelle. [11]
In einer Studie von Klick *et al.* (RWTH Aachen) wird der Einfluss des Elektrolytvolumens auf die Alterung von Li-Ionen-Zellen analysiert, indem Vollzellen aus NCM622-Kathoden und Graphitanoden mit drei verschiedenen Elektrolytmengen befüllt werden. Der Elektrolyt (EC/EMC, v:v = 5:7) enthält keine Leitsalze oder Additive. Die Annahme, dass eine Verringerung der Elektrolytmenge die Alterung beschleunigt, konnte für Hochtemperatur- (60 °C) und

Hochpotentialbedingungen (4,2 V) bestätigt werden. Beide Alterungskennzahlen Kapazität und Impedanz verschlechtern sich bei den Zellen mit reduziertem Elektrolytvolumen erheblich schneller, was auf das Austrocknen der Zelle zurückgeführt werden kann. Die Erkenntnisse eröffnen neue Möglichkeiten für zukünftige Forschung im Bereich Langzeitlagerung und Lebensdauer, indem mit Hilfe von Kapazitätsanalysen und Impedanzspektroskopie Elektrolytinstabilitäten und die Alterungsprozesse der Zellbestandteile gezielt beschleunigt sowie besser beleuchtet werden können. [11]

POTENZIALE: Durch detaillierte Kapazitätsanalysen und Impedanzspektroskopie werden neue Einblicke in das Degradations- und Alterungsverhalten von Lithium-Ionen-Zellen geschaffen.

HERAUSFORDERUNGEN: Da unterschiedliche Elektrolytformulierungen, v.a. mit verschiedenen Additiven, eingesetzt werden, ist sowohl die Vergleichbarkeit als auch die Prognose für andere Elektrolytsysteme erschwert.

Entwicklungen für Anodenmaterialien

Silizium hat als **alternatives Anodenmaterial** bereits viel Aufmerksamkeit durch seine vorteilhaften Eigenschaften wie die hohe theoretische Kapazität (4.200 mAh g^{-1}), niedrige Kosten und Umweltfreundlichkeit erregt. Aber die extreme Volumenausdehnung (~300%) während der (De)-Lithiierung stellt diese Technologie immer noch vor große Herausforderungen für die großtechnische Nutzung. [12]
Um den Herausforderungen des Volumeneffekts und der schlechten elektrischen Leitfähigkeit entgegenzuwirken hat die Arbeitsgruppe von Chang *et al.* (Tongren Universität, Tongren, China) einen neuartigen Mikrokugelverbundwerksoff (pSi/Ag) aus Quarzabfällen entwickelt. Hierfür wird zur Herstellung eine Kombination aus einer Kugelmahlung mit hoher Energie, Sprühtrocknung und eine magnesiothermischer Reduktion angewandt. Die Ergebnisse zeigen, dass die eingebrachten Ag-Nanopartikel gleichmäßig in den porösen, mikroskopisch kleinen Si-Kugeln verteilt sind. Die Verwendung von Si im Mikrometerbereich verhindert die übermäßige Ausbildung der Passivierungsschicht (solid electrolyte interface – SEI) auf Anodenseite während der Zyklierung. So konnte eine initiale Coulomb-Effizienz von 92,8% erreicht werden. Darüber hinaus führt die verbesserte Leitfähigkeit der Ag-Nanopartikel in der Si-Matrix zu einer hohen spezifischen Kapazität von 1.251 mAh g^{-1} über 300 Zyklen bei einer Stromdichte von 4.000 mA g^{-1}. [12]

POTENZIALE: Darstellung eines vielversprechenden Ansatzes für die zukünftige Entwicklung aus recyceltem Si-Ausgangsmaterial von Hochleistungsanoden in Lithium-Ionen-Batterien.

HERAUSFORDERUNGEN: Die Synthese unter Verwendung einer magnesiothermische Reduktion (Hochtemperaturbehandlung und anschließendem HCl-Wachvorgang) ist sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Sicht als kritisch zu betrachten.

