ABSCHLUSSBERICHT
S²TAR – DEVELOPMENT OF ALL-SOLID-STATE BATTERY RECYCLING PROCESSES (03XP0319A)

Teilprojekt im Rahmen des
greenBatt Clusters

Laufzeit: 01.01.2021 – 31.03.2024

Grube, Michael; Zellmer, Sabrina

Abschlussbericht „S²taR – Development of All-Solid-State Battery Recycling Processes“ (03XP0319A)

Inhalt

Kurzbericht 3

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung 3

2. Ablauf des Vorhabens 3

3. Wesentliche Ergebnisse 4

Eingehende Darstellung 5

1.) Beschreibung der durchgeführten Arbeiten 5

1. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse des Teilvorhabens 5

2.) Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit 20

2. Während der Laufzeit bekannt gewordene, relevante Ergebnisse Dritter 21

3. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen 21

Erfolgskontrollbericht 23

1. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens 23

2. Fortschreibung des Verwertungsplans: 25

3. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit 27

4. Angaben zu Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben 28

5. Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und der Zeitplanung 28

Vorhabenbezeichnung: S²taR – Development of All-Solid-State Battery Recycling Processes	
Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., München	**Förderkennzeichen** 03XP0319A
Projektleiter*in Prof. Dr.-Ing. Sabrina Zellmer (Projektleiterin) M. Sc. Michael Grube (Projektleiter, Wissenschaftler)	**Laufzeit** 01.01.2021 - 31.03.2024

Kurzbericht

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel des Projekts S²taR ist die Untersuchung und Bewertung der Recyclingfähigkeit heute schon vielversprechender Festkörperbatteriekonzepte (Festkörperbatterie, engl. all solid-state battery, ASSB), bereits während der Technologieentwicklung. Hierbei sollen insbesondere die Nutzung von etablierten Recyclingtechnologien - der mechanischen, thermischen und hydrometallurgischen Aufbereitung - und der Einsatz der zurückgewonnenen Materialien im Sinne der Kreislaufwirtschaft evaluiert und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

2. Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Vorhabens lässt sich der grafischen Projektübersicht in Abbildung 1 entnehmen.

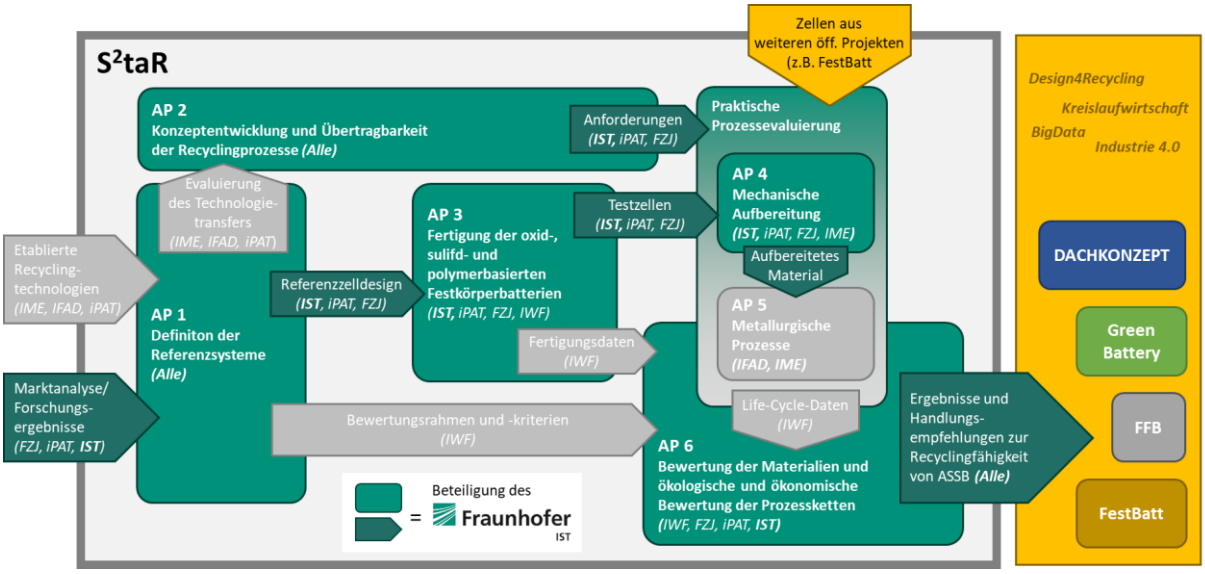

Abbildung 1 Grafischer Projektplan und Vernetzung innerhalb des Projekts S²taR

Da S^{2}taR als offenes exploratives Projekt mit großem Neuheitswert geplant wurde, welches Recyclingkonzepte für ASSB erstmalig auf breiter technologischer Basis untersuchen sollte, um daraus Handlungsempfehlungen für zukünftige Arbeiten abzuleiten, haben sich keine konkreten technologischen Abhängigkeiten ergeben, durch die der Arbeitsplan angepasst werden musste. Alle benötigten Materialien wurden im Rahmen des Projektes bereitgestellt, die Batteriezellen gefertigt (da nicht auf dem Markt verfügbar) und anschließend im Projekt recycelt. Ergänzend zu den Arbeiten im Projekt und greenBatt Cluster, wurde durch das IST auch ein intensiver fachlicher Austausch zum „FestBatt Kompetenzcluster für Festkörperbatterien“ gepflegt.

3. Wesentliche Ergebnisse

In S^{2}taR wurde erstmalig das Recycling von Festkörperbatterien aller drei aussichtsreichen Materialklassen (Sulfide, Oxide, Polymere) systematisch in einem interdisziplinären Konsortium untersucht, wobei das Fraunhofer IST hierbei seine Kompetenzen im Bereich sulfidbasierter Festkörperbatterien eingebracht hat. Aufgaben waren die Bereitstellung von Inputmaterialien für das Recycling (Modelmaterialien und sulfidbasierte ASSB) sowie die Konzeptionierung und Bewertung der Recyclingprozessketten. Die experimentellen und konzeptionellen Ergebnisse aus dem Projekt ermöglichen wertvolle Handlungsempfehlungen für die zukünftige Entwicklung recyclinggerechter Batterietechnologien sowie robuster und auf neue Technologien ausgerichteter Recyclingprozessketten (*Ahuis, M., Doose, S., Vogt, D., Michalowski, P., Zellmer, S., Kwade, A. Recycling of solid-state batteries. Nat Energy 9, 373–385 (2024). https://doi.org/10.1038/s41560-024-01463-4*).

Es konnte gezeigt werden, dass das Recycling von Festkörperbatterien technisch mit den vorhandenen und etablierten Prozessen weitestgehend möglich ist; dazu ist jedoch eine Anpassungen an die neuen Prozessbedingungen, -parameter und den Aufbau der Prozesskette (zusätzliche, neu geordnete oder auch weniger nötige Prozessschritte, andere inerte Prozessatmosphären z.B. für Sulfide und Lithium-Metall) erforderlich. Hierzu wurden im Konsortium gemeinsame Konzepte für mögliche Prozessketten entwickelt, welche als Grundlage für weitere Forschungsarbeiten und mögliche industrielle Akteure dienen können.

Die zukünftigen Recyclingprozessketten sollten möglichst mit steigender technologischer Komplexität und Diversität von Energiespeichern entweder robuster oder flexibler bzw. modularer ausgelegt werden, falls die untersuchten Festkörperbatterien mit ihren sehr unterschiedlichen Anforderungen (größere Härte, hohe Reaktivität, hohe adhäsive Bindung der Elektroden, großer Einfluss auf pH-Werte in der Hydrometallurgie etc.) in die Recyclingströme gebracht werden.

Eingehende Darstellung

1.) Beschreibung der durchgeführten Arbeiten

1. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse des Teilvorhabens

Der Ablauf und die Vernetzung der Arbeiten innerhalb des vom Fraunhofer IST koordinierten Vorhabens lassen sich der grafischen Projektübersicht in Abbildung 1 entnehmen. Die Arbeiten des Fraunhofer IST konzentrierten sich aufgrund der eigenen Vorarbeiten und Expertise im Bereich der sulfidbasierten Festkörperbatterien und der Synthese von Festelektrolyten vor allem auf die Zelldefinitionen und Ableitung von Anforderungen an das Recycling der sulfidischen Zellkonzepte insb. im mechanisches Recycling sowie die praktische Fertigung dieser Festkörperbatterien und die Bereitstellung weiterer Inputmaterialien für das Recycling. Die Bewertung und Ableitung von Handlungsempfehlungen erfolgten ebenfalls mit Fokus auf die sulfidischen Systeme sowie durch den erfolgreichen Austausch mit dem FestBatt Cluster.

