

Cluster Neue Werkstoffe

Cluster Energietechnik



CE:Bat – Kreislaufwirtschaft für Lithium-Ionen-Batterien

Ein Bericht aus dem Cross-Cluster-Projekt des Umweltcluster Bayern,
Cluster Neue Werkstoffe und Cluster Energietechnik

Inhalt

1. Einleitung	4
2. Marktübersicht und aktuelle Entwicklungen	6
2.1. Wachstumspotenziale.....	7
2.2. Nachfrage nach Rohstoffen	8
2.3. Recyclingmarkt in Europa	9
3. Gesetzliche Rahmenbedingungen	10
3.1. EU-Batterieverordnung 2023	10
3.2. Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategien	11
3.3. Internationale Vergleichsstudien.....	11
4. Second-Use-Anwendungen von Lithium-Ionen-Batterien	13
4.1. Potenziale und Anwendungsfelder von Second-Use Speichern	13
4.2. Wirtschaftlichkeit und technische Herausforderungen	14
4.3. Gesetzliche Rahmenbedingungen für Second-Use	16
5. Recyclingprozesse und Technologien	18
5.1. Mechanische Recyclingverfahren.....	18
5.2. Hydrometallurgische und pyrometallurgische Verfahren	18
5.3. Technologische Innovationen und Effizienzsteigerungen.....	19
6. Herausforderungen und Hemmnisse	20
6.1. Rücknahme und Sammlung von Altbatterien	20
6.2. Lagerkapazitäten und Sicherheitsaspekte.....	20
6.3. Wirtschaftliche Herausforderungen.....	21
6.4. Grundsätzliche Fragen der Cluster zum Thema Batterierecycling und Ergebnisse der Interviews im Projekt CE:Bat	21
6.4.1. Schwerpunkte der Cluster zum Thema Batterierecycling	21
6.4.2. Ergebnisse der Befragungen und Interviews im Projekt CE:Bat	23
7. Handlungsempfehlungen für Politik und Wirtschaft	28
7.1. Einführung eines europaweiten Pfandsystems.....	28
7.2. Förderung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten	29
7.3. Einrichtung eines Kompetenzzentrums zur Kreislaufwirtschaft	29
7.4. Verbesserung der rechtlichen Rahmenbedingungen	30
7.5. Förderung von öffentlichen Beschaffungsprogrammen.....	30
7.6. Öffentlichkeitsarbeit und Sensibilisierung der Verbraucher.....	31
8. Fazit	32
9. Quellenverzeichnis	33



1. Einleitung

Der Hochlauf der Elektromobilität und die Energiewende steigern massiv den Bedarf an Lithium-Ionen-Batterien (LIB). Gleichzeitig ermöglichen immer leistungsfähigere und robustere Zellen neue Anwendungsfelder. Dabei stehen Industrie und Gesellschaft in der Verantwortung, die Wertschöpfungskette der Batterie nachhaltig zu gestalten. Derzeit besteht der Kreislauf von LIB aus mehreren isolierten Stufen, die jeweils unterschiedliche Ineffizienzen mit sich bringen. Die Zell-, Pack- und Modulproduktion erfolgt meist mit dem Gedanken an möglichst geringe Kosten und Leistungsdichten. Am Ende steht die komplexe Sammlung und Rücknahme von Altbatterien, eingeschränkte Lagerkapazitäten sowie die begrenzte Verfügbarkeit moderner Recyclingtechnologien. Zudem sind die rechtlichen Rahmenbedingungen oft uneinheitlich und wirtschaftliche Anreize für Unternehmen zur Beteiligung an der Kreislaufwirtschaft fehlen häufig. "Design for Recycling" verursacht beim Produzenten erst einmal mehr Kosten. Diese Faktoren erschweren es bislang, eine geschlossene und effiziente Kreislaufwirtschaft für LIB zu etablieren [1].

Die globalen Bemühungen um das Recycling von LIB werden aktuell durch verschiedene Hürden wie unzureichende Logistik, regulatorische Defizite, fehlende Geschäftsmodelle und den Entwicklungsstand der Technologie gebremst. Dennoch werden neue Kapazitäten in Europa geplant und gebaut [2].