Batterieproduktion & Digitalisierung

Ein Schwerpunkt der kürzlich veröffentlichten Arbeiten zur Prozessierung von Li-Ionen Batteriezellen befassen sich mit der Weiterentwicklung von innovativen Prozesstechnologien sowie deren Qualifikation und Integration in den Fertigungsablauf.

Pulverkonditionierung für Graphite

Ein Schnittstellenthema zwischen Batteriekomponenten- und Batteriezellfertigung ist die **Pulverkonditionierung**, welche vor der eigentlichen Dosierung in den Mischprozess zur Fertigung von Elektrodenpaste lokalisiert ist. Diese hat zum Ziel erwünschte Eigenschaften der Elektroden u.a. durch Materialmodifikationen zu erzielen. Aktuelle Forschungsarbeiten befassen sich mit Prozessen zur

stärkeren Kontrolle über Partikelmorphologien wie gerundetem Graphit für die Anodenfertigung in LIBs. In der Studie von Biber et al. (Hosokawa Alpine AG, Augsburg) wird ein effizienterer Rundungsprozess für natürlichen Graphit vorgestellt, der weniger Energie verbraucht und höhere Ausbeute bietet. Dies macht den Prozess wirtschaftlicher, besonders bei hohen Energiepreisen. Das hergestellte Material zeigt ähnliche Eigenschaften wie das aus bestehenden Prozessen. Die Skalierbarkeit des neuen Prozesses wird gezeigt, und die Leistung des Materials in Batterien bleibt nach über 1000 Zyklen über 88%. [13]

POTENZIALE:

Erhöhte Energieeffizienz: Die neu entwickelte Sphäroidisierungsmaschine weist eine hohe Energieeffizienz auf, mit bis zu 74% niedrigerem spezifischem Prozessenergieverbrauch im Vergleich zum Referenzprozess.

Höhere Ausbeute: Der Gesamtertrag des endgültig geformten Graphits im gesamten Prozess ist etwa 15% höher als im Referenzprozess.

Geringere Betriebskosten: Die niedrigeren Energiekosten und die höhere Ausbeute führen zu erheblichen Kostenvorteilen im Betrieb, insbesondere für die Sphäroidisierung von natürlichem Graphit für Lithium-Ionen-Batterien (LiBs).

Gleichbleibende Produktqualität: Die analysierten Eigenschaften des Graphits, wie Morphologie, spezifische Oberfläche nach BET, Stampfdichte und Partikelgröße, zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen dem neuen Prozess und dem Referenzprozess.

HERAUSFORDERUNGEN:

Weitere Materialoptimierung: Trotz der vielversprechenden Ergebnisse wird darauf hingewiesen, dass möglicherweise weitere Materialoptimierungen notwendig sind.

Übertragbarkeit der Elektrodenproduktion: Während die Machbarkeit der direkten Verwendung des geformten natürlichen Graphits für die Elektrodenproduktion gezeigt wurde, könnten weitere Anpassungen oder Untersuchungen erforderlich sein, um die Übertragbarkeit auf kommerziell relevante Bedingungen sicherzustellen.

Erforderliche Skalierung: Obwohl die Machbarkeit der Skalierung des Prozesses betont wird, könnten unerwartete Herausforderungen auftreten, wenn der Prozess auf industrielle Maßstäbe hochskaliert wird.

Spezifische Prozessparameter: Die Vorteile des neuen Prozesses hängen von den gewählten Prozessparametern und den gewünschten Produkteigenschaften ab, was eine sorgfältige Steuerung erfordert.