AP 1 Definition und Auswahl der Referenzsysteme

<u>UAP 1.1 Markt- und Forschungsrecherche</u>

Im Rahmen von UAP 1.1 wurden aktuelle Zellkonzepte und relevante Materialien nach dem Stand der Forschung und Technik mit Fokus auf die Evaluierung von zukünftigen Recyclingprozessketten betrachtet. Um im späteren Verlauf des Projekts die Recyclingprozesse möglichst belastbar zu untersuchen, wurden hierbei insbesondere prozess- und sicherheitskritische bzw. reaktive Materialien und Zellkomponenten in den Fokus gestellt. Generell ist festzuhalten, dass sich sulfidbasierte Festkörperbatterien derzeit noch in einem sehr niedrigen TRL-Level von überwiegend TRL 4, also im Labormaßstab, befinden. Hinsichtlich der Anode in Festkörperbatterien sind derzeit Lithium-Metall-Anoden, lithiumfreie Anoden mit entsprechenden Ableiterkonzepten und Siliziumanoden aussichtsreiche Technologien mit hohen theoretischen Energiedichten. Aufgrund der besonders hohen Reaktivität von metallischem Lithium, stellen hierbei die Lithium-Metall-Anoden die höchsten Anforderungen an die Recyclingprozesse, sowohl an Luft, als auch in Lösungsmitteln oder wässrigen Medien. Im Labormaßstab, der den größten Teil der veröffentlichten Zellkonzepte innerhalb der Materialklasse der Sulfide umfasst, finden überwiegend Laborpresszellen mit kreisförmigen Elektroden Anwendung, da sich diese am einfachsten auf einen erhöhten Anpressdruck zur Sicherstellung der Kontaktierung beim Zyklisieren bringen lassen. Für die tatsächliche großskalige Anwendung befinden sich jedoch Zellkonzepte im Pouchformat oder prismatischen Format in der Entwicklung und stellen aufgrund der höheren Zellkapazität das zukünftig benötigte Zellformat dar. Da aufgrund dieses niedrigen TRL-Levels noch keine industriell gefertigten Gehäuse für Festkörperbatteriemodule bekannt sind, werden diese zunächst nicht für das Recycling berücksichtigt, sondern ausschließlich Zellen in Pouchfolien oder prismatischen Aufbauten ohne verstärkendes Gehäuse. Im Projekt S2taR wurde zur Abbildung größerskaliger Zellkonzepte

daher das Pouchformat gewählt. Hinsichtlich der Kathode und dem Separator für sulfidbasierte Zellen zeigt sich bei den veröffentlichten Zellkonzepten ein Trend zu nickelreichen Aktivmaterialien, wie NCM 622 und NCM 811. Als Festelektrolyte sind insbesondere Thiophosphate, wie Li_3PS_4, sowie die ionisch höher leitfähigen Argyrodite, wie Li_6PS_5Cl, hervorzuheben, welche bereits von einigen Herstellern kommerziell im kg-Maßstab angeboten werden.

UAP 1.3 Definition der Referenzzellen

In UAP 1.3 war das IST für die Definition der sulfidbasierten Materialsysteme und Zellkonzepte verantwortlich. Dieses Arbeitspaket ist dabei eng mit UAP 1.1 sowie 3.1 verknüpft, in denen im späteren Projektverlauf die Zellzusammensetzungen für die Fertigung der Festkörperbatterien innerhalb des Projekts quantitativ festgelegt wurde.

Im Rahmen des Projektes wurden gemeinsam mit den Projektpartnern und durch Berücksichtigung von Entwicklungen im FestBatt Cluster die in Tabelle 1 dargestellten Zellkonzepte festgelegt. Darüber hinaus wurden im Rahmen der Recyclingaktivitäten zudem - auf Anregung des Managementkreises - Hybridkonzepte u.a. auf Basis von Polymer- und Oxid-Elektrolyten betrachtet. Hervorzuheben ist hierbei auch die Betrachtung von drei verschiedenen Kathodenaktivmaterialien. Hierdurch konnten neben den relevanten Festelektrolyten auch mögliche Strategien für den Umgang mit unterschiedlichen (insbesondere auch unter Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Gründe) Aktivmaterialien (z.B. NCM vs. LFP) im Projekt betrachtet werden.

Tabelle 1 Qualitative Übersicht der definierten Zellkonzepte, gegliedert nach Materialklasse und Komponente

	Sulfidkonzept	Polymerkonzept	Oxidkonzept
Stromableiter (Anode)	Kupfer	Kupfer	Nickel
Anode	Li-Metal	Li-Metal	Li-Metal
Separator	Li_6PS_5Cl + Binder	PEO + LiTFSI	LLZO
Kathode	NCM 811 + Li_6PS_5Cl + Binder	LFP + PEO + LiTFSI + C65	LCO + LLZO
Stromableiter (Kathode)	Aluminum	Aluminum	Gold + Aluminum
Ableiterfahne	Ni + Al	Ni + Al	Ni + Al
Einhausung	Pouchfolie	Pouchfolie	Pouchfolie
Zellformat (Elektroden)	~ 9 cm²	~ 30 cm²	~ 1 cm²

AP 2 Konzeptentwicklung und Validierung

Im Rahmen des Arbeitspakets 2 wurde ein gemeinsamer Anforderungskatalog an Recyclingprozesse auf Basis der ausgewählten Eingangsmaterialien erstellt, auf dessen Grundlage in den nachfolgenden Arbeitspaketen Recyclingprozesse durchgeführt wurden sowie die zugrundeliegenden Technische Gebäudeausrüstung für die ökonomische und ökologische Bewertung in AP 6 berücksichtigt wurden.

UAP 2.1 Erstellung und Evaluation eines Anforderungskataloges

Die Erstellung des Anforderungskatalogs wurde in UAP 2.1 durch das IST hinsichtlich der suflidbasierten Festkörperbatterien und der Lithium-Metall-Anode begleitet. Diese beiden Komponenten bzw. Materialien stellen nach aktuellem Stand des Wissens die höchsten prozess- und sicherheitstechnischen Anforderungen an die nachfolgenden Recyclingprozesse. In Bezug auf die Sulfide ist die Bildung von toxischem und brennbaren Schwefelwasserstoff (H_2S) in Kontakt mit Wasser und Luftfeuchtigkeit der zentrale Aspekt bei der Ausgestaltung der Prozesskette und Medienauswahl. Um sicheres Arbeiten zu gewährleisten ist daher mindestens trockene Luft, zur potenziellen Sicherstellung der Produkteigenschaften im Recycling jedoch eine inerte Atmosphäre, wie Argon, zu verwenden. Entsprechende Erfahrungen im Handling und in Bezug auf die Bildung von H_2S in Trockenräumen wurde beispielsweise im FestBatt Cluster bei der Materialsynthese sulfidischer Festelektrolyte gewonnen und können auf das Recycling übertragen werden. In Bezug auf metallisches Lithium gelten vergleichbare Anforderungen aufgrund der heftigen Reaktivität mit Wasser/Feuchtigkeit. Da Lithium ebenfalls mit

Stickstoff reagiert, wenn auch nicht sicherheitskritisch, ist die Verwendung von Argon als Inertgas vorzuziehen, wenn Lithium in seiner Reinform abgetrennt werden soll.

Der im Konsortium zusammengestellte Anforderungskatalog, der über die hier dargestellten sicherheitstechnischen Anforderungen hinaus auch technologische Anforderungen enthält, wurde zusammen mit dem Bewertungskatalog der Recyclingprozesse in den Handlungsempfehlungen zum Projektende zusammengeführt. Die relevanten Informationen wurden zudem kontinuierlich zwischen allen Projektpartnern ausgetauscht und für die Prozessentwicklung in AP 4 und 5 genutzt.

UAP 2.2 Modelluntersuchungen

Hinsichtlich der sulfidischen Festelektrolyte wurden bereits im Rahmen von FestBatt Sicherheitsuntersuchungen an sulfidischen Festelektrolyten im kg-Maßstab durchgeführt, deren Ergebnisse im Rahmen von S^2taR in Abstimmung mit dem iPAT erweitert und auf das Recycling von Festkörperbatterien übertragen wurden. Die Modelluntersuchungen zur Reaktivität von Lithium wurden entsprechend begleitend zur Zellfertigung in AP 3 und der nachfolgenden Entwicklung der Recyclingprozesse - insbesondere im Hinblick auf die Atmosphäre der mechanischen Aufbereitung und die verwendeten Laugungsmittel in der Hydrometallurgie - durchgeführt.

