



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 (Q1/2025)

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 Technologien und Systeme IKTS

Am St.-Niclas-Schacht 13 | 09599 Freiberg

Ansprechpartner: Dr. Christian Kensy

Tel.: +49 (0) 3731 2033-158

E-Mail: christian.kensy@ikts.fraunhofer.de

Disclaimer

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten TraWeBa-Projektes wird das Thema Wissensscouting durch die vier involvierten Fraunhofer-Partner (FFB, IKTS, IPT, ISI) bearbeitet.

Dabei wurden in den letzten zwei Projektjahren regelmäßig Einblicke in neue wissenschaftliche Trends für die Technologiebereiche Batteriechemie, Batterieproduktion und Batterierecycling in Form von Quartalsberichten bzw. *Summary Briefings* zusammengestellt. Im Fokus standen insbesondere aktuelle Forschungsinhalte und -ergebnisse aus Deutschland, wobei aber auch internationale relevante Entwicklungen gezielt aufgegriffen wurden. Darüber hinaus wurden erste Einschätzungen nach den Bewertungskriterien Potenziale & Herausforderungen erarbeitet, die als Anregung für weitere Diskussionen dienen. Neben den Forschungsinhalten wurde ebenfalls ein quantitatives Scouting für jeden Technologiebereich innerhalb einer Publikations- und Patentanalyse durchgeführt, um die deutschen Aktivitäten im internationalen Vergleich einzuordnen.

Allerdings wurden auch Einflüsse von aktuellen politischen und wirtschaftlichen Entwicklungen auf die FuE-Landschaft, beispielsweise die Auswirkungen des gesperrten Klima- und Transformationsfonds (KTF), bearbeitet und mögliche Zukunftsszenarien für das Batterieökosystem kontrovers diskutiert. Weithin wurden für ausgewählte Innovationen die aktuelle Marktsituation erörtert und versucht die zukünftige Wirtschaftslage für die betreffenden Technologien abzuschätzen.

Mit dem nachfolgenden Quartalsbericht möchten wir Ihnen eine Zusammenfassung der vorgestellten Themen in den *Summary Briefings* vorstellen, und zeichnen aktuelle Themen und spannende Innovationen für die Batterie-Wertschöpfungskette auf.

Inhalt

Disclaimer	3
Highlights aus der Wissenschaft und Forschung	5
Summary Briefing des TraWeBa-Projekts (Q1/2025)	5
Batteriechemie	5
<i>Rückblick auf die vorgestellten Innovationen und aktuelle Einordnung der Themen</i>	5
<i>Zusammenfassung für den Technologiebereich Batteriechemie</i>	7
Batterieproduktion & Digitalisierung	8
<i>Die Insolvenz des europäischen Batteriezell-herstellers Northvolt</i>	8
<i>Whitepaper: Mastering Ramp-Up of Battery Production</i>	9
<i>Rückschlüsse zu vorgestellten Summary Briefings</i>	10
<i>Zusammenfassung für den Technologiebereich Batterieproduktion & Digitalisierung</i>	12
Batterierecycling	12
<i>Entwicklungen im Themengebiet</i>	12
<i>Trends und „Hot-Topics“</i>	13
<i>Zusammenfassung für den Technologiebereich Batterierecycling</i>	15
Literatur	16

Highlights aus der Wissenschaft und Forschung

Summary Briefing des TraWeBa-Projekts (Q1/2025)

Batteriechemie

Für den Technologiebereich der Batteriechemie wurden und werden aufgrund der Komplexität möglicher Zellchemien (z. B. Li-Ionen- oder Na-Ionen-basiert) bzw. der Weiterentwicklungsdiversität der wesentlichen Bestandteile einer Batterie (Kathode, Anode, Separator und Elektrolyt) eine Vielzahl an Publikationen veröffentlicht, weswegen in den präsentierten Quartalsberichten lediglich ein kleiner Einblick in ausgewählte Innovationen gegeben werden konnte.

Rückblick auf die vorgestellten Innovationen und aktuelle Einordnung der Themen

Im Bereich der Batteriechemie gab es in den letzten 2 Jahren unterschiedliche (Weiter-)Entwicklungen in der deutschen Forschungslandschaft, die sowohl von der Politik als auch von der Wirtschaft beeinflusst wurden.

Zum einen starteten Anfang 2023 unter dem BMBF Dachkonzept Batterieforschung die Initiativen zum Ausbau von Forschungsverbänden im Bereich der Batteriematerialien und -technologien (*Batterie 2020 Transfer*) sowie die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses (*BattFutur*), woraus sich viele neue Möglichkeiten für die Materialentwicklung im Batteriebereich ergaben. [1] Zum anderen sorgte der Beschluss des Bundesverfassungsgerichtes über die Sperrung des KTF im November 2023 für großen Unmut in der deutschen Batterieforschungsszene sowie -industrie. Die Fördermittelkürzung hätte nicht nur kurzfristige Folgen wie die starke Einschränkung neuer Forschungsvorhaben oder die Verschärfung des Fachkräftemangels, sondern langfristig wird die

(Weiter-)Entwicklung eines wettbewerbsfähigen, technologisch souveränen deutschen Batterie-ökosystems nahezu stillgestellt. [2] Daraufhin konnte mit Hilfe eines Brandbriefes des Kompetenznetzwerks Lithium-Ionen-Batterien e.V. (KLiB) als Aufschrift und mit einer Vielzahl von Medienberichten folgend der harte Einschnitt abgefedert werden, indem eine Nachjustierung des Fördermittelvolumens verabschiedet und somit bestehende Projekte fortgeführt wurden. Dennoch endeten einige Projekte der Kompetenzcluster der Batterieforschung wie *ProZell* [3] oder *FestBatt* [4] zwischen 2023 und 2024, weshalb die deutsche Forschungslandschaft auf ein positives Zeichen seitens des neu gewählten Bundestages bezüglich der weiteren Förderung der Batterieforschung wartet. Einen ersten Lichtblick hierzu gab die alte Regierung kurz vor den Neuwahlen Anfang dieses Jahres mit der Bereitstellung einer Überbrückungsfinanzierung über 25 Mio. €. [5]

Neben der Förderungsdebatte für die deutsche Batterieforschung gab es ein weiteres Diskussionsthema mit der Beschränkung von per- und polyfluorierten Alkyl-Chemikalien (PFA), die – CF₂/–CF₃-Gruppen, in der EU Chemikalienverordnung REACH. Diese Einschränkung hätte erhebliche Auswirkungen auf die Batterieforschung, -industrie und letztendlich auf das gesamte Batterieökosystem. [2] Im September 2024 hat die EU-Kommission unter diesem Gesichtspunkt die Verwendung von Unecafluorhexansäure („PFHxA“) und PFHxA-verbunden Stoffen, welche eine Untergruppe von PFA-Chemikalien ist, eingeschränkt. Somit läuft, je nach Verwendungszeit, eine Übergangsfrist von 18 Monaten bis 5 Jahren, um sicherere Alternativen zu finden. [6]