Elektro-Spinning

Ein weiterer Prozessschritt, der auch in der deutschen Forschungslandschaft insbesondere in Vorarbeiten der Hochschule Landshut intensiv beforscht wurde, ist das so genannte **„Elektro-Spinning“**. In Arbeiten eines chinesischen Forschungsteams (Hunan Universität, Changsha, China) wird eine technische Möglichkeit zur kostengünstigeren Großproduktion von Batterien mit ausgezeichneter mechanischer Festigkeit, Flexibilität, thermischer Stabilität und Elektrolytbenetzbarkeit prognostiziert. Der Prozess selbst ist dafür geeignet spezifische Folienverbünde von Anoden, Kathoden und Separatoren umzusetzen, die anschließend im Rahmen der Assemblierungsprozesse weiterverarbeitet werden. [14]

POTENZIALE:

Massenproduktion und Kostenreduktion: Die vorgeschlagene Herstellungsstrategie ermöglicht nicht nur eine einfache Massenproduktion von Lithium-Ionen-Batterien (LIBs), sondern reduziert auch effektiv die Herstellungskosten.

Leistungsfähiger PAN-Separator: Der durch Elektrospinnen hergestellte PAN-Separator zeigt vergleichbare oder sogar bessere Leistung im Vergleich zum herkömmlichen PP-Separator.

Beitrag zur Kostensenkung der LIB-Industrie: Die Autoren hoffen, dass ihre Arbeit tatsächlich dazu

beitragen kann, die Kosten in der Lithium-Ionen-Batterie-Industrie zu senken, und dass sie weitere Forschungsarbeiten zu diesem Thema anregt.

HERAUSFORDERUNGEN:
Technologische Umsetzbarkeit: Es bleibt zu prüfen, wie einfach und kosteneffizient die vorgeschlagenen Elektrosprüh- und Elektrospinn-Technologien in der Praxis umgesetzt werden können.
Langfristige Leistung und Haltbarkeit: Es ist wichtig sicherzustellen, dass die in Massenproduktion hergestellten Batterien langfristig eine stabile Leistung und Haltbarkeit aufweisen.
Marktakzeptanz: Die Einführung neuer Fertigungsmethoden erfordert möglicherweise eine Akzeptanz seitens der Industrie und der Verbraucher.

Trockenbeschichtung

Bezugnehmend auf die im vergangenen Summary Briefing eingehend thematisierten Entwicklungen zur **Trockenbeschichtung von Elektrodenfolien** wurden F&E-Aktivitäten auch in internationalem Umfeld durch Arbeiten eines US-Forscherteams aufgegriffen (Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, USA). Die Autoren beschreiben die Entwicklung einer skalierbaren Trockenverarbeitungsstrategie für Pulver zu Elektroden. Trockenverarbeitete Elektroden zeigen geringere Tortuosität und vielversprechende elektrochemische Leistung. Vollzellen mit trockenverarbeiteten Elektroden haben eine herausragende Ratenleistung und halten über 400 und 800 Zyklen 74,1 % bzw. 63,6 % der Kapazität. Die niedrige anfängliche Coulomb-Effizienz der trockenverarbeiteten Graphitanoden wird auf das Polytetrafluorethylen-Bindemittel zurückgeführt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Trockenverarbeitung vielversprechend für zukünftige Lithium-Ionen-Batterieherstellung ist, fordern jedoch eine Modifikation des Bindemittels. [15]

POTENZIALE: Hervorragende elektrochemische Leistung: Die Trockenverarbeitung zeigt vielversprechende Ergebnisse mit Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterie (LIB)-Elektroden, einschließlich exzellenter Elektrodenintegrität, überlegener Ratenleistung und guter Zyklenstabilität.
Kostensenkung: Die Trockenverarbeitung ermöglicht eine Kostensenkung, da sie den Einsatz eines Elektrodenbeschichters und die Verdampfung und Rückgewinnung von Lösungsmitteln überflüssig macht.

HERAUSFORDERUNGEN:
Niedrige Coulomb-Effizienz im ersten Zyklus: Die Trockenverarbeitung führt aufgrund des Polytetrafluorethylen-Binders zu einer schlechten Coulomb-Effizienz im ersten Zyklus bei Graphitanoden, was weitere Untersuchungen und Verbesserungen erfordert.
Notwendige Forschung und Entwicklung: Es besteht Bedarf an weiteren Studien und Entwicklungen, um den Trockenverarbeitungsprozess und insbesondere den Einsatz von Bindemitteln zu optimieren.