Vor diesem Hintergrund adressiert das Projekt CE:Bat – ein Cross-Cluster-Projekt der Cluster Neue Werkstoffe (CNW), Energietechnik (CET) und Umwelttechnologie (UCB) – innovative Ansätze, um eine vernetzte und optimierte Kreislaufwirtschaft von LIB zu fördern und die Wertschöpfungskette insbesondere in Bayern nachhaltig zu verbessern. Wir fokussieren im Allgemeinen auf LIB – Chemie (Ni-Mn-Co bzw. NMC und Li-Fe-PO₄ bzw. LFP), da diese den Großteil des Marktes ausmachen, bzw. ausmachen werden [3]. LIB sind wiederaufladbare Batterien, die in vielfältigen Anwendungen – von Elektrofahrzeugen über mobile Geräte bis zu stationären Speichern – zum Einsatz kommen. Im Fokus des Projekts steht die Schaffung geschlossener Kreisläufe, der alle Akteure – von der Zellchemie und Batterieproduktion über die Nutzung (First Life) bis hin zum Second-Life und dem endgültigen Recycling – miteinander vernetzt und Synergien schafft. Dabei sollen bestehende Hürden überwunden und alle Stufen des Lebenszyklus effizient miteinander verknüpft werden.

Die Wertschöpfungskette von LIB beginnt bei der Zellchemie und Batteriezellproduktion, die entscheidend für Qualität und Leistungsfähigkeit der späteren Batterie ist. Anschließend durchläuft die Batterie mehrere Phasen, darunter die Nutzung im Fahrzeug oder Energiespeicher (First Life), mögliche Second-Use-Anwendungen und schließlich das Recycling. Hierbei kommen verschiedene Strategien der

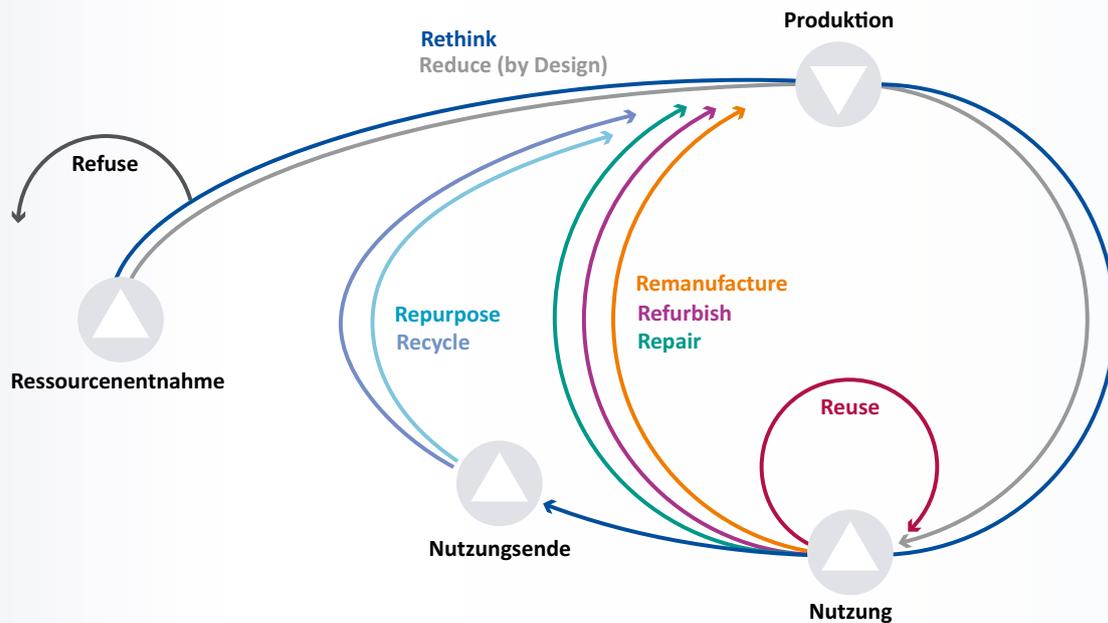


Abbildung 1: R-Strategien der Circular Economy als Ausgangspunkt für die Gliederung der Normungsbedarfe [4]

Kreislaufwirtschaft zum Tragen. In der Literatur werden bis zu neun sogenannte R-Strategien diskutiert (z.B. Reuse, Repurpose, Recycle etc. wie in Abb.1), wobei bislang vor allem das Repurposing (Zweitnutzung) und das Recycling nach Ende der Erstnutzungsdauer Anwendung finden [4].