Unter diesem Gesichtspunkt hat die Arbeitsgruppe von Passerini et al. eine Studie zu PFA-freien ionischen Flüssigelektrolyten für Lithium- und Aluminium-Metall-Batterien veröffentlicht. Hierfür werden aromatische organische Kationen mit aromatischen weniger fluorierten bzw. nicht fluorierte Co-Lösungsmittel vorgeschlagen. Es werden die Wechselwirkungen zwischen den Ionen und die Auswirkung der nicht an den Li⁺-Ionen-Koordination beteiligten Co-Lösungsmitteln während der elektrochemischen Anwendung, v. a. für die SEI-Bildung, untersucht. Darüber hinaus wird die Kathodenkompatibilität für LiFePO₄, nickelreiches NCM-Material, sulfuriertes Polyacrylnitril (SPAN) für Hochenergie-Lithium-Metall-Batterien sowie eine mögliche Anwendung in Aluminium-Metall-Batterien demonstriert. [7]

Innerhalb der letzten Quartalsberichte wurden verschiedene Innovationen zum Thema Lithium-Ionen-Batterie (s. Abbildung 1) vorgestellt. Hierbei fiel auf, dass ein Schwerpunkt weiterhin auf der Weiterentwicklung von Festkörperbatterien liegt. Dieser Trend wurde auch in der Publikations- und Patentanalyse im Summary Briefing Q2/2024 festgestellt. Hier wurde gezeigt, dass sich die Veröffentlichungsanzahl mit dem Forschungsthema der Festkörperbatterie von 2010 bis 2023 um den Faktor 3,3 erhöht hatte. [8]

Vielmehr ist die Entwicklungsphase der Festkörpertechnologie so weit fortgeschritten, dass

der Industrietransfer, sogar im *Automotive*-Bereich, eingeleitet wurde. Der chinesische Automobilhersteller BYD plant ab 2027 eine Pilotphase, um Festkörperbatterien in ihre Fahrzeuge einzusetzen. Hierbei wird die Produktion mit sulfidbasierten Elektrolyten aus Kosten- und Prozessstabilitätsgründen bevorzugt. Eine Ausweitung auf den Massenmarkt ist ab 2030 angekündigt. [9] Weiterhin hat der japanische Mineralölkonzern Idemitsu Kosan den Bau einer Produktionsanlage für Lithiumsulfid in Chiba bei Tokio bekannt gegeben, um die Pläne von Toyota - die Einführung von Elektrofahrzeugen mit Festkörperbatterien bis 2027-2028 - zu unterstützen. Es sollen ab Juni 2027 ca. 1.000 t Li₂S produziert werden, was ein Vorprodukt für die sulfidische Festelektrolytherstellung ist. [10]

Darüber hinaus wurden auch Kombinationen aus verschiedenen Forschungsthemen aufgegriffen wie die Weiterentwicklung von alternativen Anodenmaterialien (z. B. Konversions-/Legierungsmetalle) oder Cobalt-freien Kathodenaktivmaterialien und deren Anwendung in Festkörperzellen. [11]

Ein aktuelles Beispiel hat hierzu auch das *Advanced Battery Technology Center* (ATBC) des Fraunhofer IWS publiziert, wobei dünne und flexible sulfidische Festelektrolytmembrane mit Hilfe eines skalierbaren, lösungsmittelfreien und kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Verfahren (DRYtraec) hergestellt und in Festkörper-Pouchzellen elektrochemisch charakterisiert werden. Bezogen auf den Zellstapel werden



Abbildung 1: Keywords bzw. Themenfelder aus den Quartalsberichten der letzten 2 Jahre im Technologiebereich Batteriechemie.

vielversprechende Energiedichten von 673 Wh L^{-1} (spezifische Energie von 247 Wh kg^{-1}) erreicht. [12]

Außerdem wurden auch Einblicke in die Entwicklungen der Post-Lithium-Ionen-Batterien und weiteren alternativen Batteriesystemen gegeben. Eines der interessantesten Forschungsthemen dreht sich rund um die Natrium-Ionen-Batterie (NIB), was u. a. auch Gegenstand der Förderlinie *Batterie 2020 Transfer* ist. Hier wird beispielsweise im Projekt "PCEforNB - Polymer Keramik Elektrolyte für Mitteltemperatur Natrium-Batterien" die Entwicklung von Keramik-Polymer-Verbundelektrolyte erforscht. [13]

Die Natrium-Ionen-Technologie wurde bereits erfolgreich in die Industrie transferiert, sodass diese Batterien kommerziell erhältlich sind. Interessante Einblicke geben hierzu eine Kooperation bestehend aus der Universität Ulm (UULM), des Helmholtz-Instituts Ulm (HIU), Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) und Karlsruhe-Instituts für Technologie (KIT), die das Zelldesign, die chemische Elektroden- sowie Elektrolytzusammensetzung einer kommerziell erhältlichen zylindrischen Natrium-Ionen-Batterie-zelle vom Typ 18650 (Nennkapazität 1,5 Ah) umfassend untersucht haben. Weiterhin werden die Leistung der einzelnen Elektroden sowie der Gesamtzelle sowohl unter Standard- als auch unter extremeren Bedingungen analysiert. Somit konnte eine Bewertung der wichtigsten Eigenschaften der Zellkomponenten von der Makro- bis zur Mikroskala vorgenommen werden. [14]

Die Kommerzialisierung der Natrium-Ionen-Technologie ist schon so weit fortgeschritten, dass Anfang 2024 in China die ersten Elektroautos (JAC Yiwei EV & Jiangling Motors EV) mit Natrium-Ionen-Batterien vom Band rollten. [15] Vielmehr kündigte CATL kürzlich die zweite Generation ihrer Natrium-Ionen-Batterie an, welche dieses Jahr noch auf den Markt kommen und voraussichtlich 2027 in Serie produziert werden soll. Diese neue NIB-Zelle soll temperaturbeständiger (Entladung bis $-40 \text{ }^\circ\text{C}$) sein

sowie und bessere Sicherheitsmerkmale aufweisen. [16]

Neben der Substitution des Lithiums durch Natrium werden auch weitere potenzielle (Erd-)Alkalimetalle zur Entwicklung der Post-Lithium-Batterietechnologie erforscht. Ein mögliches Element ist Calcium. In diesem Zusammenhang hat die Arbeitsgruppe von Fichtner et al. bei einem Review mit dem Titel „*Calcium Chemistry as A New Member of Post-Lithium Battery Family: What Can We Learn from Sodium and Magnesium Systems*“ mitgewirkt, worin aktuelle Entwicklungen von wiederaufladbaren Calcium-Ionen-Batterien präsentiert werden. Es werden die Gemeinsamkeiten, aber auch die Unterschiede der Ca-Chemie gegenüber den anderen Post-Lithium-Technologien, v. a. der Na- sowie Mg-Chemie aufgrund der ähnlichen chemischen Eigenschaften, diskutiert. [17]

Zusammenfassung für den Technologiebereich Batteriechemie

Es lässt sich zusammenfassen, dass mit Hilfe der Summary Briefings aktuelle, interessante und innovative Entwicklungen für den Technologiebereich Batteriechemie zusammengetragen und somit Einblicke in die deutsche Forschungslandschaft rund um das Thema Batterie ermöglicht wurden. Vielmehr wurden anhand der präsentierten Einschätzungen (Potenziale & Herausforderungen) erste Denkanstöße für weitere Diskussion geliefert, um den aktuellen Status einer Innovation in die aktuelle Marktsituation besser einordnen und teilweise einen Ausblick geben zu können.