High-Speed Sinterprozess

Neben den F&E-Arbeiten zur Weiterentwicklung innovativer Prozesstechnologien zur Fertigung Lithium-Ionen Batteriezellen, befassen sich einige in jüngerer Zeit veröffentlichten Aktivitäten auch bereits mit essentiellen **Prozesstechnologien zur Fertigung von Festkörperzellen**. Während in der deutschen Forschungslandschaft u.a. das Forschungszentrum Jülich weitreichende Expertise zur Material- und Prozessforschung rund um keramische Festkörperzellen aufgebaut hat, ist das Themengebiet auch im Rahmen internationaler Forschung von großer Bedeutung. Ein chinesisches Forscherteam (Sun-Yat-sen-Universität, Shenzhen, China) stellt in ihrer aktuellen Veröffentlichung eine schnelle Hochtemperatursinterungsmethode (UHS) vor, die genutzt werden kann, um in Sekundenschnelle NASICON $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ Festkörperelektrolyte herzustellen. Das resultierende Material zeigt hohe ionische Leitfähigkeit und

niedrige Aktivierungsenergie. In Tests mit Na-Symmetriezellen und NVP | US-NZSPO | Na-Festzellen zeigt es vielversprechende elektrochemische Leistung mit langer Zykluszeit, hoher Effizienz und gutem Kapazitätserhalt, aufgrund eines robusten Pellets und einer stabilen Schnittstelle zwischen SSE und Elektroden. [16]

POTENZIALE:

Hervorragende elektrochemische Leistung: Na-Festbatterien zeigen nach 800 Zyklen bei 0,2C eine Kapazität von 86,3 mAh g^{-1} und eine hohe Rate-Fähigkeit mit 72,5 mAh g^{-1} bei 5C.

Kürzere Verarbeitungszeit: Die UHS-Strategie verkürzt die Verarbeitungszeit, verhindert die Zersetzung oder Verdampfung leichter Elemente und ermöglicht die Bildung gewünschter Strukturen und Na-Leitung.

Mögliche Anwendung für kostengünstige und langlebige Feststoff-Natriumbatterien: Die UHS-Methode eröffnet Möglichkeiten zur Herstellung robuster anorganischer Elektrolyte und könnte kostengünstige und langlebige Feststoff-Natrium-batterien ermöglichen.

HERAUSFORDERUNGEN:

Weitere Untersuchung der Langzeitstabilität: Die Langzeitstabilität der Batterien muss weiter untersucht werden, um die Haltbarkeit und Lebens-dauer der Feststoffelektrolyte zu gewährleisten.

Optimierung für breite Anwendung: Die Anwendung der UHS-Methode für unterschiedliche Elektrolyt-zusammensetzungen und Materialien erfordert möglicherweise Optimierungen und Anpassungen.

Batterierecycling

SYSTEMIQ, dass u.a. bei der Entwicklung des Battery Passport in der EU beteiligt ist, hat im November 2023 einen umfassenden Bericht herausgebracht, welcher sich den Themen **"nachhaltiges Batterie-recycling" und "Circular Battery Economy"** widmet. Begleitet wurde die Studie von wissenschaftlichen Akteuren aus Deutschland und Großbritannien sowie namhaften Industrieakteuren im (europäischen) Batterierecycling. Die Studie leitet insgesamt zehn Prinzipien ab für ein nachhaltiges Batterierecycling, u.a. hohe Gesundheits- und Sicherheitsstandards bei Recyclingprozessen, die Technologieauswahl anhand einer cradle-to-gate Bewertung und maximaler Rückgewinnungsquote sowie hoher Materialqualität, Vermeidung bzw. Minimierung der prozessbedingten Abfälle und Brauchwasser aufbereiten bzw. den Wasserverbrauch minimieren. Als offene Fragen, die durch ein kollektives Engagement von Akteuren adressiert werden sollten, sind weiterhin folgende Themen von hoher (systemischer) Relevanz: Kreislauffähiges Batteriedesigns, geschlossene oder offene Kreislaufsysteme, die Sammlung und Handhabung von EoL-Batterien und der Schwarzmasse (inkl. der Klassifizierung dieser z.B. als Gefahrgut oder nicht), die unterschiedliche Motivation zum Zugang zu Rohstoffen durch das Recycling im Vergleich zur Lebensdauerverlängerung von Batterien im Re-X und die Gestaltung der Recyclingkette als "End-to-End Akteur" oder als Multi-Stakeholder Netzwerk. [17]