Die Vorgehensweise des Projekts basiert auf einer umfassenden Bestandsaufnahme und Analyse der aktuellen Situation, gefolgt von der Entwicklung konkreter Lösungsansätze. Dazu gehört unter anderem die Durchführung von Interviews mit relevanten Akteuren, eine umfassende Umfrage zur Identifizierung bestehender Herausforderungen sowie eine wissenschaftliche Recherche zu innovativen Technologien und Verfahren. Darüber hinaus wird das Projekt die Erkenntnisse aus den Interviews und der Umfrage in die Erstellung eines Whitepapers einfließen lassen, welches konkrete Handlungsempfehlungen für Industrie und Politik formuliert.

Eine besondere Motivation des Projekts CE:Bat ist es, den bayerischen Akteuren entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Lithium-Ionen-Batterien zu helfen, die bestehenden Herausforderungen besser zu verstehen und Lösungsansätze zu entwickeln. Das Projekt fokussiert sich dabei hauptsächlich auf die Bedarfsermittlung und das Herausstellen von Herausforderungen im gesamten Kreislauf der LIB. Dies umfasst beispielsweise die Analyse der Sammlung und des Recyclings von Altbatterien, die Optimierung von Second-Use-Konzepten sowie die Vernetzung der beteiligten Akteure. Durch die Identifizierung dieser Herausforderungen soll der Wirtschaftsstandort Bayern gestärkt und die Wettbewerbsfähigkeit der regionalen Industrie im Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien verbessert werden. Langfristig zielt das Projekt darauf ab, durch eine enge Vernetzung der Akteure und die Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen eine nachhaltige und effiziente Nutzung von Lithium-Ionen-Batterien zu gewährleisten und somit einen wichtigen Beitrag zur Energiewende und zur Reduktion von CO₂-Emissionen zu leisten.



2. Marktübersicht und aktuelle Entwicklungen

Die europäische Batterierecyclingindustrie wird in den kommenden Jahren ein starkes Wachstum erfahren. Während im Jahr 2023 etwa 10.000 Tonnen Batterien recycelt wurden, wird bis 2040 ein Anstieg auf 5.950.000 Tonnen erwartet. Dieses Wachstum wird zunächst durch Produktionsabfälle angetrieben, während Altbatterien aus Elektrofahrzeugen ab 2030 eine wichtige Rolle spielen werden. Der Anstieg der Menge an Altbatterien ist auf die zunehmende Verbreitung von Elektrofahrzeugen und stationären Energiespeichern zurückzuführen, die nach ihrer Nutzungsdauer in den Recyclingkreislauf integriert werden müssen. [2][3][5].

Der Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien ist in den letzten Jahren weltweit stark gestiegen, was vor allem auf die zunehmende Elektrifizierung von Fahrzeugen und den Ausbau erneuerbarer Energien zurückzuführen ist. Laut einer Prognose von BloombergNEF wird die globale Nachfrage nach LIB bis 2030 auf etwa 2.300 GWh steigen, verglichen mit etwa 300 GWh im Jahr 2020 [6]. Besonders der Markt für Elektrofahrzeuge treibt diesen Anstieg an, da der Bedarf an leistungsfähigen Energiespeichern stark zugenommen hat. Gleichzeitig ist die Nachfrage nach stationären Energiespeichersystemen gestiegen, die zur Stabilisierung der Stromnetze beitragen sollen [7]. Auch in Deutschland zeigt sich ein ähnlicher Trend. Im Jahr 2022 wurden in Deutschland etwa 1,2 Millionen Elektrofahrzeuge neu zugelassen, was einen Anstieg von 65 % im Vergleich zum Vorjahr darstellt [8].