Darüber hinaus wurde gezeigt, dass Deutschland weiterhin eine zentrale Rolle in der Batterie-forschung und Technologieentwicklung spielt, was aber ohne anhaltende Förderung seitens Politik und Wirtschaft nicht realisierbar ist. Nur so können bestehende Batteriesysteme in der Leistung, Kosteneffizienz und Umweltverträglichkeit weiterentwickelt bzw. neue alternative Batterie-technologien erforscht werden.

Batterieproduktion & Digitalisierung

In Anbetracht aktueller Entwicklungen werden im Folgendem die Herausforderungen der Batteriezellproduktion im Zusammenhang mit der Insolvenz von Northvolt vorgestellt und diskutiert. Danach werden aus den vorherigen Summary Briefings bereits vorgestellte Schlüsselthemen wie der digitale Zwilling in den aktuellen Kontext gebracht.

Die Insolvenz des europäischen Batteriezellherstellers Northvolt

Die Insolvenz von Northvolt, einem europäischen Batteriezellhersteller, in den viele Erwartungen gesetzt wurden, wurde am 13. März 2025 in Schweden beantragt. Das Unternehmen gab an, aufgrund finanzieller Engpässe und diverser Herausforderungen, darunter steigende Kapitalkosten, geopolitische Instabilität und Lieferkettenunterbrechungen, die notwendigen finanziellen Voraussetzungen für eine Fortführung nicht erreichen zu können. Trotz Verhandlungen mit potenziellen Investoren war Northvolt nicht in der Lage, rechtzeitig eine Lösung zu finden, was zur Insolvenz als "einzig verfügbarer Lösung" führte. Die Insolvenz betrifft ausschließlich die schwedischen Einheiten, während die deutschen und amerikanischen Tochtergesellschaften weiterhin operativ bleiben sollen.

Die Schieflage von Northvolt ist auch auf interne Schwierigkeiten beim Produktionshochlauf zurückzuführen. Die Nachfrage nach Elektrofahrzeugen ist gesunken, was in Verbindung mit einem Batteriezellen Überangebot aus China die Marktbedingungen verschärfte. Der schwedische Insolvenzverwalter, Mikael Kubu, wird nun den Verkaufsprozess leiten, wobei sowohl ein vollständiger als auch ein teilweiser Verkauf des Unternehmens in Betracht gezogen wird. Es besteht die Möglichkeit, dass Northvolt an chinesische Investoren verkauft wird, was Fragen nach der

zukünftigen Unabhängigkeit der europäischen Batteriezellproduktion aufwirft.

In Deutschland wird die Situation in Heide, wo eine neue Gigafactory entsteht, weiterhin optimistisch betrachtet. Die dortige Tochtergesellschaft ist nicht direkt von der Insolvenz betroffen und plant, den Bau fortzusetzen. Dennoch könnte die Insolvenz die Dimensionen des Projekts beeinflussen und die Abhängigkeit von der Muttergesellschaft verstärken. Insgesamt stellt die Insolvenz von Northvolt einen schweren Rückschlag für die europäische Batterieherstellung dar und wirft die Frage auf, wie die Branche auf die Herausforderungen reagieren kann, um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu sichern.

Somit lässt sich Schlussfolgern, dass Northvolt an den folgenden Herausforderungen gescheitert ist:

1. **Finanzielle Engpässe:** Northvolt konnte die notwendigen finanziellen Voraussetzungen für eine Fortführung des Unternehmens nicht sicherstellen.
2. **Steigende Kapitalkosten:** Die Kosten für Kapital sind in den letzten Monaten gestiegen, was die Finanzierung erschwerte.
3. **Geopolitische Instabilität:** Politische Unsicherheiten haben die Geschäftstätigkeiten und Investitionen negativ beeinflusst.
4. **Lieferkettenunterbrechungen:** Probleme in den Lieferketten führten zu Verzögerungen und zusätzlichen Kosten.
5. **Veränderte Marktnachfrage:** Die Nachfrage nach Elektrofahrzeugen und damit auch nach Batterien ist gesunken, was die Verkaufszahlen belastete.
6. **Interne Produktionsprobleme:** Beim Hochfahren der Produktion traten erhebliche interne Herausforderungen auf, die teilweise unvorhersehbar waren.

7. **Wettbewerb:** Ein Überangebot an Batterien aus China führte zu einem härteren Wettbewerb und drückte die Preise.

Whitepaper: *Mastering Ramp-Up of Battery Production*

Gerade die internen Probleme beim *Ramp-Up* der Zellproduktion ist eine Unwegsamkeit mit der viele neu gegründete aber auch bereits etablierte Hersteller Schwierigkeiten haben. Dies verzögert die Produktionsziele z. T. extrem, und führt zu hohen initialen Ausschussraten und verzögerten Produktionsstarts. Diese Umstände haben erhebliche Auswirkungen auf die Rentabilität und die Gesamtdurchführbarkeit von Projekten. In diesem Whitepaper der Fraunhofer Forschungsfertigung Batterie zelle (FFB) werden die organisatorischen und technischen Hürden beim Produktionshochlauf einer Gigafabrik für Batteriezellen beschrieben und es werden Einblicke gegeben, wie diese Herausforderungen überwunden und der Prozess effektiv verwaltet werden können. Das Hauptziel des *Whitepapers* ist es, aufzuzeigen, wie diese Ressourcen zusammen mit strategischen Erkenntnissen genutzt werden können, um einen erfolgreichen und effizienten Ramp-Up zu gewährleisten. [18]

Der Hochlaufprozess in der Batteriezellenproduktion ist hochkomplex und weicht oft erheblich von idealisierten Modellen ab. Zu den wichtigsten Herausforderungen zählen die Produkt- und Prozesskomplexität, die Neuartigkeit der Batteriezellproduktion in Regionen wie Europa und den USA, der Automatisierungsgrad der Anlagen sowie der Mangel an Fachkräften. Kulturelle und sprachliche Barrieren können den Betrieb zusätzlich erschweren. Diese Probleme führen häufig zu Rückschlägen und Abweichungen von den ursprünglichen Plänen, was die Notwendigkeit effektiver Strategien zur Bewältigung dieser Komplexität unterstreicht. Strukturierte Schulungsprogramme, digitale

Wissensspeicher und kontinuierliche Lernplattformen sind entscheidend, um sicherzustellen, dass relevante Informationen auf allen Ebenen des Unternehmens ausgetauscht werden. [18]

Bei der Hochlaufphase der Batteriezellproduktion stehen zahlreiche technische Herausforderungen im Vordergrund, insbesondere die Elektrodenbeschichtung und -trocknung, die für die Zellqualität entscheidend sind, stellt einen entscheidenden Faktor dar. Probleme bei der Produktionsskalierung, der Optimierung der Prozessparameter und dem Defektmanagement müssen systematisch angegangen werden. Ein systematischer Ansatz zur Ursachenanalyse ist erforderlich, um Produktionsprobleme zu identifizieren und zu beheben, da die Wechselwirkungen zwischen Prozess- und Qualitätsparametern komplex sind. [18]