UAP 2.4 Übertragbarkeit

Bestehende Recyclingprozesse beinhalten aufgrund der brennbaren und teils giftigen Flüssigelektrolyte bzw. Lösungsmittel bereits verschiedene Sicherheitsmaßnahmen, wie z.B. explosionsgeschützte Konstruktionen oder gezielte Inertisierungen mit Stickstoff oder Argon. Für Sulfide und Lithium sind bei geringen Qualitätsanforderungen trockene Luft oder, bei höheren Anforderungen bzgl. geringster Produktreaktionen, Argon mögliche Prozessgase. In Bezug auf das mechanische Recycling stellen sulfidische Festkörperbatterien keine gesonderten mechanischen Anforderungen, da Sulfide weder besonders abrasiv oder spröde (vgl. Oxide), noch elastisch oder adhäsiv (vgl. Polymere) sind. Bei einer inerten Prozessführung lassen sich mechanische Verfahren, wie in diesem Projekt, die Nutzung von Schneidmühlen, gut auf sulfidische Festkörperbatterien übertragen. Da die pyrometallurgische Route eine thermische Reaktion der Materialien beinhaltet, ist bei entsprechender Inertisierung oder Vorbehandlung der Materialien ebenfalls ein einfacher Übertrag bestehender Prozesse zu erwarten. Lediglich hinsichtlich der Hydrometallurgie und dem Einsatz von Lösungsmitteln zum Abtrennen von sulfidischen Festelektrolyten wird eine umfassendere Anpassung der Lösungsmittel erwartet. Hierbei gilt es zu evaluieren, ob eine Auflösung der Sulfide und somit ein Verlust der chemischen

Struktur oder eine prozesstechnische Abtrennung in Form von Suspensionen als chemisch stofferhaltender Nassprozess die aussichtsreiche Recyclingroute darstellt. Die detaillierte Bewertung der Übertragbarkeit erfolgt zusätzlich im Anschluss an die Prozessevaluierung im Bewertungskatalog und im Rahmen der Formulierung von Handlungsempfehlungen.

AP 3 Fertigung von Festkörperbatterien

Die Arbeiten in AP 3 bildeten durch die Fertigung und Bereitstellung von sulfidischen Festkörperbatterien mit relevanten und vielversprechenden Materialien die Grundlage zur Entwicklung und praktischen Erprobung der Recyclingprozesse in AP 4 und 5. Die entsprechende Definition des Sulfidkonzepts ist in Tabelle 1 dargestellt. Einen anschaulichen Überblick über die durchgeführten Prozessschritte zur Fertigung von sulfidbasierten Pouchzellen bietet das im Rahmen des Projekts erstellte Abschlussvideo, welches auf der Internetpräsenz des greenBatt Clusters abzurufen ist (https://www.greenbatt-cluster.de/de/projekte/s2tar/).

UAP 3.1 Quantitative Festlegung von Zellaufbauten und Fertigungskonzepten

In UAP 3.1 wurde anhand der Definitionen in UAP 1.3 der Zellaufbau für die entsprechenden Materialien quantitativ festgelegt. Aufgrund der Verfügbarkeit und Kosten von Komponenten, wie z.B. metallischer Lithiumfolie für Anoden, wurden teilweise erhöhte Schichtdicken für den Zellbau festgelegt, als technologisch nötig sind. Diese Überschüsse erhöhen aber teils die Anforderungen an die nachfolgenden Recyclingprozesse, sodass hierdurch die Evaluierung und Bewertung der Prozesse in Bezug auf Sicherheitsaspekte besonders robuste Ergebnisse verspricht. Darüber hinaus wurden die dokumentierten Massenanteile innerhalb der Zelle für ökonomische und ökologische Betrachtungen in AP 6 verwendet.

UAP 3.2 Fertigung der Oxid-, Sulfid- und Polymer-basierten Festkörperbatterien

UAP 3.2 umfasste für das IST die Vorbereitung und Etablierung der Fertigung der sulfidbasierten Festkörperbatterien zur Erprobung der Recyclingprozesse. Ebenfalls wurden im Rahmen dieses Arbeitspakets die Materialbeschaffungen und begleitende Materialcharakterisierungen in Rückkopplung mit AP 4 und 5 durchgeführt. Die Umsetzung der Zellfertigung in der benötigten Stückzahl zum anschließenden Recycling erfolgte final im zweiten Projektjahr in UAP 3.3.

UAP 3.3 Fertigung der Oxid-, Sulfid- und Polymer-basierten Festkörperbatterien

UAP 3.3 beinhaltete seitens des IST die Fertigung der sulfidbasierten Festkörperbatterien und die Bereitstellung weiterer Materialien als Input zur Erprobung und Untersuchung der Recyclingprozesse. Bezogen auf das bereitzustellende Material konnten im Projekt größere Mengen als ursprünglich geplant bereitgestellt, sodass ausreichende Mengen an Zellen und Modellmaterialien, wie z.B. vorgemischte Kathodenkomposite, Zellkomponenten oder Einzelmaterialien an die Projektpartner zur Weiterverarbeitung im Recyclingprozess übergeben werden konnten.

Die Fertigung der Zellen erfolgte über die Prozessschritte Dispergieren, Nassbeschichten und Trocknen von Komposit-Kathoden und Separatoren auf Basis des sulfidischen Festelektrolyten (Li_6PS_5Cl). Als Anode dienten kommerziell erhältliche Lithiumfolien, appliziert auf Kupferfolie. Ziel war es ein Konzept zu wählen, welches hohe sicherheitstechnische Herausforderungen an das Recycling stellt sowie die theoretisch höchsten Energiedichten für Festkörperbatterien, direkt nach Lithiumreservoir-freien Konzepten, verspricht.

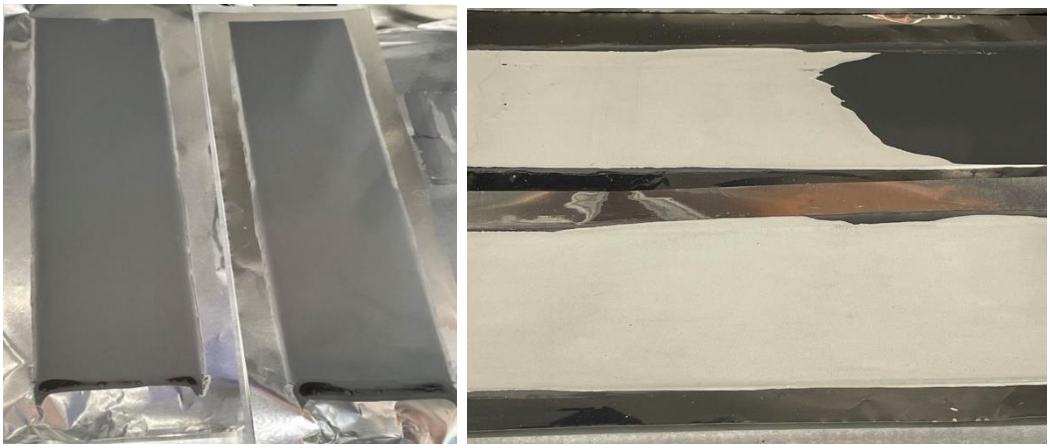

Abbildung 2 – Hergestellte Komposit-Kathoden nach dem Dispergieren, Beschichten und Trocknen

Entsprechend der Definitionen aus AP 1 wurde die Komposit-Kathode in einem Massenverhältnis von 73:21:3:3 NMC($LiNi_{0.83}Mn_{0.06}Co_{0.11}O_2$):$Li_6PS_5Cl$:Ruß:Binder mit Butadien als Binder und p-Xylol als Lösungsmittel mittels des Rakelprozesses mit einer Spaltbreite von 200 µm gefertigt. Nach einer Trocknungszeit von 60 min bei 70 °C betrug die Schichtdicke 90±10 µm. Für die Herstellung des Separators wurden LPSCl:HNBR in einem Verhältnis von 95:5 eingesetzt. Die Trocknungstemperatur betrug 70 °C und die Trocknungszeit 60 min.

Tabelle 2- Herstellerangaben zu den verwendeten Chemikalien.

Chemikalien	Hersteller
NMC($LiNi_{0.83}Mn_{0.06}Co_{0.11}O_2$)	MSE Supplies®
Li_6PS_5Cl	NEI Corporation
Super C65 Ruß	Nanografi Nano Technology
HNBR	Arlanxeo

Im Projekt wurden durch die Arbeiten zur Fertigung der sulfidischen Festkörperbatterien alle benötigten Materialien bereitgestellt und den Projektpartnern, insbesondere aus Aachen zur thermischen Behandlung und aus Braunschweig zur mechanischen Behandlung übergeben. Darüber hinaus wurden Modell- und Reinmaterialien, wie Elektrolyte, Aktivmaterialien, Binder, Folien und Komposite im kg-Maßstab für erweiterte Versuche zur Verfügung gestellt. Die zusätzlich bereitgestellten Festelektrolyte und Aktivmaterialien entsprechen dabei einem Vielfachen der ursprünglich im Projekt vorgesehen Zellen.

Der Zellbauprozess am Fraunhofer IST ist weiterhin im veröffentlichen Abschlussvideo zum Projekt, welches u.a. auf der Website des greenBatt Clusters und entsprechenden Social-Media-Kanälen veröffentlicht wurde, zu finden.