Entsprechend sind auch die prognostizierten Zahlen für die Mengen an Altbatterien bis 2040 sehr deutlich steigend. Dies betrifft alle Arten von Batterien, die derzeit für verschiedene Anwendungen – von der Informations- und Kommunikationstechnologie bis hin zu Elektrofahrzeugen – verfügbar sind. Prognosen zufolge könnten bis 2040 bis zu 2 Millionen Tonnen Altbatterien pro Jahr anfallen. Zudem wird sich die Zusammensetzung der Zellchemie verändern, da verschiedene Anwendungsbereiche unterschiedlich stark wachsen. Dies stellt Verwertungs- und Recyclingunternehmen vor Herausforderungen, da Recyclingprozesse an Materialzusammensetzungen angepasst werden müssen, um eine hohe Effizienz zu gewährleisten. [9] [10] Zudem sinkt durch den Einsatz von nachhaltigeren Materialien, die Gewinnmarge für Recycler.

Der bayerische Markt unterscheidet sich in gewisser Weise vom nationalen und internationalen Markt. Bayern ist ein bedeutender Standort für die Batterieproduktion und Forschung, insbesondere durch die Präsenz von Unternehmen und Forschungsinstitutionen, die sich intensiv mit der Weiterentwicklung der

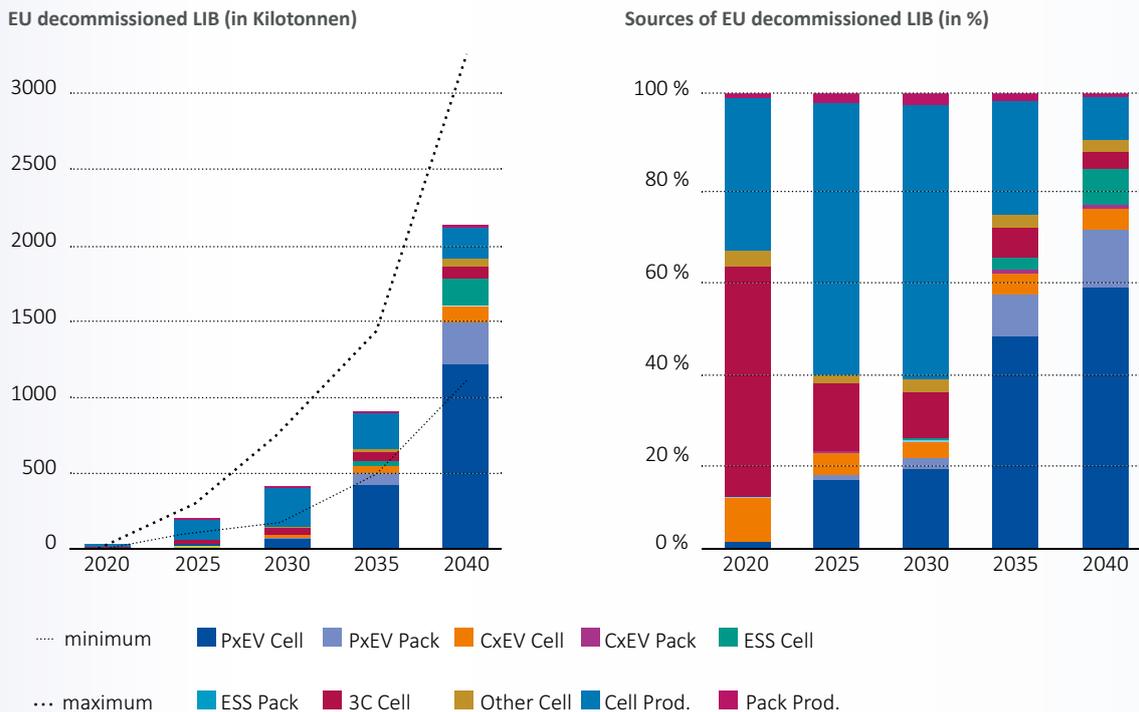


Abbildung 2: Starker Anstieg des Batterieabfallvolumens ist bis 2040 zu erwarten [2]

Batterietechnologie befassen. Die Region hat eine hohe Dichte an Akteuren, die entlang der gesamten Wertschöpfungskette tätig sind – von der Zellchemie und Batterieproduktion bis hin zum Recycling. Diese enge Vernetzung ermöglicht es Bayern, eine führende Rolle im Bereich der Kreislaufwirtschaft für LIB einzunehmen [11]. Zudem gibt es in Bayern und in Kooperationen zahlreiche Initiativen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und des Batterierecyclings, die dazu beitragen, die regionale Wertschöpfung zu stärken und gleichzeitig den ökologischen Fußabdruck zu minimieren [12].