Die Digitalisierung ist ein zentraler Aspekt zur Optimierung der Produktion. Durch den Einsatz modularer IT-Architekturen, standardisierter Datenmodelle und fortschrittlicher Datenanalyseverfahren sollen Implementierungskosten gesenkt und der Nutzen maximiert werden. Die Kombination von Expertenwissen, wie etwa Fehlerkatalogen, mit datengestützten Methoden, wie Rückverfolgbarkeit, verbessert die Fehlersuche und fördert kontinuierliche Verbesserungen. Eine flexible IT-Architektur, die mehrere optimierte Datenbanken und leistungsstarke Hardware integriert, ist entscheidend, um das volle Potenzial der Digitalisierung auszuschöpfen. Dabei erleichtern standardisierte Datenmodelle die Maschinenintegration und den Zugriff auf Daten. [18]

Die Leistung in der Anlaufphase ist entscheidend für den langfristigen Erfolg eines Projekts. Intern verursachte Versäumnisse, wie schwache Lernkurven, geringe Kapazitätsauslastung und Qualitätsprobleme, in Kombination mit externen Einflussfaktoren wie schwacher Nachfrage nach Elektrofahrzeugen und Rohstoffpreisschwankungen,

können leicht eine Auswirkung auf die finanzielle Tragfähigkeit eines Vorhabens haben. Die effiziente Bewältigung organisatorischer Herausforderungen, wie die Verbesserung der Qualifikationen von Arbeitskräften und die Einhaltung von Normen, ist entscheidend für den langfristigen Unternehmenserfolg. [18]

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Ramp-Up in der Batteriezellenproduktion eine komplexe Herausforderung darstellt, die umfassende strategische Ansätze erfordert. Die Kombination aus Fachwissen, Digitalisierungslösungen und einer soliden Infrastruktur ist entscheidend für die Rentabilität und Effizienz der Batteriezellproduktion. Die Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen und Industriepartnern kann Herstellern helfen, die Herausforderungen im Ramp-Up-Prozess erfolgreich zu bewältigen und ihre Produktionsziele effizient zu erreichen. [18]

Rückschlüsse zu vorgestellten Summary Briefings

Die Insolvenz von Northvolt hat die Aufmerksamkeit auf die Herausforderungen in der Batteriezellproduktion gelenkt, die nicht isoliert sind, sondern die Schwierigkeiten widerspiegeln, mit denen die gesamte Branche, insbesondere in Europa und den USA, konfrontiert ist. In Anbetracht der aktuellen Entwicklungen in der Batterieproduktion und Digitalisierung sind mehrere Schlüsselthemen von großer Bedeutung. Diese Schlüsselthemen sind in den vorherigen Summary Briefings bereits adressiert worden und werden im Folgenden erneut aufgegriffen.

Ein Umfeldbericht aus dem Jahr 2022 über das europäische Innovationssystem für Batterien hat die Herausforderungen und Entwicklungen in der Batteriezellproduktion fokussiert. Die Betrachtung beginnt bei der Rohstoffgewinnung über die Materialherstellung bis hin zum Recycling und Maschinenbau. Insbesondere die Fraunhofer FFB hat sich als Transfereinheit für industrielle Prozesstechnologien etabliert bzw. baut die Kompetenzen weiter aus, was die Notwendigkeit

unterstreicht, Fachwissen und Technologien zu bündeln, um die Produktionsqualität zu verbessern. Der Einsatz von fortschrittlichen Technologien, wie der Integration von Si-basierten Anoden in Lithium-Ionen-Batterien, wird in den nächsten fünf bis zehn Jahren erwartet. Diese Entwicklungen könnten die Energiedichte signifikant erhöhen, mit prognostizierten Werten von 800 Wh L⁻¹ bis 2025 und 900 Wh L⁻¹ bis 2030. [19]

In diesem Kontext sind digitale Zwillinge eine Schlüsselthematik. Dabei ist entscheidend die Potenziale zu identifizieren, und mit gezielten Analysen darzustellen, wie diese Technologien bei der Überwachung und Optimierung von Produktionsprozessen helfen können. Digitale Zwillinge ermöglichen es, physische Prozesse in die digitale Welt zu übertragen, wodurch Echtzeitdaten zur Prozessoptimierung genutzt werden können. Diese Technologien bieten eine wertvolle Grundlage, um Herausforderungen im Ramp-Up-Prozess zu identifizieren und effektiv zu adressieren. [20]

In den letzten zwei Jahren hat der Einsatz digitaler Zwillinge in der Batterieproduktion deutlich zugenommen. [21, 22] Dieser Trend wird auch von der Industrie bestätigt, welche die Bedeutung dieser Technologie für die Entwicklung und Validierung von Lösungen im Bereich der Elektromobilität als hoch einschätzt. [23, 24] Zusätzlich dazu veröffentlichte die Fraunhofer Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB) ein passendes Whitepaper zu dieser Thematik, indem die vielfältigen Potenziale digitaler Zwillinge in der Batteriezellfertigung hervorgehoben werden. [19]

Auch *Traceability*-Systeme haben in der Batteriezellfertigung an Bedeutung gewonnen, um die Qualitätssicherung zu verbessern, und Produktionsprozesse transparenter zu gestalten. Durch Entwicklungen, wie der Battery Passport, können Produkte während des gesamten Herstellungsprozesses eindeutig identifiziert und relevante Fertigungsdaten verknüpft werden. Dies ermöglicht eine lückenlose Rückverfolgbarkeit, die zur frühzeitigen Erkennung von Qualitätsabweichungen beiträgt. [25] Des Weiteren wird der Einsatz von Markierungstechnologien weiter-

entwickelt, um die Rückverfolgbarkeit stetig zu verbessern. [26] Allerdings bestehen weiterhin Herausforderungen bei der Integration solcher Systeme, insbesondere in Bezug auf die Verarbeitung großer Datenmengen und die Anpassung an kontinuierliche Produktionsprozesse. Die Notwendigkeit standardisierter Lösungen und technologischer Weiterentwicklungen bleibt bestehen, um die Effizienz dieser Systeme zu maximieren. [25, 26]

Die Anwendung von Data Science und Künstlicher Intelligenz (KI) hat sich als vielversprechend erwiesen. Maschinelles Lernen kann zur Optimierung von Produktionsprozessen eingesetzt werden, indem es Prognosen verbessert und Ausschussraten reduziert. Die Herausforderungen liegen jedoch in der Verfügbarkeit und Qualität der Daten, die für solche Analysen erforderlich sind. Aktuelle Forschungsarbeiten zeigen, dass innovative Technologien zur Datenanalyse und -verarbeitung entscheidend sind, um Qualitätsoptimierung und Ausschussreduktion zu erreichen. Der Einsatz von zerstörungsfreien Prüftechnologien in der Qualitätskontrolle ist ein Beispiel dafür, wie moderne Ansätze in der Batteriefertigung implementiert werden können. [13]