AP 4 Mechanische Aufbereitung

Im Rahmen des Arbeitspakets 4 lag der Fokus des IST darauf, entsprechende Erfahrungen und Anforderungen hinsichtlich des mechanischen Recyclings und somit dem ersten Recyclingschritt nach der Nutzungsphase sulfidischer Festkörperbatterien auf Basis der vorangehenden Fertigungsschritte abzuleiten.

Gemeinsam mit den Partnern wurde in UAP 4.1. ein Bewertungskatalog entwickelt. In diesem sind die wesentlichen Herausforderungen für die jeweiligen Zellchemien zusammengefasst. Folgende Kernaussagen wurden als Anforderungen identifiziert:

Sulfidbasierte Zellchemie:

- Herausforderung: H_2S entsteht bei Kontakt der Sulfide mit Wasser
- Inerte Prozessführung aufgrund hoher Reaktivität notwendig
- Prozessierung in Lösungsmitteln um atmosphärische Exposition zu verringern

Oxidbasierte Zellchemie:

- Mechanische Aufbereitung aufgrund der vorteilhaften mechanischen Eigenschaften (Sprödheit)

- Möglichkeit der Prozessierung an normaler Atmosphäre (Luft, wasserhaltig), sofern Lithiummetall deaktiviert oder abgetrennt wurde

Polymerbasierte Zellchemie:

- Herausforderung: Nach der Zerkleinerung entsteht eine nicht stofflich separierte Fraktion inkl. Folie, die mechanisch kaum weiter aufgetrennt werden kann
- Alternative Aufbereitungsrouten wären eine lösungsmittelbasierte Aufbereitung oder die thermische Aufbereitung

Zur Bewertung der mechanischen Recyclingprozesse von sulfidischen Festkörperbatterien, welche praktisch am iPAT umgesetzt wurden, konnten die in AP 2 formulierten sicherheitstechnischen Anforderungen für den Aufschluss von noch eingehausten Festkörperbatterien in einer mit Inertgas gespülten Schneidmühle experimentell untersucht werden. Dies ist besonders relevant, da die größte Herausforderung beim Recycling die Reaktivität aller schwefelbasierten Elektrolyte (Sulfide/Thiophosphate) mit der Umgebungsatmosphäre bzw. Feuchtigkeit ist. Einerseits führt die Reaktion mit Wasser zur Bildung von giftigem H_2S, was ein angepasstes Sicherheitskonzept für das mechanische Recycling erfordert. Zum anderen verliert der Festelektrolyt durch die Reaktion seine Funktion und seinen stofflichen Wert, da die Herstellungskosten durch die aufwändige Produktion in inerter Atmosphäre einen großen Teil des Materialpreises ausmachen (I, II).

Eine mechanische Aufbereitung, bestehend aus der Zerkleinerung und Trennung in einzelne Bestandteile, ist unter strengen Sicherheitsvorschriften und in einer Inertgas- oder Trockenraumatmosphäre möglich. Dies erfordert jedoch entsprechende Ressourcen wie Inertgase und Energie zur Klimatisierung des Trockenraums und birgt im Falle eines Defekts weiterhin ein Gefährdungspotenzial bei einer unbeabsichtigten Freisetzung von Schwefelwasserstoff. Der weiche, pulverförmige Festelektrolyt kann zudem einerseits Probleme bei der Zerkleinerung und Klassierung verursachen. Andererseits ermöglicht die geringere Haftfestigkeit der Schichten auf Ableiterfolien im Vergleich zu LIB-Elektroden eine einfachere Trennung der Folien und der Materialien aus den Kathoden- und Separator-Verbünden (I, III). Dies kann zu erhöhten Ausbeuten und Recyclatreinheiten von Elektrolyt- und Kathodenaktivmaterialien führen, die direkt in hydrometallurgische Aufbereitungsprozesse eingespeist werden können (I, IV).

Eine lösungsmittelbasierte Vorbehandlung bzw. Deaktivierung könnte den Vorteil mit sich bringen, dass der Festelektrolyt aufgelöst und sein Gefährdungspotenzial verringert wird. Ein weiterer Vorteil einer lösungsmittelbasierten Recyclingroute kann die direkte Wiederaufbereitung, d.h. Resynthese aus der Lösung sein (I, IV, V). Durch den Austausch im Rahmen des FestBatt Clusters und unter Berücksichtigung des späteren Recyclings von End-of-Life Zellen mit stark elektrochemisch gealterten Komponenten und Materialien ist ein direktes Recycling der Sulfide

anhand der Ergebnisse und Betrachtungen im Rahmen des Projekts S^2taR nicht ausgeschlossen aber weniger aussichtsreich.

Die thermische und pyrometallurgische Aufbereitung aufgrund möglicher Zersetzungsreaktionen des Festelektrolyten mit potenziell toxischen Abgasen, der schwierigen Rückgewinnung von Lithium aus der Schlacke und der daraus resultierenden geringeren Materialrecyclingeffizienz ist nicht zu empfehlen (I, IV). Mit entsprechender sicherheitstechnischer Ausrüstung ist dieser Prozess jedoch sehr robust, da die sicherheitskritischen Sulfide frühzeitig innerhalb der Gesamtprozesskette deaktiviert werden können.

I. Ahuis, M., Doose, S., Vogt, D., Michalowski, P., Zellmer, S., Kwade, A. Recycling of solid-state batteries. Nat Energy 9, 373–385 (2024). https://doi.org/10.1038/s41560-024-01463-4
II. Batzer, M., Heck, C., Michalowski, P. & Kwade, A. Current Status of Formulations and Scalable Processes for Producing Sulfidic Solid-State Batteries. Batteries & Supercaps 5; 10.1002/batt.202200328 (2022).
III. Batzer, M., Voges, K., Wang, W., Michalowski, P. & Kwade, A. Systematic evaluation of materials and recipe for scalable processing of sulfide-based solid-state batteries. Materials Today Communications 30, 103189; 10.1016/j.mtcomm.2022.103189 (2022).
IV. Tan, D. H. S. et al. Sustainable design of fully recyclable all solid-state batteries. MRS Energy & Sustainability 7; 10.1557/mre.2020.25 (2020).
V. Tan, D. H. S., Banerjee, A., Chen, Z. & Meng, Y. S. From nanoscale interface characterization to sustainable energy storage using all-solid-state batteries. Nature nanotechnology 15, 170–180; 10.1038/s41565-020-0657-x (2020).
VI. Azhari, L., Bong, S., Ma, X. & Wang, Y. Recycling for All Solid-State Lithium-Ion Batteries. Matter 3, 1845–1861; 10.1016/j.matt.2020.10.027 (2020).

AP 6 Bewertung und Handlungsempfehlungen

Der Schwerpunkt der Arbeiten in AP 6 lag auf der Konzeptionierung von geeigneten Recyclingprozessketten und der technologischen Bewertung des Recyclings von Festkörperbatterien. Die Arbeiten untergliederten sich zunächst in die Recherche und die Definition von Referenzprozessketten zum Recycling bereits etablierter Batterietechnologien und der Anpassung dieser Prozessketten an die untersuchten Festkörperbatterien basierend auf den bisherigen Projektergebnissen der Recyclingversuche am iPAT, IME und IFAD. Als darauffolgender und für das Projekt abschließender Arbeitsschritt wurden damit eigenständige Konzepte für adaptierte Prozessketten für Festkörperbatterien der jeweiligen Materialklassen (Sulfide, Oxide, Polymere) entwickelt und beschrieben.

Zu diesem Zweck wurden zunächst mehrere interne Workshops durchgeführt, in denen im Konsortium die relevanten Ergebnisse und Prozessketten zusammengetragen wurden. Hierbei wurden systematisch drei prinzipielle Prozessketten aufgebaut:

1. Eine Niedrigtemperaturroute mit Fokus auf mechanischen Trennverfahren und nachgelagerten Prozessschritten, wie der Hydrometallurgie
2. Eine mittlere Temperaturroute mit einer thermischen Deaktivierung kritischer Komponente bzw. einer Pyrolyse und nachgelagerten Prozessschritten, wie einer weiteren mechanischen Trennung und der Hydrometallurgie
3. Eine Hochtemperaturroute mit einem ersten pyrometallurgischen Schritt zum Aufschmelzen der Komponenten und einer nachgelagerten mechanischen und hydrometallurgischen Auftrennung der Legierungs- und Schlackenanteile

In den nachfolgenden Abbildungen 4 bis 6 sind konzeptionelle Prozessketten der entsprechenden drei Routenansätze dargestellt. Als Übersicht zu diesen Prozessketten befindet sich eine zusammenfassende Veröffentlichung unter Beteiligung aller Projektpartner aus S^2taR zum Zeitpunkt des Abschlussberichts in der Finalisierung.

Eine Übersicht zu den entwickelten materialspezifischen Routen ist in Abbildung 3 dargestellt.