Darüber hinaus hat Bayern, im Vergleich zu anderen Regionen, ein starkes Netzwerk an Clustern und Initiativen, die die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft unterstützen. Diese regionale Stärke zeigt sich auch im Engagement für Second-Use-Projekte, bei denen gebrauchte Batterien aus Elektrofahrzeugen beispielsweise in stationären Speichersystemen weiterverwendet werden. Die Kombination aus starker politischer Unterstützung, finanzieller Förderung und einer Vielzahl an relevanten Akteuren macht Bayern zu einer Vorreiterregion im Bereich der Kreislaufwirtschaft für Lithium-Ionen-Batterien.

2.1. Wachstumspotenziale

Das Wachstumspotenzial der Batteriemärkte, insbesondere im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien, ist erheblich. Die steigende Nachfrage nach Energiespeichern wird weltweit durch die Elektrifizierung von Fahrzeugen und den Ausbau erneuerbarer Energien vorangetrieben. Prognosen zeigen, dass der globale Markt für Lithium-Ionen-Batterien bis 2030 auf über 2.300 GWh ansteigen wird, was einer Steigerung

um das Achtfache im Vergleich zum Jahr 2020 entspricht [10]. Diese Entwicklung wird nicht nur durch die Automobilindustrie, sondern auch durch die zunehmende Nutzung stationärer Batteriespeichersysteme unterstützt, die für eine stabile Energieversorgung durch erneuerbare Energien unverzichtbar sind.

In Bayern bieten sich besondere Potenziale für Wachstum und Innovation im LIB-Markt. Bayern ist ein wichtiger Standort für die Forschung, Entwicklung und Produktion von Batterien. Insbesondere durch enge Kooperationen zwischen Industrie, Universitäten und Forschungsinstituten wird der Ausbau der Batterietechnologie in Bayern vorangetrieben. Es gibt viele Initiativen, die darauf abzielen, die Kreislaufwirtschaft für LIBs zu fördern und bestehende Technologien zu verbessern. Die regionalen Stärken in der Forschung und die Unterstützung durch die Landesregierung ermöglichen es Bayern, eine Vorreiterrolle im Bereich des Batterierecyclings und der Second-Use-Anwendungen zu übernehmen.

Zusätzlich sind in Bayern Unternehmen tätig, die entlang der gesamten Wertschöpfungskette arbeiten – von der Herstellung der Batteriezellen bis hin zur Nutzung und zum Recycling. Dies schafft Synergien, die für die Optimierung der Kreislaufwirtschaft essenziell sind. Die Nachfrage nach leistungsfähigen Recyclingverfahren sowie nach effizienten Lösungen für die Rückgewinnung und Wiederverwendung von Batteriematerialien bietet auch Chancen für die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle in der Region. Darüber hinaus sind Förderprogramme auf nationaler und regionaler Ebene ein wichtiger Treiber, um die notwendigen Infrastrukturen für das Batterierecycling auszubauen.

Die europäische Politik, insbesondere die EU-Batterieverordnung 2023 [13] [14], fördert ebenfalls die Entwicklung einer effizienten Kreislaufwirtschaft. Diese regulatorischen Rahmenbedingungen bieten Unternehmen Anreize, in den Ausbau von Recyclingkapazitäten zu investieren und neue Technologien zu entwickeln, um die Recyclingquote zu steigern und die Umweltauswirkungen der Batterieproduktion zu reduzieren. Insgesamt bietet die Kombination aus regulatorischen Anforderungen, steigender Nachfrage und technologischen Fortschritten erhebliche Wachstumschancen im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien sowohl auf globaler Ebene als auch speziell in Bayern.