Ergänzend dazu setzen moderne Ansätze vermehrt auf automatisierte Systeme und *Inline*-Inspektionen, um Fehler frühzeitig zu erkennen und die Produktionsqualität zu steigern. [27] Beispielsweise ermöglicht der Einsatz von *Deep-Learning*-Technologien die automatische Defekterkennung auf Beschichtungen, was die Abhängigkeit von manuellen Prüfungen reduziert und die Produktionsgeschwindigkeit erhöht. [28]

Ein zentraler Punkt ist die strategische Kostenstruktur- und Sensitivitätsanalytik. Die Verbesserung der Zellfertigung, beispielsweise durch Hochgeschwindigkeits-*Stacking* und Trockenbeschichtung, bietet vielversprechende Ansätze zur Kostenreduktion. Die Entwicklung von kostenanalytischen Werkzeugen zur Prozessmodellierung kann die Entscheidungsfindung erheblich unterstützen, indem sie die Materialkompatibilität und Prozesskontrolle bewertet. Die hohen Dynamiken im

Technologiefeld und die begrenzte Informationsverfügbarkeit stellen jedoch eine Herausforderung dar. Es ist wichtig, dass Unternehmen in der Batterieindustrie sich kontinuierlich über die neuesten Entwicklungen informieren und strategische Partnerschaften eingehen, um fundierte Entscheidungen treffen zu können. [2]

Die Identifikation und Analyse von Fehlerbildern in der Batteriezellfertigung sind entscheidend für die Sicherstellung von Qualität und Effizienz. Durch die Identifikation von verschiedenen Fehlerbildern, die vor allem in den Prozessen Dosieren, Mischen, Beschichten, Trocknen und Assemblierung auftreten, können Rückschlüsse auf die größten *Pain Points* innerhalb der Fertigung geschlossen werden. Diese Herausforderungen müssen systematisch angegangen werden, um die Produktionsqualität zu verbessern. Der Einsatz moderner Sensortechnologien spielt hierbei eine zentrale Rolle. Diese Technologien ermöglichen es, spezifische Fehlerbilder frühzeitig zu erkennen und Rückschlüsse auf ihre Ursachen zu ziehen. So können beispielsweise Bildverarbeitungssysteme und Nahinfrarotsensoren im Dosier- und Mischprozess eingesetzt werden, um die Homogenität des Elektroden-*Slurrys* sicherzustellen. [11]

Die rapide Entwicklung im Bereich der Lithium-Ionen-Batterieproduktion bietet auch Synergien für Messmittelhersteller. Technologien, die ursprünglich für die Batterieproduktion entwickelt wurden, können auch in anderen Industrien, wie der Automobil- oder Elektronikindustrie, Anwendung finden. Diese Diversifizierung könnte den Herstellern helfen, ihre Produktportfolios zu erweitern und neue Geschäftsmöglichkeiten zu erschließen. [29]

Nur wenn all diese Ansatzpunkte erfolgreich umgesetzt werden, kann Deutschland, die EU und die USA wieder eine kostenkompetitive Souveränität in der Batteriezellproduktion aufbauen und sind bereit auch in Zukunft erfolgreich neue Technologien in die Batteriewelt zu integrieren. Eines dieser alternativen Technologien könnte die kontinuierliche Präolithierung von LIB-Anoden sein. [30] Diese Prozessinnovationen sind entscheidend, um die Effizienz der Herstellung zu steigern und gleichzeitig

die Qualität der Batterien zu gewährleisten. Allerdings sind die Herausforderungen bei der Integration solcher neuen Technologien in bestehende Fertigungslinien nicht zu unterschätzen. Eine sorgfältige Planung und eine enge Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie sind erforderlich, um diese neuen Technologien erfolgreich zu implementieren.

Zusammenfassung für den Technologiebereich Batterieproduktion & Digitalisierung

Insgesamt zeigt die Analyse der aktuellen Trends und Herausforderungen in der Batteriezellfertigung, dass die Branche in Europa und Nordamerika vor komplexen Aufgaben steht. Die Kombination aus Fachwissen, Digitalisierungslösungen und einer soliden Infrastruktur ist entscheidend für die Rentabilität und Effizienz der Batteriezellproduktion. Die Insolvenz von Northvolt und die damit verbundenen Herausforderungen verdeutlichen die Notwendigkeit, proaktive Maßnahmen zu ergreifen, um die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Batteriefertigung zu sichern.

Die Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen und Industriepartnern kann Herstellern helfen, die Herausforderungen im *Ramp-Up*-Prozess erfolgreich zu bewältigen und ihre Produktionsziele effizient zu erreichen. Nur durch kontinuierliche Innovation und die Nutzung modernster Technologien kann die Branche, auf die sich verändernden Marktbedingungen reagieren und ihre Zukunft sichern.

Batterierecycling

Entwicklungen im Themengebiet

Die letzten Jahre der deutschen Forschungslandschaft im Themengebiet Batterierecycling bzw. zu *End-of-Life* (EoL) Strategien von Traktionsbatterien sind durch prägnante Entwicklungen und Fortschritte geprägt. Trotz finanzieller Engpässe in der Projektförderung aufgrund des KTF-Urteils Ende 2023 bildet das Batterierecycling weiterhin ein dynamisches Umfeld in der akademischen Forschung wie auch in industrienahen FuE-Lösungen. In den letzten Jahren zeigen die **Publikationsaktivitäten**, dass neben der Erforschung von Recycling-

technologien zunehmend auch generelle Fragen und Antworten zum Handling von Batterien nach ihrem Lebensende im Mittelpunkt stehen. Themen wie das *Second-Life* oder die automatisierte Demontage von Traktionsbatterien werden weiterentwickelt, wobei neue Technologien, insbesondere im Bereich Digitalisierung und in innovativen Recyclingprozessen für ein kostenoptimiertes und ökologisch nachhaltiges Recycling, zunehmend an Bedeutung gewinnen. Gerade durch den starken Maschinen- und Anlagenbau in Deutschland liegen aktuelle Forschungsaktivitäten insbesondere in der Verbesserung der kostenintensiven Vorbehandlung – darunter fällt z. B. das Schreddern der Batterie-Packs in unterschiedlichen *Settings* einhergehend mit der Fragmentierung der unterschiedlichen Rohstoffe u. a. zur Gewinnung der sogenannten Schwarzmasse, oder die Trennung von peripheren Metallen, Kabelverbindungen und Kunststoffen in Packgehäusen – z. B. im Rahmen einer roboterunterstützten, automatisierten Demontage. [8]



Abbildung 2: Stichwortwolke zu Keywords der letzten 2 Jahre im Technologiebereich Batterierecycling.