Das PEM der RWTH Aachen und die Unternehmensberatung Roland Berger haben im Dezember 2023 den "Battery Monitor 2023" herausgebracht. Das Monitoring zeigt: die **aktuellen Entwicklungen von Batterieforschung und -industrie** seien insbesondere von technischen Innovationen für eine effiziente Produktion sowie alternative Batteriematerialien gekennzeichnet. Ein Abschnitt der Studie befasst sich mit den Re-X Ansätzen und stellt aktuelle Entwicklungen des Marktes und zu erwartende Rezyklatanteile für die Batterie-produktion in Europa dar. Die Autoren heben auch die Standort- und betriebsbedingten Investitions- und Betriebskosten (CapEx, OpEx) für das Batterie-recycling in Europa hervor. Das direkte Recycling wird als die spannendste Zukunftstechnologie im Batterierecycling betrachtet, wobei zuvor Re-X, also das Reuse, Remanufacture und Second Life, entscheidenden Anteil an der Verringerung des CO2-Fußabdrucks der Batteriespeichertechnologie haben wird. [18]

Recyclingtechnologien

Ein möglicher **Schlüsselprozess für das direkte Recycling** kann die **Röhren-Zentrifugaltrennung** von Elektrodenmaterialien sein. Anders als die Rückgewinnung von Rohmaterialien liegt der Fokus beim direkten Recycling auf die Rückgewinnung des Aktivmaterials, was allerdings durch die Materialeigenschaften wie Partikelgrößen und Dichte und leitfähige Additive wie Ruß erschwert ist. Beispielsweise wird bei einer LFP-Kathode nach der (mechanischen) Vorbehandlung in einer Zentrifuge das Lithium-Eisenphosphat nach außen getragen, wohingegen das Ruß im inneren bleibt. Um die Qualität der rückgewonnenen Materialien zu steigern, und insbesondere die unterschiedlichen Agglomerationen des Eingangsmaterials für die Zentrifuge besser durch die Zentrifugaltrennung zu fraktionieren, haben Forschende des KIT ein Echtzeitmodell erarbeitet, das auf Materialparameter und Massenbilanzen für Partikelgrößen und -arten beruht. Mittels Sensitivitätsanalyse wurde festgestellt, dass die Partikelgrößenverteilung (z. B. durch unterschiedliche Chargen von Eingangsmaterialien) Einfluss auf die Zentrifugaltrennung hat und daher in Echtzeit des Prozesses erkannt werden sollte - was mit ihrem entwickelten Ansatz auch gelang. Die Forschenden arbeiten an der Überführung des experimentellen Setups in Online-Messgeräten und der schnelleren Parameteroptimierung mittels Soft-Sensorik (Simulation korrelierende Messgrößen und eines Modells) bezüglich des Materialverhalten. [19]

POTENZIALE: Einsatz von generischen Algorithmen und Echtzeiterkennung erhöht die Rückgewinnung und Qualität des Fraktionierens der Elektrodenmaterialien durch die Röhren-Zentrifugaltrennung für das direkte Recycling.

HERAUSFORDERUNGEN: Die Sensitivitätsanalyse der Forschenden weist darauf hin, dass weiteres Potenzial zur Einsparung von Rechenzeit besteht und ein vollständiges Setup zur flexiblen, modellbasierten Steuerung des Fraktionierungsschritts im angestrebten Recyclingprozess noch hergestellt werden muss.