2.2. Nachfrage nach Rohstoffen

Die Bedeutung des Recyclings wird unter anderem durch die wachsende Abhängigkeit von wertvollen Rohstoffen wie Lithium, Kobalt und Nickel verdeutlicht, deren Verfügbarkeit durch eine effektive Kreislaufwirtschaft gesichert werden soll. Diese Rohstoffe sind essenziell für die Produktion von Batterien, und die Sicherstellung ihrer Verfügbarkeit ist eine zentrale Herausforderung für die Industrie. Die zunehmende Nachfrage nach Elektrofahrzeugen und Energiespeichersystemen hat zu einem Anstieg des Bedarfs an diesen Rohstoffen geführt, was die Preise in den letzten Jahren erheblich steigen ließ. Um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten und Preisschwankungen zu minimieren, wird der Ausbau der Recyclingkapazitäten immer wichtiger [11].

Ein weiterer Aspekt, der die Nachfrage nach recycelten Rohstoffen beeinflusst, ist die Abhängigkeit von Lieferketten aus politisch instabilen Regionen. Viele der für Batterien benötigten Rohstoffe stammen aus Ländern, die geopolitischen Risiken ausgesetzt sind. Durch den Aufbau einer leistungsfähigen Recyclinginfrastruktur in Europa kann diese Abhängigkeit verringert und die Verfügbarkeit wichtiger Materialien

gesichert werden. Zudem wird der ökologische Fußabdruck der Batterieproduktion durch die Nutzung von Sekundärrohstoffen erheblich reduziert, da die umweltschädlichen Prozesse des Bergbaus und der Rohstoffgewinnung vermieden werden können.

Zudem gibt es technologische Fortschritte, die es ermöglichen, die Effizienz der Rohstoffrückgewinnung zu erhöhen und die wirtschaftliche Rentabilität des Recyclings zu verbessern. Beispielsweise können durch verbesserte hydrometallurgische Verfahren höhere Reinheitsgrade bei der Rückgewinnung von Lithium und Kobalt erreicht werden, was die Attraktivität der Nutzung von Sekundärrohstoffen für die Batterieproduktion steigert.

2.3. Recyclingmarkt in Europa

Europa strebt danach, seine Abhängigkeit von Importen seltener Rohstoffe zu verringern und gleichzeitig eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft aufzubauen. Ein effizienter Recyclingmarkt wird als Schlüssel zur Sicherung der Rohstoffversorgung angesehen. Länder wie Deutschland, Frankreich und Schweden sind führend im Aufbau von Recyclinginfrastrukturen und der Entwicklung innovativer Recyclingtechnologien. [5]

Deutschland hat in den letzten Jahren erhebliche Investitionen in den Ausbau von Recyclingkapazitäten getätigt und fördert aktiv Forschungsprojekte zur Verbesserung der Recyclingeffizienz. Beispielsweise betreibt die Nickelhütte Aue im Erzgebirge die bisher größte Batterierecyclinganlage Deutschlands mit einer Kapazität von bis zu 7.000 Tonnen jährlich.

In Schweden plant das Unternehmen Northvolt den Bau der größten europäischen Anlage zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien in Skellefteå. Die Kapazität soll sukzessive auf bis zu 125.000 Tonnen jährlich erhöht werden. Zudem unterstützt die schwedische Energieagentur Stena Recycling mit 70,7 Millionen SEK beim Bau einer neuen Batterierecyclinganlage in Halmstad [12].

Ein weiterer wichtiger Aspekt des europäischen Recyclingmarktes ist die Schaffung von Netzwerken, die den Austausch von Wissen und Technologien zwischen den beteiligten Akteuren fördern. Diese Netzwerke ermöglichen es, Best Practices zu teilen und gemeinsame Standards zu entwickeln, die die Qualität und Effizienz der Recyclingprozesse verbessern. Die europäische Zusammenarbeit im Bereich des Batterierecyclings bietet somit große Chancen die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie zu stärken und gleichzeitig einen Beitrag zur globalen Nachhaltigkeit zu leisten.



3. Gesetzliche Rahmenbedingungen

3.1. EU-Batterieverordnung 2023

Die EU-Batterieverordnung 2023 [14] bildet einen umfassenden rechtlichen Rahmen, um die Nachhaltigkeit von Batterien in der Europäischen Union zu fördern. Sie zielt darauf ab, die Umweltauswirkungen von Batterien zu minimieren und eine Kreislaufwirtschaft zu unterstützen. Die Verordnung umfasst die gesamte Wertschöpfungskette von Batterien, von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung bis hin zur Rücknahme und dem Recycling.