Seit 2020 ist die Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen im Bereich Batterierecycling in Deutschland und Europa sehr stark gestiegen. [8] Dieser Anstieg reflektiert das generell wachsende Interesse an nachhaltigen Lösungen für die Batterieentsorgung und Wiedergewinnung von Rohstoffen – ein Trend, der maßgeblich durch deutsche wie internationale Klimaziele und **regulatorische Anforderungen** in Europa beeinflusst wird. Mit der *EU-BattVO* und dem *Critical Raw Materials Act* sind in den letzten Jahren zwei zentrale Europäische Direktiven in Verkehr gebracht worden, die das Batterierecycling in Europa z. B. durch

Vorgaben zur Sammlung und Recyclingeffizienz von gebrauchten Batterien und den Einsatz von Rezyklaten in neue Batteriezellen weiter verstärken werden.

Die **Projektlandschaft** entwickelt sich trotz herausfordernden Zeiten in der Projektförderung weiter. Das vom BMBF geförderte *greenBatt* Forschungscluster [31] ist 2024 ausgelaufen. *GreenBatt* setzte über mehrere Jahre hinweg wichtige Impulse in der Batterierecycling-Forschung, so in der Entwicklung und Anwendung innovativer Recycling- und Resynthese-Prozesse, der Erhöhung der Qualität und Verfügbarkeit von Daten zur Entwicklung multidisziplinärer Lebenszyklusmodelle und -werkzeuge sowie mittels Empfehlungen für das Design für Recycling und dem *End-of-Use*. Dem Forschungscluster folgend sind neue Förderinitiativen entstanden, wie beispielsweise das *SynBatt*-Programm. [32] Besonders hervorzuheben ist dort die Förderlinie „*Green Battery*“, die bundesweit Projekte mit Kooperationen von Forschungs- und Industrieakteuren unterstützt, die den Fokus auf ökologische und ressourcenschonende Recyclingprozesse legen. Die Projekte behandeln dabei unterschiedliche Fragestellungen, z. B. im Bereich *EoL*-Zustandsklassifizierung und Gehäusedemontage (*DemoRec*) [33], der industriellen Skalierung des Direktrecyclings in Form der aktiven funktionserhaltenden Komponentenrückgewinnung (*DiRecReg*) [34] oder gebrauchten LFP-Batterien (*DiLiRec*) [35], sowie *Re-X* Ansätzen bei gebrauchten Automotive-Batterien (*ReLiBat*). Auch durch Landesregierungen bereitgestellte Fördermittel unterstützen den Kompetenzaufbau und Synergien zwischen Forschung und industrieller Anwendung regional in den Bundesländern, bspw. in Nordrheinwestfalen als *Produktives-NRW*. [36] Solche neuen Förderprogramme bieten weiterhin Chancen für eine innovative und interdisziplinäre Forschungslandschaft, und fokussieren dabei zunehmend eine industrielle Skalierung ihrer Prozesse und Technologien aus Kooperationen zwischen Wissenschaft- und Industrieakteure.

Trends und „Hot-Topics“

In den jüngsten **techno-ökonomischen Analysen** (siehe u. a. [11, 30]) zeigt sich, dass sowohl das direkte als auch das hydrometallurgische Recycling ökologisch vorteilhaft sind, insbesondere in einem geschlossenen Kreislauf, wobei eine Kombination beider Verfahren angesichts der zu erwartenden Batterienachfrage in den nächsten 20 Jahren am vielversprechendsten erscheint. Das direkte Recycling produziert weniger Treibhausgasemissionen als das hydrometallurgische, während Letzteres aufgrund seiner Robustheit gegenüber Materialvariationen wohl langfristig ökonomisch attraktiver ist. [11] Neue Recyclingansätze, etwa der Einsatz von Oxalsäure [30] oder mechanochemische Verfahren [19], deuten auf einen Trend zu umweltfreundlicheren und effizienteren Hydrobasierten Verfahren hin. Für *Solid-State*-Batterien wird eine differenzierte Prozessführung empfohlen, da konventionelle Recyclingmethoden insbesondere bei der Rückgewinnung der Elektrolyte an ihre Grenzen stoßen. Zusätzlich zeigt eine Lebenszyklusanalyse, dass die Reparatur einzelner Batteriemodule im Vergleich zum kompletten Austausch signifikante Kosten- und Emissionseinsparungen ermöglicht.

Angesichts der anhaltenden Energiekrise und der steigenden Materialpreise rückte auch das Thema *Second-Life* von Batterien – also die Wiederverwendung ausgedienter Batterien in weniger anspruchsvollen Anwendungen – stärker in den Fokus. Gleichwohl ***Second-Life-Anwendung und Re-X Verfahren*** weiterhin spannend bleiben, zeigen aktuelle Entwicklungen:

- Die Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der Wiederaufbereitung hängen stark von dem jeweiligen Einsatzszenario und Marktumfeld ab, eine Reparatur von Batteriemodulen kann aber bereits ökonomisch und ökologisch vorteilhaft sein. [11, 30]
- Es gibt weiterhin Herausforderungen in Bezug der aktuellen Regulierungen und bürokratischen Prozessen sowie bei standardisierten Testverfahren zu Sicherheit- und *State-of-Health*-Bestimmung von Zellen oder ganzen Packs [2] –

eine entscheidende Notwendigkeit für Second-Life Batterien um techno-ökonomisch konkurrenzfähig zu sein.

- Jüngste Forschungsprojekte versuchen diese Lücken zu schließen, siehe z. B. [20], jedoch ist der Einsatz von *Second-Life*-Anwendungen noch nicht wirklich in den Markt durchgedrungen. Aufgrund regulatorischer Rahmenbedingungen, sowie der Wettbewerbsfähigkeit gegenüber neuen Batterien und deren erwarteter Performance-Verbesserung bei gleichzeitiger Kostensenkung, ist ein signifikanter Marktzuwachs von *Second-Life*-Anwendungen noch nicht abzusehen. [13]

Die **automatisierte Demontage** von Lithium-Ionen-Batterien war vor einigen Jahren ein dominierendes Forschungsthema, um Recyclingprozesse effizienter zu gestalten. Es wird weiter an der Automatisierung der Demontage geforscht, wobei es sich auch zeigt, dass

- der Fokus nun auch auf einer Integration von automatisierter Demontagelösungen in größere Recyclingprozesse und unterschiedlichen Prozesskombinationen gelegt wird [29], insbesondere wenn es um die Herausforderung des Handlings der heterogenen Produktvielfalt bei Packrücklaufern geht [20],
- neue Ansätze, die eine Kombination aus Robotik und MRK [13], Künstlicher Intelligenz [30] und sensorbasierten Systemen [29] nutzen, in den Vordergrund rücken,
- es zunehmend eine Tendenz gibt, diese Systeme in Pilotprojekten industriell zu erproben und zu skalieren (siehe z. B. *SynBatt*), was auf eine Weiterentwicklung der Technologiereife hindeutet, aber auch auf die Notwendigkeit, bestehende Technologien weiter zu optimieren.

Im Vergleich zu vor zwei Jahren haben sich einige **neue Technologien und Ansätze** als vielversprechend herausgestellt, die vorher nicht unbedingt im Fokus der Forschung standen.

- Neue Verfahren: Es gibt vermehrt Ansätze, elektrochemische [29] oder aus der Hydrometallurgie weiterentwickelte [37] Methoden zur Extraktion und (teilweise auch

funktionserhaltenden) Rückgewinnung von Metallen und Materialien aus gebrauchten Batterien zu nutzen. Solche Methoden, wie auch das mechanochemische Verfahren [19], versprechen eine ressourcenschonendere und energieeffizientere Alternative zu herkömmlichen mechanisch-hydro-/pyrometallurgischen Verfahren.