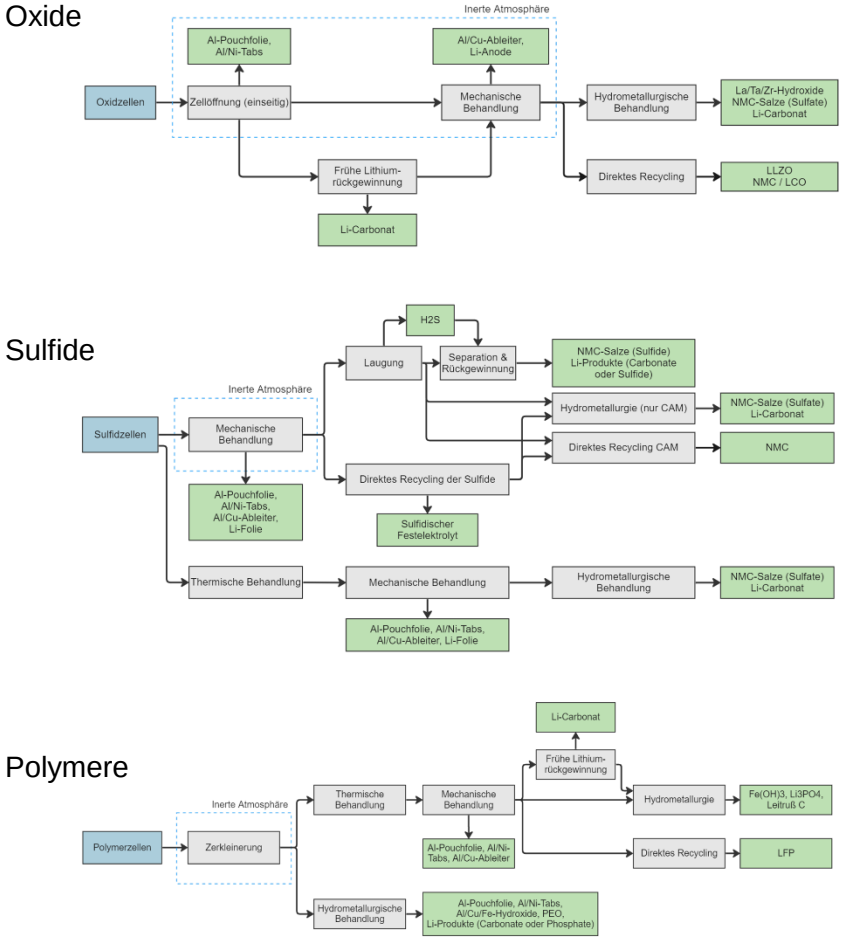

Abbildung 3: Übersicht der Materialspezifischen Recyclingrouten für ASSB

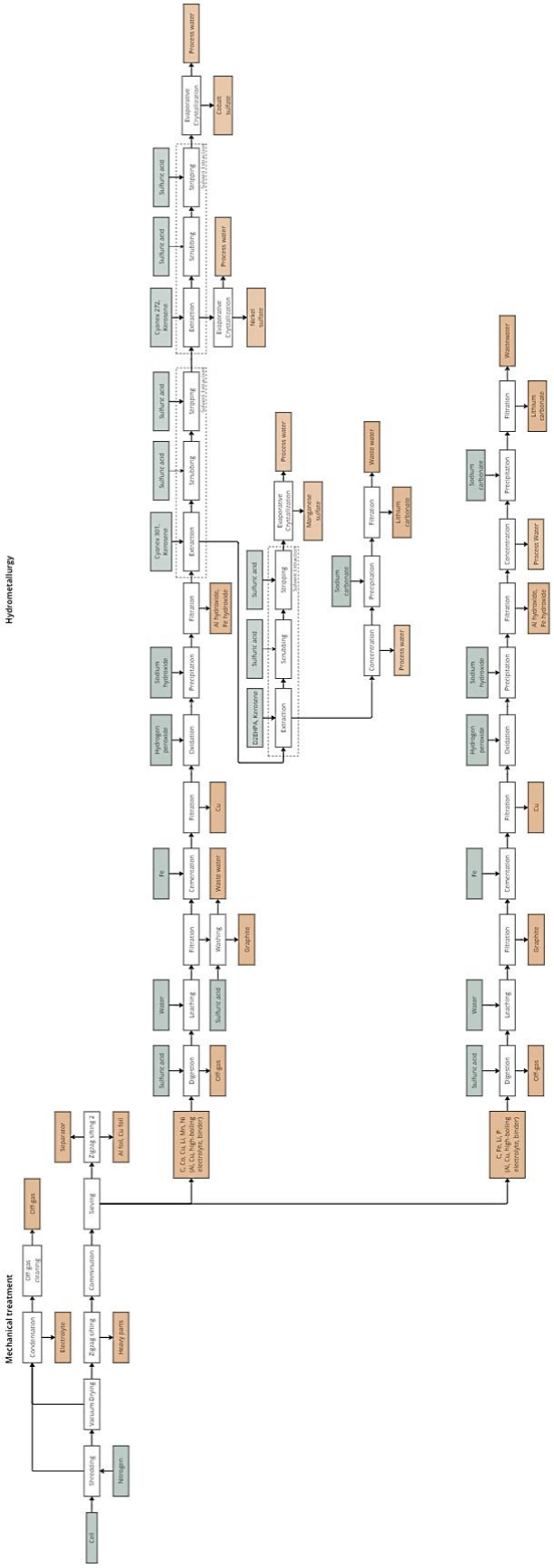

Abbildung 4: Route 1: Mechanisches Recycling

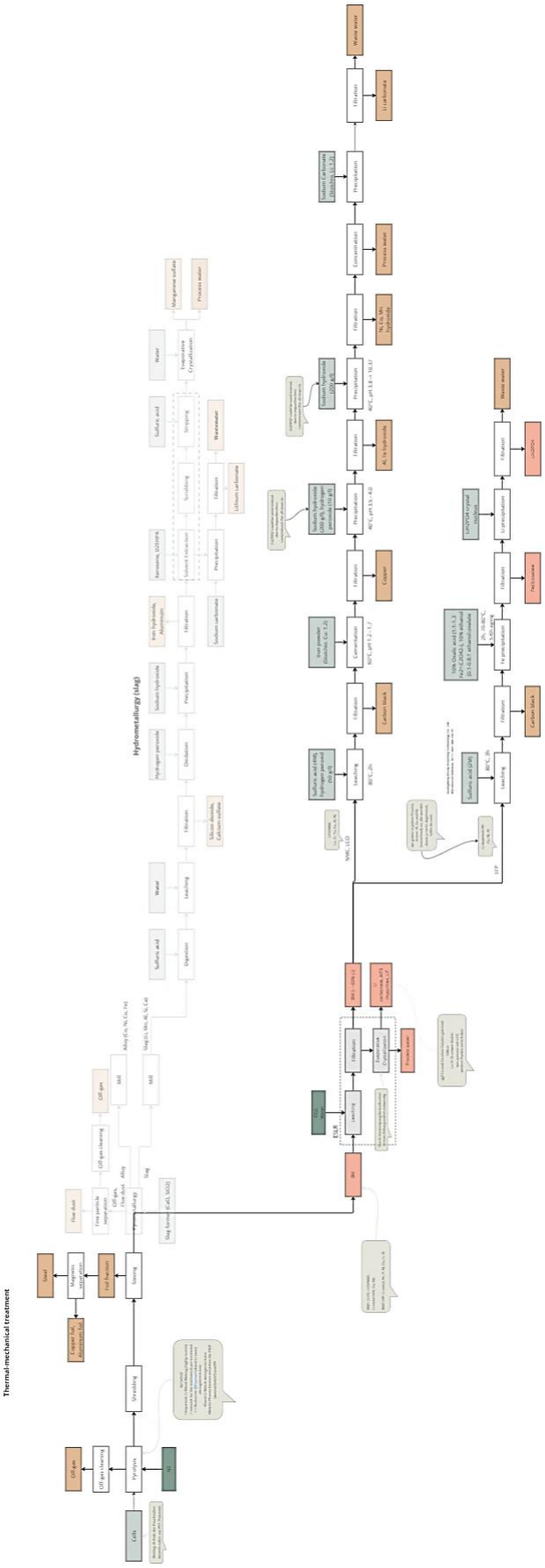

Abbildung 5: Route 2: Recycling mit thermischer Vorbehandlung

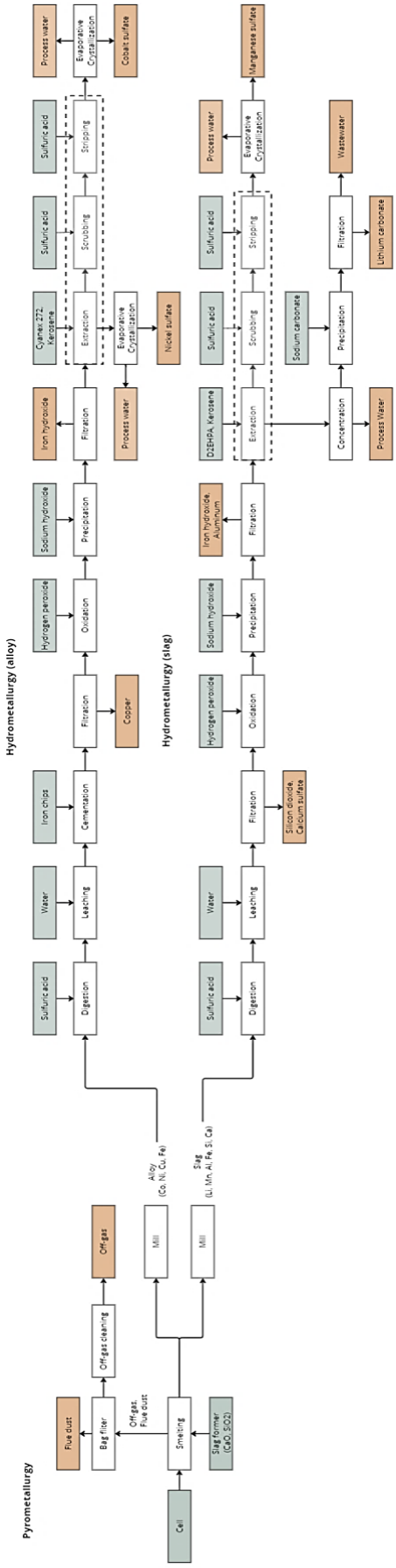

Abbildung 6: Route 3: Pyrometallurgische Prozesskette

Um die jeweils nötigen Anpassungen und Festelektrolyt-spezifischen Unterschiede innerhalb der Referenzprozessketten zu definieren und festzuhalten wurden regelmäßige Workshops im Konsortium und mit entsprechenden Experten innerhalb der beteiligten Institute durchgeführt.

Um darüber hinaus weiteres Expertenwissen in die Prozesskettenbewertung und die Ableitung von relevanten Handlungsempfehlungen einfließen zu lassen wurde ein Präsenzworkshop während des FestBatt 2 Clustertreffens im November 2023 in Frankfurt organisiert und erfolgreich durchgeführt. Hierbei wurden zusätzliche Experten im Bereich der drei Materialklassen von Festelektrolyten eingeladen und konnten ihr Wissen und ihre Erfahrungen abgefragt, sodass weitere wertvolle Aspekte, wie z.B. zu erwartende Verbindungen gegen Ende des Zelllebenszyklus oder sinnvolle Recyclingprodukte als Eingangsstoffe für zukünftige Resynthesen berücksichtigt werden konnten. Hierdurch konnten beispielsweise zunächst angenommene Prozessschritte für das Recycling sulfidischer Festkörperbatterien, wie das direkte Recycling des Sulfids durch eine Lösemittelroute auf Basis von Ethanol teils differenzierter bewertet werden, sodass für die abschließende Erstellung von Prozessketten für das Recycling von Festkörperbatterien neue alternative Subrouten, wie beispielsweise thermische Vorbehandlungen entgegen der vorherigen Annahme wieder aufgenommen wurden.

Abbildung 7 – Durchführung des S²taR x FestBatt Workshops zum Recycling von Festkörperbatterien beim FB2-Clustertreffen in Frankfurt
(Fotos: Svenja Weber, Fraunhofer IST, November 2023)

2.) Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Die Fraunhofer-Gesellschaft verwertet als gemeinnützige Forschungseinrichtung und in Übereinstimmung mit den Satzungszwecken (Auftragsforschung, Technologietransfer) ihre Ergebnisse nicht durch eigene Produktion oder eigenen Vertrieb. Projektergebnisse des Instituts dienen als Grundlage für weitere Projekte und werden im Übrigen durch Lizenzvergabe an Dritte genutzt und verwertet. Die in diesem Projekt erarbeiteten Ergebnisse stellen für das Institut einen wichtigen Zwischenschritt auf dem Weg von grundlagenorientierten Arbeiten zur konkreten Umsetzung in die Praxis (Technologietransfer) dar. Die Ergebnisse bilden die Basis für weitere Aufträge aus der Wirtschaft und damit zur konkreten Umsetzung in neue Produkte oder Verfahren.

- Aufbau von Wissen und Vorerfahrungen zum Recycling von Festkörperbatterien, welche an Akteure in diesem Technologiefeld transferiert werden können (sofort nach Projektende)
- Realisierung eines ökonomisch und ökologisch konkurrenzfähigen Recyclings von Batteriezellmaterialien (innerhalb der nächsten 5 bis 10 Jahre)
- Nationale Versorgungs- und Rohstoffsicherung durch Recycling und Rückführung von Batteriezellmaterialien (> 10 Jahre)
- Minimierung des Wettbewerbsrisikos nationaler Batterieindustrie durch Diversifizierung der Lieferketten (innerhalb der nächsten 5 bis 7 Jahre)
- Reduzierung der Abhängigkeit von bodenschatzreichen Staaten, Handelspolitik, Krisen etc. (> 10 Jahre)
    - Zunehmende Unabhängigkeit von Preisschwankungen auf dem globalen Markt
    - Steigerung der Lieferkettennachhaltigkeit
- Stärkung nachhaltiger Closed-Loop-Batteriezellfertigung in Deutschland (< 5 Jahre)