Dass das **direkte Recycling** auch **ökologisch** vielversprechend ist, zeigt eine analytische Untersuchung zu NMC Kathoden einer weiteren Forschungsgruppe des KIT um Rosenberg et al. Eine Kombination von Produktion und Recycling in einem geschlossenen Recyclingkreislauf (d. h. das immer zuerst recyceltes Material statt neue Rohstoffe unter Berücksichtigung des Marktwachstums in Deutschland eingesetzt wird) liefert in einer ökobilanziellen Betrachtung in Kombination mit einer Materialflussanalyse bis 2050 sowohl für das hydrometallurgische als auch das direkte Recyclingverfahren ökologische Vorteile im Vergleich zum Einsatz primär neuer Rohstoffe. Gleichwohl das direkte Recycling geringere GHG-Emissionen produziert als das hydrometallurgische Verfahren, zeigt die systemische Analyse, dass unter Berücksichtigung der erwarteten Batterienachfrage bis 2050 insgesamt die Kombination aus direktem und hydrometallurgischem Recycling am vielversprechendsten ist, um einen hohen Recyclinganteil im Kreislauf zu bekommen. [20]

POTENZIALE: Da bereits das hydrometallurgische Verfahren von Recycling-Akteuren in Deutschland eingesetzt wird und das direkte Recycling in Zukunft relevant erwartet wird, belegt die Studie die positive Nutzung dieser Verfahren und insbesondere deren kombinierter Einsatz in einem geschlossenen Kreislaufsystem.

HERAUSFORDERUNGEN: Die Studie betrachtet allein NMC111 und NMC811 Kathodenmaterial in der Ökobilanzierung und deren Ergebnis unterscheidet sich teilweise stark, je nach den Annahmen der Allokationsmethode von Rezyklatmengen und Umweltbelastungen des Recyclings.

Gleichwohl das **hydrometallurgische Recycling-verfahren weniger umweltschädlich** als das pyrometallurgische Verfahren ist, bedarf der Einsatz von Chemikalien wie Säuren und Laugen die Abwasseraufbereitung, was zu weiteren Kosten und potentiellen Umweltauswirkungen im eigentlichen Recyclingprozess führt. Die schwedische Chalmers University of Technology berichtet über eine neue Recyclingmethode für Elektroauto-Batterien, das ebenfalls mit Säure funktioniert, jedoch potentiell weniger umweltbelastend ist. Für das Verfahren sind keine teuren und gleichzeitig weniger schädliche Chemikalien erforderlich, da die Forschenden Oxalsäure verwenden – eine organische Säure, die im

Pflanzenreich vorkommt. Die Forschenden konnten nach eigenen Angaben aus der Schwarzmasse bis zu 98% des Lithiums und bis zu 100% des Aluminiums zusammen in einer Lösung extrahieren. Insbesondere die Rückgewinnung des Aluminiums kann für die Weiterentwicklung der bestehenden Recyclingprozesse interessant sein. [21]

POTENZIALE: Die gleichzeitige Lösung von Aluminium und Lithium aus der Schwarzmasse birgt das Potential für geringere Lithiumverluste als in herkömmlichen Verfahren, bei möglicherweise weniger Prozessschritten und besserer Umweltverträglichkeit. Das vollständige Lösen des Aluminiums ist ebenfalls sehr vielversprechend für eine hohe Materialrückgewinnungsquote.

HERAUSFORDERUNGEN: Bisher wurden das Aluminium und Lithium nur im Labormaßstab extrahiert, dieser Prozess müsste für den Industrieeinsatz skaliert werden. Zudem sind weitere Folgeschritte zu entwickeln, wie die Trennung des Lithiums vom Aluminium oder die Extraktion der verbleibenden Rohstoffe aus der Schwarzmasse (Kupfer, Kobalt, Mangan).