- Kreislaufwirtschaftsansätze: Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich intensiv mit der Integration von Batterierecycling in ein umfassendes Konzept der Kreislaufwirtschaft, was neben technologischen Herausforderungen auch wirtschaftliche und regulatorische Fragen adressiert.
- Innovative Ansätze zu Recyclingtechnologien in Kombination mit der Kreislaufwirtschaft adressieren mittlerweile auch das Batteriematerial Graphit, das lange Zeit als für das Recycling als irrelevant angesehen wurde. Hier zeigen Verfahren wie die *Froth Flotation* [20] oder die Elektrodenentschichtung mittels Ultraschallbad [11] erfolgsversprechende Wege auf, den monetär eher wenig wertvollen, aber als *Critical Raw Material* klassifizierten Rohstoff Graphit kostengünstig und funktionserhaltend zurückzugewinnen.
- Digitalisierung und Datenanalyse: Der Einsatz von *Big Data* und maschinellem Lernen [19] zur Optimierung von Recyclingprozessen (z. B. in der robotergestützten Demontage), zur Charakterisierung von Materialflüssen im Recyclingstrom [29] oder zur Alterungsmodellierung von *Second-Life*-Zellen [2] gewinnen zunehmend an Bedeutung. Der Digitale Zwilling stellt bspw. für die produzierende Umgebung eine Möglichkeit dar, effiziente Materialkreisläufe in Unternehmen aufzubauen. Diese Ansätze waren vor einigen Jahren noch eher in der Entwicklungsphase, sind aber mittlerweile in vielen Projekten fester Bestandteil von Arbeitspaketen.
- Innovative Trenntechnologien: Es werden neben der automatisierten Demontage vermehrt neuartige Verfahren zur präzisen Trennung der einzelnen Komponenten der Packs/Module/Zellen [11] oder von Materialagglomerationen

erforscht, um die Wiederverwertbarkeit der Batteriematerialien und -rohstoffe zu maximieren. Das adressiert nicht nur die „konventionelle“ Recycling-Prozesskette, sondern ist z. B. auch im Direktrecycling wichtig, um funktionserhaltende Materialien zurück-zugewinnen. Hierbei könnten Verfahren wie die Ultraschallentschichtung [11], laserbasierte Verfahren oder mittels Lösungen (bspw. NMP) [38] für die direkte Wiederverwendung in der Produktion, in Zukunft eine zentrale Rolle in der Elektrodenentschichtung und dem direkten Wiedereinsatz der Rohstoffe als Rezyklat spielen.

Zusammenfassung für den Technologiebereich Batterierecycling

Aufeinander aufbauende Forschungsaktivitäten in diesem Bereich tragen aktuell dazu bei, dass Deutschland trotz aktueller Herausforderungen weiterhin eine wichtige Rolle in der Batterierecycling-Forschung einnimmt. Durch eine kontinuierliche Projektförderung, sowohl zu neuen Technologien als auch in Bezug der Skalierung und Optimierung etablierter Verfahren, kann diese kompetitive Wissensbasis beibehalten werden. Universitätsnahe Startups in Deutschland, wie bspw. Cylib oder Tozero, überführen aktuell ihre Forschung in die industrielle Umsetzung. Die Forschung an innovativen Technologien und Prozessen ist generell entscheidend, um Produktionsausschüsse sowie Batterien an ihrem Lebensende kostengünstig, effizient und umweltverträglich wie ökologisch nachhaltig wiederzuverwerten und die Rohstoffe in einem kreislaufbasierten Ökosystem Batterie zu behalten.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), *Bundesbericht Forschung und Innovation 2024*, Berlin, **2024**, zu finden unter: <https://www.bundesbericht-forschung-innovation.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025): https://www.bundesbericht-forschung-innovation.de/files/BMBF_BuFI-2024_Hauptband.pdf
- [2] TraWeBa Summary Briefing, *Highlights aus der Wissenschaft und Forschung (Q1/2024)*, 2024, zu finden unter: <https://traweba.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025) <https://traweba.de/batterieforschung-auf-dem-batterieforum-deutschland-2024-klub/>
- [3] Kompetenzcluster zur Batterieproduktion – ProZell, zu finden unter: <https://prozell-cluster.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025): <https://prozell-cluster.de>
- [4] Kompetenzcluster für Festkörperbatterien – FestBatt, zu finden unter: <https://festbatt.net> (letzter Zugriff: 31.03.2025): <https://festbatt.net>
- [5] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), *Batterieforschung: BMBF sichert Start neuer Projekte*, Kurzmitteilung Energien, Forschung, **21.01.2025**, zu finden unter: <https://www.bmbf.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025) <https://www.bmbf.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/2025/01/batterieforschung-25.html>
- [6] EU-Kommission, *Commission restricts use of a subgroup of PFAS chemicals to protect human health and the environment*, Pressemitteilung, **19.09.2024**, zu finden unter: <https://commission.europa.eu> (letzter Zugriff: 31.03.2025) https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_4763
- [7] X. Liu et al., *Acc. Chem. Res.* **2025**, 58, 354–365. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.4c00653>
- [8] TraWeBa Summary Briefing, *Highlights aus der Wissenschaft und Forschung (Q2/2024)*, 2024 zu finden unter: <https://traweba.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025) <https://traweba.de/2024-patent-publikationsanalyse-lithium-batterie/>
- [9] P. Zhang et al., *BYD expects to begin 'demonstration use' of all-solid-state batteries by 2027, exec says*, Battery news, 15.02.2025, zu finden unter: <https://cnevpost.com> (letzter Zugriff: 31.03.2025): <https://cnevpost.com/2025/02/15/byd-demonstration-use-all-solid-state-batteries-2027/>
- [10] Y. Obayashi et al., *Japan's Idemitsu to build lithium sulphide plant to help support Toyota's EV plans*, Energy, **27.02.2025**, zu finden unter: <https://www.reuters.com> (letzter Zugriff: 31.03.2025): <https://www.reuters.com/business/energy/japans-idemitsu-build-lithium-sulphide-plant-help-support-toyotas-ev-plans-2025-02-27/>
- [11] TraWeBa Summary Briefing, *Highlights aus der Wissenschaft und Forschung (Q3/2024)*, 2024 zu finden unter: <https://traweba.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025) <https://traweba.de/2024-lithium-ionen-oder-festkoerperbatterien-qualitaets-sicherung-recycling/>
- [12] M. Rosner et al., *Adv. Energy Mater.* **2025**, 2404790. <https://doi.org/10.1002/aenm.202404790>
- [13] TraWeBa Summary Briefing, *Highlights aus der Wissenschaft und Forschung (Q3/2023)*, 2023 zu finden unter: <https://traweba.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025) <https://traweba.de/highlights-aus-der-wissenschaft-forschung-3/>
- [14] V. Marangon et al., *J. Power Sources* **2025**, 634, 236496. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236496>
- [15] Spiegel Mobilität, *In China rollen erste Elektroautos mit Natriumakkus vom Band*, 03.01.2024, zu finden unter: <https://www.spiegel.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025): <https://www.spiegel.de/auto/natrium-ionen-batterie-chinesischer-hersteller-jac-produziert-erstes-elektroauto-mit-billigakku-a-7ae8a8-3bf2-4e66-9db9-f8ae739fdb6d>
- [16] M. Andrews et al., *CATL announces second-generation sodium battery, normal discharge at -40°C*, **18.11.2024**, zu finden unter: <https://carnewschina.com> (letzter Zugriff: 31.03.2025): <https://carnewschina.com/2024/11/18/catl-announces-second-generation-sodium-battery-normal-discharge-at-40c/>