- Überführung der in den Projekten entwickelten Verfahren, Prozessen, Modellen und Methoden in die industrielle Anwendung (Anlagenbauer, Materialhersteller etc.) mittels bilateraler Projekte zum direkten Ergebnistransfer (Dienstleistungsprojekte, Auftragsforschung, Lizenzierung von Patenten) (innerhalb der nächsten 1-5 Jahre)
- Überführung der Erkenntnisse im Bereich der ressourceneffizienten Recyclingprozesse in die Forschungsfertigung Batteriezelle – z. B. Auslegung und Betriebsstrategien von Recyclingprozessketten und Einzelprozessen (innerhalb der nächsten 3 - 5 Jahre)

Zentrales Ziel ist die Zusammenarbeit mit den Unternehmensnetzwerken der deutschen Industrie entlang der Wertschöpfungskette voranzutreiben und zu nutzen, um im Bereich der Materialherstellung, Maschinen- und Anlagenhersteller und der KMUs und OEMs der Batteriezellfertigung und -nutzung breites Wissen aufzubauen und einen Beitrag zur Stärkung der deutschen Industrie zu leisten und langfristig die international führende Rolle der deutschen Industrie zu stärken.

2. Während der Laufzeit bekannt gewordene, relevante Ergebnisse Dritter

In der Projektlaufzeit sind keine Ergebnisse Dritter mit Relevanz für die Durchführung des Vorhabens bekannt geworden.

3. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts wurde 2024 ein Abschlussvideo mit einer Übersicht, der durchgeführten Arbeiten, insbesondere des Zellbaus am Fraunhofer IST, erstellt. Es kann über die Internetpräsenz des greenBatt Clusters abgerufen werden. Das Video wurde durch das Fraunhofer IST erstellt und geschnitten.

S2taR - greenBatt - Recyclingprozesse für Feststoffbatterien (greenbatt-cluster.de)

(https://www.greenbatt-cluster.de/de/projekte/s2tar/)

Übersicht der wissenschaftlichen Publikationen auf nachfolgender Seite:

Fachartikel

Lfd. Nr.	Autoren	Titel	Journal, Volume, Issue, Page	DOI	Datum
1	Kononova, N., Blömeke, S., Cerdas, F., Zellmer, S., Herrmann, C.	Identification of target materials for recycling of solid-state batteries from environmental and economic perspective using information theory entropy	Procedia CIRP,116, pp. 185–190	https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.032	2023
2	Ahuis, M., Doose, S., Vogt, D., Zellmer, S. et al.	Recycling of solid-state batteries	Nature Energy 9, 373–385	https://doi.org/10.1038/s41560-024-01463-4	15.03.2024

Konferenzbeitrag

Lfd. Nr.	Autoren	Titel	Typ (Poster, Präsentation)	Konferenz/Tagung	Datum
1	Michael Grube (IST), Vivien Kiyek (FZJ), Marco Ahuis (iPAT), Emanuel Drude (IME), Nelli Kononova (IWF), Kirstin Schneider (IFAD)	Development of All-Solid-State Battery Recycling Processes – S2taR	Präsentation	FestBatt Clustermeeting	24.11.2023

Fraunhofer IST

Erfolgskontrollbericht

1. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens

Das übergeordnete Ziel des Projekts S²taR war die Untersuchung und Bewertung der Recyclingfähigkeit von Festkörperbatteriekonzepte der drei Materialklassen von Festelektrolyten, der Oxide, Sulfide und Polymere. Ziel war es dies bereits während der Technologieentwicklung zu evaluieren, um eine Rückkopplung mit der Zellentwicklung zu ermöglichen (bspw. durch den Austausch mit dem FestBatt Cluster). Hierbei wurden insbesondere die Nutzung von etablierten Recyclingtechnologien - der mechanischen, thermischen und hydrometallurgischen Aufbereitung - und der Einsatz der zurückgewonnenen Materialien im Sinne der Kreislaufwirtschaft evaluiert und Handlungsempfehlungen ausgesprochen. Die wichtigsten Ergebnisse und Handlungsempfehlungen bezogen auf das Recycling von ASSB der jeweiligen Materialklassen sind in der folgenden Übersicht vereinfacht und der Veröffentlichung umfassend zusammengefasst (*Ahuis, M., Doose, S., Vogt, D., Michalowski, P., Zellmer, S., Kwade, A. Recycling of solid-state batteries. Nat Energy 9, 373–385 (2024). https://doi.org/10.1038/s41560-024-01463-4)*.