Künstliche Intelligenz im Batterierecycling

Der **Einsatz von künstlicher Intelligenz** bietet nicht nur für Produktionsprozesse von Batterien interessante Möglichkeiten, wie ein Beitrag des baskischen Forschungszentrums für Energiespeicherung CIC energigune aufzeigt. [22]
In der Analyse des Forschungszentrums werden die Möglichkeiten der künstlichen Intelligenz für die beiden Hauptaktivitäten des Batterierecyclings im Überblick dargestellt: einerseits die Verarbeitung der Abfälle am Ende der Nutzungsphase der Batterie, andererseits die Rückgewinnung von Materialien aus eben diesen Abfällen. [22]

POTENZIALE: Bei der Abfallverarbeitung könnte algorithmische Bilderkennung dazu beitragen, Materialien automatisiert und damit effizienter zu klassifizieren sowie Risiken für Menschen in der Verarbeitung zu minimieren, da der Kontakt mit toxischen Abfällen reduziert werden könnte. Im Anschluss an die Abfallsortierung gibt es ebenfalls Potenziale zur Prozessautomatisierung und Effizienzsteigerung. Materialien können getrennt gesammelt und dadurch schneller verarbeitet werden. Außerdem ermöglichen neuronale Netzwerke die Optimierung einzelner und Abstimmung verschiedener Recyclingrouten aufeinander oder erlauben es, Rückgewinnungsmengen wertvoller Rohstoffe im Voraus zu berechnen. Die Materialrückgewinnung aus den Abfällen könnte folglich kostengünstiger und umweltfreundlicher gestaltet werden.

HERAUSFORDERUNGEN: Wie häufig in der algorithmischen Bilderkennung der Fall, braucht es für eine gute Trefferquote bei der Materialkategorisierung große Mengen an Bild- und Sensordaten zum Trainieren des Algorithmus. Bildarchive wie WasteNet tragen hierzu an Trainingsdaten bei. [23] Um den Abfall anschließend mittels Roboter und Förderbändern zu sortieren oder die potenzielle Menge des zu behandelnden Abfalls vorherzusagen, braucht es außerdem Algorithmen, die in Echtzeit Ergebnisse liefern können. Eine erste solcher KI-gestützten Recyclinganlagen gibt es bereits in Bochum, allerdings im Kunststoffbereich. [24]

Literatur

[1] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), *BMBF-Dachkonzept Batterieforschung*, zu finden unter: https://www.bmbf.de (letzter Zugriff: 15.12.2023) https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/bmbf-dachkonzept-batterieforschung-2023.pdf?__blob=publicationFile&v=5

[2] Bundesministerium der Justiz, Bundesanzeiger, *Bekanntmachung zur Förderung von Projekten zum Thema „Forschung und Entwicklung an Batterietechnologien für technologisch souveräne, wettbewerbsfähige und nachhaltige Batteriewertschöpfungsketten"*, **21.09.2023**, zu finden unter: https://www.bmbf.de (letzter Zugriff: 15.12.2023) https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/bekanntmachungen/de/2023/09/2023-09-21-Bekanntmachung-Batterieforschung.html

[3] Bundesministerium der Justiz, Bundesanzeiger, *Bekanntmachung zur Förderung von Projekten zum Thema „Effizienzsteigerung und Nutzung von Synergieeffekten in der Batteriezellfertigung für die Elektromobilität (SynBatt)"*, **22.12.2021**, zu finden unter: https://www.bmbf.de (letzter Zugriff: 15.12.2023) https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/bekanntmachungen/de/2021/12/2021-12-22-Bekanntmachung-SynBatt.html

[4] Bundesministerium der Justiz, Bundesanzeiger, *Bekanntmachung der Förderrichtlinie für die Bundesförderung „Resilienz und Nachhaltigkeit des Ökosystems der Batteriezellfertigung"*, **25.09.2023**, zu finden unter: https://www.bundesanzeiger.de, (letzter Zugriff: 15.12.2023) https://vdivde-it.de/sites/default/files/document/BAnz_AT_25-09-2023_B1_Foerderrichtlinie_Resilienz_Nachhaltigkeit_%C3%96kosystem_Batteriezellfertigung.pdf

[5] Bundesministerium der Justiz, Bundesanzeiger, *Bekanntmachung der Richtlinie zur Förderung von Projekten zum Thema „Clusters Go Industry" im Rahmen des Dachkonzepts Batterieforschung im Rahmenprogramm „Vom Material zur Innovation"*, **03.0.2023**, zu finden unter: https://www.bmbf.de (letzter Zugriff: 15.12.2023) https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/bekanntmachungen/de/2023/02/2023-02-03-Bekanntmachung-Clusters-Go-Industry.html