- [17] Z. Li et al., *Angew. Chem. Int. Ed.* **2025**, 64, e202415942
<https://doi.org/10.1002/anie.202415942>
- [18] C. Dahmen et al, *Mastering Ramp-up of Battery Production*, Whitepaper, 2024
<https://doi.org/10.24406/publica-3727>
- [19] TraWeBa Summary Briefing, *Highlights aus der Wissenschaft und Forschung (Q1/2023)*, 2023, zu finden unter: <https://traweba.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025)
<https://traweba.de/highlights-aus-der-wissenschaft-forschung/>
- [20] TraWeBa Summary Briefing, *Highlights aus der Wissenschaft und Forschung (Q2/2023)*, 2023 zu finden unter: <https://traweba.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025)
<https://traweba.de/highlights-aus-der-wissenschaft-und-forschung/>
- [21] H. Härter et al, *Mit einem Aber: Akzeptanz für digitale Zwillinge steigt*, 27.03.2024, zu finden unter: <https://www.elektronikpraxis.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025):
<https://www.elektronikpraxis.de/digitale-zwillinge-kosten-sparen-prozesse-verbessern-a-8aebbc6805851aefd56d867359a7887a/>
- [22] C. Gillies et al., *Blick in die Zukunft: der digitale Zwilling der Hochvoltbatterie*, 18.06.2024, zu finden unter: <https://newsroom.porsche.com> (letzter Zugriff: 31.03.2025):
<https://newsroom.porsche.com/de/2024/innovation/porsche-engineering-digitaler-zwilling-hochvoltbatterie-36263.html>
- [23] W. Beutnagel et al., *Siemens und Mercedes zeigen nachhaltigen Digital Twin*, 23.04.2024, zu finden unter: <https://www.automobil-produktion.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025):
<https://www.automobil-produktion.de/produktion/siemens-und-mercedes-zeigen-nachhaltigen-digital-twin-466.html>
- [24] Siemens AG, Branchenlösungen, Automobilindustrie, zu finden unter: <https://www.siemens.com> (letzter Zugriff: 31.03.2025):
[https://www.siemens.com/de/de/branchen/automobilherstellung.html?gclid=CjwKCAjwnPS-BhBxEiwAZjMF0vjzpa-](https://www.siemens.com/de/de/branchen/automobilherstellung.html?gclid=CjwKCAjwnPS-BhBxEiwAZjMF0vjzpa-VHexyggkgagqYgMPmfqgScbtreuIX2gO3xHRKVTZW5gqjIRoCzhgOAvD_BwE&acz=1&gad_source=1)
- [25] Battery Pass, zu finden unter: <https://thebatteryypass.eu> (letzter Zugriff: 31.03.2025):
<https://thebatteryypass.eu/>
- [26] S. Carrell et al., *Rückverfolgbarkeit von Produkten in Lieferketten: Der ultimative Leitfaden*, Blogbeitrag, **31.07.2024**, zu finden unter: <https://www.scribos.com> (letzter Zugriff: 31.03.2025):
<https://www.scribos.com/de/blog/rueckverfolgbarkeit-von-produkten-in-lieferketten-der-ultimative-leitfaden>
- [27] MVtec Software GmbH, Batterieproduktion, zu finden unter: <https://www.mvtec.com> (letzter Zugriff: 31.03.2025):
<https://www.mvtec.com/de/anwendungsbereiche/industrien/batterieproduktion>
- [28] Konradin-Verlag Robert Kohlhammer GmbH, *KI-Vision für eine sichere Batterieproduktion*, 31.10.2023, zu finden unter: <https://automationspraxis.industrie.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025)
<https://automationspraxis.industrie.de/ki/ki-vision-fuer-eine-sichere-batterieproduktion/>
- [29] TraWeBa Summary Briefing, *Highlights aus der Wissenschaft und Forschung (Q4/2024)*, 2024, zu finden unter: <https://traweba.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025)
<https://traweba.de/23-studien-batterie-highlights-aus-der-wissenschaft-forschung-q4-2024/>
- [30] TraWeBa Summary Briefing, *Highlights aus der Wissenschaft und Forschung (Q4/2023)*, 2023, zu finden unter: <https://traweba.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025)
<https://traweba.de/highlights-aus-der-wissenschaft-forschung-4/>
- [31] Kompetenzcluster für Recycling & Grüne Batterie – greenbatt, zu finden unter: <https://www.greenbatt-cluster.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025):
<https://www.greenbatt-cluster.de/de/>

- [32] Förderinitiative „Effizienzsteigerung und Nutzung von Synergieeffekten in der Batteriezellfertigung für die Elektromobilität“ – Synbatt, zu finden unter: <https://www.synbatt.com/> (letzter Zugriff: 31.03.2025):
<https://www.synbatt.com/>
- [33] Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen, Lehrstuhl Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), Forschungsprojekte, *DemoRec*, zu finden unter: <https://www.pem.rwth-aachen.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025):
<https://www.pem.rwth-aachen.de/cms/pem/forschung/projekte/~bdowgm/demorec/>
- [34] C. Könemann et al., *Rückgewinnen statt schreddern: Batterien effizienter recyceln*, Presseinformation 098/2023, **28.11.2023**, zu finden unter: <https://www.kit.edu> (letzter Zugriff: 31.03.2025):
https://www.kit.edu/kit/pi_2023_098_ruckgewinne-n-statt-schreddern-batterien-effizienter-recyceln.php
- [35] Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Gruppe Recycling und Grüne Batterie, *Direktrecycling von Lithium-Eisenphosphat-Batterien »DiLiRec«*, zu finden unter: <https://www.ikts.fraunhofer.de> (letzter Zugriff: 31.03.2025):
https://www.ikts.fraunhofer.de/de/abteilungen/energiesysteme/mobile_energiespeicher_elektrochemie/recycling_gruene_batterie/direktrecycling-von-lithium-eisenphosphat-batterien--dilirec.html
- [36] Land Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, *Produktives.NRW – Kritische Technologien für Nordrhein-Westfalen*, zu finden unter: <https://www.in.nrw> (letzter Zugriff: 31.03.2025):
<https://www.in.nrw/produktives-nrw>
- [37] Z. Xu et al., *Angew. Chem. Int. Ed.* **2025**, e202414899.
<https://doi.org/10.1002/anie.202414899>
- [38] M. Ahuis et al., *J. Power Sources* 2024, 593, 233995.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233995>