Oxide (ASSB mit oxidbasierten Festelektrolyten)

- Gute Trennbarkeit der Komponenten durch mechanische Behandlung
- Resynthese des Elektrolyten potentiell möglich
- Potential zur Rückgewinnung der Li-Metall-Anode
- Potential für direktes Recycling (Elektrolyt und CAM)
- Spröder/harter Elektrolyt kann Verschleiß erhöhen

Sulfide (ASSB mit sulfidbasierten Festelektrolyten)

- Derzeit hoher Wertverlust bei Aufschluss/Deaktivierung des Sulfids
- Anpassung der Sicherheitskonzepte aufgrund der H_2S-Bildung nötig (Schutzatmosphäre)
- Potential für direktes Recycling (Elektrolyt und CAM)
- Nutzung von H_2S für die Resynthese von Vorstufen der Sulfidproduktion oder zur Bildung von schwefelbasierten Säuren für die Hydrometallurgie

Polymere (ASSB mit polymerbasierten Festelektrolyten)

- Potential zur Rückgewinnung der Li-Metall-Anode
- Entfernung des Polymers durch thermische Behandlung möglich (bessere Trennung)
- Adhäsive Polymere verhindern Trennbarkeit in der mechanischen Behandlung
- Recycling muss eine Vielzahl an Polymeren berücksichtigen → Notwendigkeit für robuste Prozesse

Übergreifende Erkenntnisse

- Zukünftig weitere Anodenkonzepte möglich, insbesondere siliziumbasierte Systeme
- Li-Metall als Anode wird voraussichtlich in deutlich reduzierter Schichtdicke umgesetzt
- Berücksichtigung von neuen Materialklassen / Elektrolyten und deren Produktionsprozessen hinsichtlich einer Kreislaufführung
- Experimentelle Untersuchung von skalierten Festkörperbatterien sowie End-of-Life-Zellen zur Evaluierung der Wertschöpfung

Abbildung 1 gibt eine Übersicht über die theorie- und experimentbasiert entwickelten Prozessketten zum Recycling von Festkörperbatterien der drei derzeit relevantesten Materialklassen von Festelektrolyten.

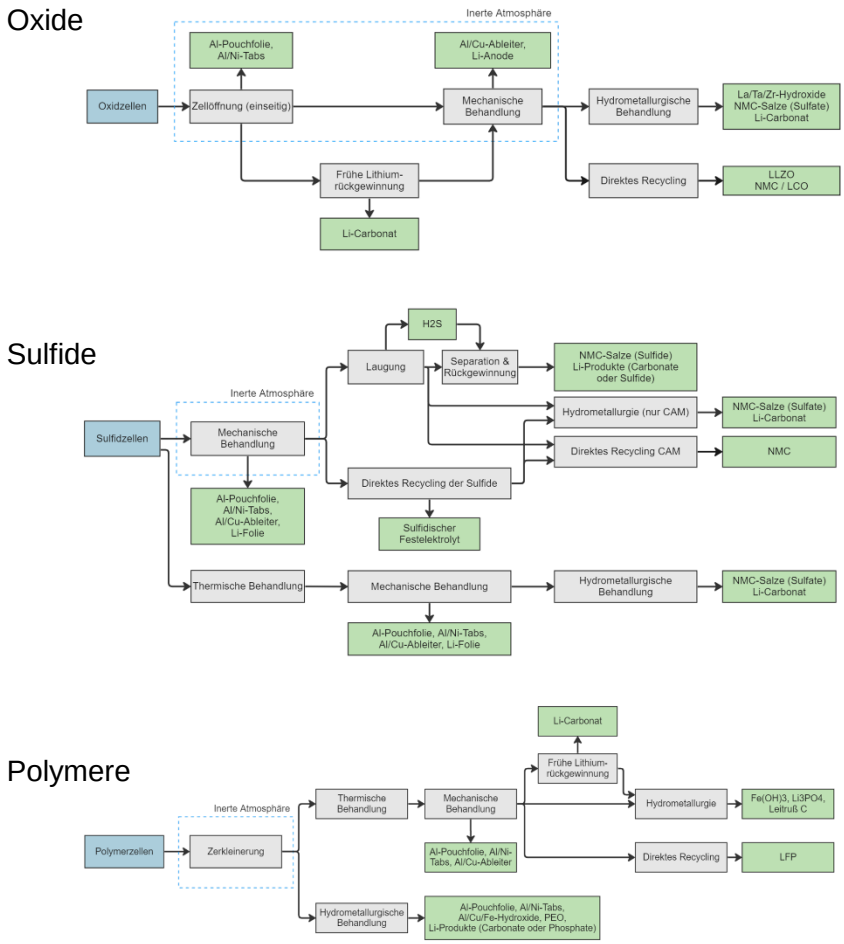

Abbildung 1: Im Projekt S²taR entwickelte Konzepte für Prozessketten zum Recycling von ASSB der drei relevanten Elektrolytmaterialklassen

Festkörperbatterien lassen sich potentiell auch mit den bestehenden Recyclingprozessen verarbeiten, müssen jedoch an die jeweiligen Eingangsstoffströme mit entsprechend variablen Elektrolyten durch weitere Anpassungen an die Prozessbedingungen, -parameter und den Aufbau der Prozesskette weiterentwickelt werden. Insbesondere mechanische und sicherheitstechnische Änderungen für Oxide, Sulfide und Lithium-Metall-Anoden sind hier zu berücksichtigen. Die zukünftigen Recyclingprozessketten sollten mit steigender technologischer

Komplexität und Diversität von Energiespeichern entweder robuster oder flexibler bzw. modularer ausgelegt werden, da voraussichtlich weitere neue Materialien mit sehr unterschiedlichen Anforderungen (größere Härte, hohe Reaktivität, hohe adhäsive Bindung der Elektroden etc.) in die Recyclingströme gebracht werden.

2. Fortschreibung des Verwertungsplans:

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom Zuwendungsempfänger oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten

Im Projekt S^2taR sind seitens des Fraunhofer IST keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen in Anspruch genommen worden.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit <u>Zeithorizont</u>) – z. B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen / -industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien

Die Fraunhofer-Gesellschaft verwertet als gemeinnützige Forschungseinrichtung und in Übereinstimmung mit den Satzungszwecken (Auftragsforschung, Technologietransfer) ihre Ergebnisse nicht durch eigene Produktion oder eigenen Vertrieb. Projektergebnisse des Instituts dienen als Grundlage für weitere Projekte und werden im Übrigen durch Lizenzvergabe an Dritte genutzt und verwertet. Die in diesem Projekt erarbeiteten Ergebnisse stellen für das Institut einen wichtigen Zwischenschritt auf dem Weg von grundlagenorientierten Arbeiten zur konkreten Umsetzung in die Praxis (Technologietransfer) dar. Die Ergebnisse bilden die Basis für weitere Aufträge aus der Wirtschaft und damit zur konkreten Umsetzung in neue Produkte oder Verfahren.