[6] Hesselmann Service GmbH, Das Batteriegesetz, ***Die neue EU-Batterieverordnung 2023 (BATT2)***, **05.12.2023**, zu finden unter: https://www.batteriegesetz.de (letzter Zugriff: 15.12.2023) https://www.batteriegesetz.de/themen/die-neue-batterieverordnung-batt2-2023/

[7] Circular Valley, **Online-Workshop, *„Batterie-Kreislaufwirtschaft, die neue EU-Verordnung und Digitaler Batteriepass"***, **09.08.2023**, zu finden unter: https://circular-valley.org/ (letzter Zugriff: 15.12.2023) https://circular-valley.org/online-workshop-digitaler-batteriepass_21_11_2023

[8] Z.-C. Liu et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, *15*, 52552–52562. https://doi.org/10.1021/acsami.3c12245

[9] Batzer et al., *Chem ElectroChem* **2023**, e202300452. https://doi.org/10.1002/celc.202300452

[10] Z. Zhang et al., *Energy Technol.* **2023**, *11*, 2300553. https://doi.org/10.1002/ente.202300553

[11] S. Klick et al., *Energy Technol.* **2023**, 2300566. https://doi.org/10.1002/ente.202300566

[12] W. Pan et al., *Phys Chem Chem Phys.* **2023**, ***25***, 31754-31769. https://doi.org/10.1039/D3CP03677D

[13] B. Bieber et al., *Carbon* **2023**, *201*, 847-855. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.09.073

[14] Z. Hu et al., *Green Energy & Environ.* **2024**, *9*, 81-88. https://doi.org/10.1016/j.gee.2022.05.004

[15] R. Tao et al., *Chem. Eng. J.* **2023**, *471*, 144300. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144300

[16] P. Jiang et al., *Chem. Eng. J.* **2023**, *451*, 138771. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138771

[17] **SYSTEMIQ,** *Advancing sustainable battery recycling: towards a circular battery system*, **27.11.2023**, zu finden unter: https://www.systemiq.earth (letzter Zugriff: 15.12.2023) https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2023/11/Systemiq_Sustainable_Battery_Recycling_Full_Study_WEB-1.pdf

[18] W. Bernhart et al., *The battery market continues to boom, but the problems are growing – a look at the latest developments and implications*, **08.12.2023**, zu finden unter: https://www.rolandberger.com (letzter Zugriff: 15.12.2023) https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Battery-Monitor-2023-An-assessment-of-the-current-and-future-battery-value.html

[19] T. Sinn et al., *Chem. Eng. Sci.* **2023**, *277*, 118585. https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118858

[20] S. Rosenberg et al., *Resour. Conserv. Recycl.* **2023**, *198*, 107145. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107145

[21] L. M. J. Rouquette, *Sep. Purif. Technol.* **2023**, *320*, 124143. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124143

[22] I. Careaga et al., *Opportunities offered by artificial intelligence in battery recycling*, Blog, **14.11.2023**, zu finden unter: https://cicenergigune.com (letzter Zugriff: 15.12.2023) https://cicenergigune.com/en/blog/opportunities-offered-artificial-intelligence-battery-recycling

[23] Recycleye Ltd., Solutions, WasteNet, *The world's largest dataset for waste*, zu finden unter: https://recycleye.com (letzter Zugriff: 15.12.2023) https://recycleye.com/wastenet/

[24] **Remondis Recycling GmbH & Co. KG,** *Feierliche Eröffnung der modernsten Recycling-Sortieranlage Europas in Bochum*, **15.06.2023**, zu finden unter: https://www.remondis-recycling.de (letzter Zugriff: 15.12.2023) https://www.remondis-recycling.de/aktuelles/detail/feierliche-eroeffnung-der-modernsten-recycling-sortieranlage-europas-in-bochum/