- Aufbau von Wissen und Vorerfahrungen zum Recycling von Festkörperbatterien, welche an Akteure in diesem Technologiefeld transferiert werden können (sofort nach Projektende)
- Realisierung eines ökonomisch und ökologisch konkurrenzfähigen Recyclings von Batteriezellmaterialien (innerhalb der nächsten 5 bis 10 Jahre)
- Nationale Versorgungs- und Rohstoffsicherung durch Recycling und Rückführung von Batteriezellmaterialien (> 10 Jahre)
- Minimierung des Wettbewerbsrisikos nationaler Batterieindustrie durch Diversifizierung der Lieferketten (innerhalb der nächsten 5 bis 7 Jahre)
- Reduzierung der Abhängigkeit von bodenschatzreichen Staaten, Handelspolitik, Krisen etc. (> 10 Jahre)
    - Zunehmende Unabhängigkeit von Preisschwankungen auf dem globalen Markt
    - Steigerung der Lieferkettennachhaltigkeit
- Stärkung nachhaltiger Closed-Loop-Batteriezellfertigung in Deutschland (< 5 Jahre)

- Überführung der in den Projekten entwickelten Verfahren, Prozessen, Modellen und Methoden in die industrielle Anwendung (Anlagenbauer, Materialhersteller etc.) mittels bilateraler Projekte zum direkten Ergebnistransfer (Dienstleistungsprojekte, Auftragsforschung, Lizenzierung von Patenten) (innerhalb der nächsten 1-5 Jahre)
- Überführung der Erkenntnisse im Bereich der ressourceneffizienten Recyclingprozesse in die Forschungsfertigung Batteriezelle – z. B. Auslegung und Betriebsstrategien von Recyclingprozessketten und Einzelprozessen (innerhalb der nächsten 3 - 5 Jahre)

Zentrales Ziel ist die Zusammenarbeit mit den Unternehmensnetzwerken der deutschen Industrie entlang der Wertschöpfungskette voranzutreiben und zu nutzen, um im Bereich der Materialherstellung, Maschinen- und Anlagenhersteller und der KMUs und OEMs der Batteriezellfertigung und -nutzung breites Wissen aufzubauen und einen Beitrag zur Stärkung der deutschen Industrie zu leisten und langfristig die international führende Rolle der deutschen Industrie zu stärken.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) – u. a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z. B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen etc. darzustellen

Auf der wissenschaftlich-technischen Ebene werden dem Projekt S^2taR nach Projektabschluss sehr hohe Erfolgsaussichten durch den erfolgten Zugewinn an zukünftig hochrelevantem Wissen zugerechnet. Durch die Betrachtung von Verwertungsrouten und Recyclingtechnologien für die aussichtsreiche ASSB-Technologie als Nachfolger der konventionellen LIB wurde nach aktuellem Stand ein einzigartiger systematischer Wissensvorsprung erreicht, der dem Standort Deutschland eine Vorreiterschaft in den Bereichen nachhaltige Energiespeicher und Kreislaufwirtschaft sichern kann (innerhalb der nächsten 5 bis 10 Jahre). Gleichzeitig können durch die parallele Erforschung der ASSB-Technologie und deren Recycling, Entwicklungszeiten für Verwertungskreisläufe noch vor dem Markteintritt stark verkürzt werden. Das Projekt S^2taR verfolgte dabei wissenschaftliche und technische Trends für Recyclingtechnologien noch von der industriellen Umsetzung der Ausgangstechnologie. Insbesondere die im Teilprojekt adressierten Sulfide sind aktuell eine der aussichtsreichsten Materialklassen für Festkörperbatterien. Durch die Bewertung der Recyclingfähigkeit der betrachteten Batteriekonzepte konnten bereits während der Projektlaufzeit (und innerhalb der nächsten 1-3 Jahre) entscheidende Impulse für die Entwicklung von recyclinggerechten (u.a. sulfidbasierten) Festkörperbatterien gegeben werden (Austausch mit FestBatt). Durch den intensiven Austausch innerhalb des Kompetenzclusters GreenBatt sowie mit dem FestBatt-Cluster, dem BMBF-Beirat „Batterieforschung Deutschland“ und der Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB) ergeben sich ideale Voraussetzungen die relevanten Ergebnisse des Projekts innerhalb der Forschungscommunity konstruktiv zu diskutieren und weiterzuentwickeln sowie innerhalb der nächsten 2-3 Jahre umzusetzen. Durch den regelmäßigen Kontakt zum beteiligten Managementkreis konnten auch die Fragestellungen und Hinweise aus der Industrie wissenschaftlich und technisch frühzeitig ausgetauscht und adressiert werden (kontinuierlich über der Projektlaufzeit). Die daraus resultierenden Projekte und bilateralen Zusammenarbeiten können die Umsetzung

kurz- bis mittelfristig weiter vorantreiben und werden durch die interdisziplinäre Zusammensetzung und damit das Netzwerk in unterschiedliche industrielle Bereiche schneller umzusetzen sein.

d) Tabellarische Zusammenfassung von a-c

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Zeithorizont
1	Aufbau von Wissen und Vorerfahrungen zum Recycling von Festkörperbatterien, welche an Akteure in diesem Technologiefeld transferiert werden können	sofort nach Projektende
2	Publikation von relevanten Projektergebnissen	Während der Projektlaufzeit
3	Realisierung eines ökonomisch und ökologisch konkurrenzfähigen Recyclings von Batteriezellmaterialien	innerhalb der nächsten 5 bis 10 Jahre
4	Nationale Versorgungs- und Rohstoffsicherung durch Recycling und Rückführung von Batteriezellmaterialien	> 10 Jahre
5	Minimierung des Wettbewerbsrisikos nationaler Batterieindustrie durch Diversifizierung der Lieferketten	innerhalb der nächsten 5 bis 7 Jahre
6	Reduzierung der Abhängigkeit von bodenschatzreichen Staaten, Handelspolitik, Krisen etc.	> 10 Jahre
7	Stärkung nachhaltiger Closed-Loop-Batteriezellfertigung in Deutschland	< 5 Jahre
8	Überführung der in den Projekten entwickelten Verfahren, Prozessen, Modellen und Methoden in die industrielle Anwendung (Anlagenbauer, Materialhersteller etc.) mittels bilateraler Projekte zum direkten Ergebnistransfer (Dienstleistungsprojekte, Auftragsforschung, Lizenzierung von Patenten)	innerhalb der nächsten 1 bis 5 Jahre
9	Überführung der Erkenntnisse im Bereich der ressourceneffizienten Recyclingprozesse in die Forschungsfertigung Batteriezelle – z. B. Auslegung und Betriebsstrategien von Recyclingprozessketten und Einzelprozessen	innerhalb der nächsten 3 bis 5 Jahre
10	Relevante Ergebnisse des Projekts innerhalb der Forschungscommunity konstruktiv diskutieren, weiterzuentwickeln und umzusetzen	innerhalb der nächsten 1 bis 3 Jahre

3. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Das IST wird die Projektinhalte und die erzielten Ergebnisse in allgemeingültige Erkenntnisse überführen und eine Verbreitung über Lehre, Forschung und in Industrienetzwerke vornehmen. Aufgrund der engen Kooperation des IST mit der Battery LabFactory Braunschweig (BLB) und der Forschungsarbeiten mit anderen Fraunhofer Instituten unter dem Dach des Zentrums für Energiespeicher und Systeme (ZESS) können bisher fokussierte Prozesse zur Herstellung von Festkörperbatterien durch S^2taR um innovative Recyclingverfahren ergänzt und Materialkreisläufe geschlossen werden. Zugleich kann aufgrund der formulierten Handlungsempfehlungen hinsichtlich recyclinggerechter Festkörperbatterien zu einem sehr frühen Zeitpunkt die Entwicklung innovativer Energiespeicherkonzepte unterstützt werden. Durch kontinuierliche Veröffentlichung und Präsentation neuer Forschungsergebnisse wird aber

auch andere Forschungseinrichtungen außerhalb des Konsortiums sowie Unternehmen in die Lage versetzen, Technologien und Effizienzpotentiale im Recycling von Festkörperbatterien zu identifizieren. Die Erfolgschancen für Anschlussprojekte, z. B. im Rahmen der Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB), werden aufgrund der besonderen Wichtigkeit realisierbarer Effizienz- und Qualitätssteigerungen für das Batterierecycling am Standort Deutschland sowie den großen Neuheitswert der Arbeiten im Projekt als sehr hoch angesehen. Es wird angestrebt, das übergeordnete Gesamtziel über das Projekt hinaus durch die Zusammenarbeit mit Industrie und Wissenschaft in weiteren Projekten voranzutreiben.

4. Angaben zu Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Im Projekt S^2taR können alle Arbeiten im Sinne des Projektplans als erfolgreich bewertet werden. Da S^2taR als offenes exploratives Projekt mit großem Neuheitswert geplant war, welches Recyclingkonzepte für ASSB erstmalig und ergebnisoffen auf breiter technologischer Basis untersuchen sollte, um daraus Handlungsempfehlungen für zukünftige Arbeiten abzuleiten und somit neues Wissen zu generieren, gab es im Verlauf des Projekts keine verfolgten Arbeiten, die nicht zu einer Lösung im Sinne des Wissensgewinns beitragen haben.

5. Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und der Zeitplanung

Im Hinblick auf die Zeitplanung erfolgte eine kostenneutrale Verlängerung bis zum 31.03.2024. Im Rahmen des Projekts S2taR erfolgte keine Mittelumwidmung. Zum Ende des Projekts ergab sich ein Mehrbedarf von 4.815,84 €, welcher aus Eigenmitteln getragen wurde.