Vorteile der EU-Batterieverordnung:

- **Förderung der Kreislaufwirtschaft:** Die Verordnung schafft Anreize zur Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe und deren Wiederverwendung in neuen Batterien, was langfristig zur Reduzierung der Abhängigkeit von Primärrohstoffen beiträgt.
- **Verbindliche Recyclingquoten:** Die festgelegten Recyclingquoten stellen sicher, dass wertvolle Rohstoffe wie Lithium und Kobalt effizient zurückgewonnen werden, was zur Schonung natürlicher Ressourcen führt.
- **Erhöhte Herstellerverantwortung:** Die Rücknahmeverpflichtungen sorgen dafür, dass Hersteller stärker in die Verantwortung genommen werden, wodurch die Sammlung und das Recycling von Altbatterien verbessert werden.

Herausforderungen der EU-Batterieverordnung:

- **Unterschiedliche Umsetzung in den Mitgliedstaaten:** Die Umsetzung der Verordnung variiert zwischen den EU-Ländern, insbesondere in süd- und osteuropäischen Staaten, wo die erforderlichen Infrastrukturen noch nicht ausreichend entwickelt sind. Dies führt zu einer uneinheitlichen Effektivität der Kreislaufwirtschaft in der EU.
- **Hohe Kosten für Unternehmen:** Die Einhaltung der neuen Vorgaben, insbesondere der Recyclingquoten, kann für einige Unternehmen mit hohen Kosten verbunden sein. Dies betrifft insbesondere kleinere Hersteller, die möglicherweise nicht über die nötigen Ressourcen verfügen, um die Anforderungen effizient umzusetzen.
- **Technische Herausforderungen:** Die Rückgewinnung von Materialien wie Lithium und Nickel erfordert komplexe Recyclingverfahren, die technisch anspruchsvoll sind und kontinuierliche Innovation erfordern.

Die EU-Batterieverordnung schafft somit einen rechtlichen Rahmen, der Anreize für die Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe bietet und den Einsatz von Sekundärrohstoffen in neuen Batterien unterstützt, birgt jedoch auch Herausforderungen bei der Umsetzung, insbesondere im Hinblick auf Kosten und technische Anforderungen [13].

3.2. Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategien

Neben den europaweiten Regelungen gibt es in Deutschland spezifische nationale Strategien, die darauf abzielen, die Kreislaufwirtschaft im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien zu fördern [15]. Die nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) setzt sich dafür ein, den Ressourcenschutz zu stärken und den Einsatz von recycelten Materialien zu fördern. In diesem Zusammenhang sind Hersteller, Importeure und Händler dazu verpflichtet, Batterien am Ende ihres Lebenszyklus zu sammeln und einem geeigneten Recyclingprozess zuzuführen. Zudem gibt es Förderprogramme, die die Entwicklung neuer Technologien und Verfahren im Bereich des Batterierecyclings unterstützen sollen. Ein weiterer Bestandteil der nationalen Strategie ist die Förderung von Forschungsprojekten zur Entwicklung von Second-Use-Anwendungen und innovativen Recyclingverfahren, die dazu beitragen sollen, den ökologischen Fußabdruck von Lithium-Ionen-Batterien weiter zu verringern. Zudem ist zu erwähnen, dass das Projekt von der Bayerischen Kreislaufwirtschaftsstrategie (BayKWS) unterstützt wird.

3.3. Internationale Vergleichsstudien

Im internationalen Vergleich zeigt sich, dass Europa, insbesondere Deutschland, eine Vorreiterrolle im Bereich der gesetzlichen Regelungen für die Kreislaufwirtschaft von Lithium-Ionen-Batterien einnimmt. Andere Regionen, wie beispielsweise Nordamerika und Asien, haben ebenfalls regulatorische Maßnahmen eingeführt, jedoch mit unterschiedlichen Schwerpunkten und Vorgaben.

In den Vereinigten Staaten liegt der Fokus verstärkt auf der industriellen Selbstverpflichtung. Die US-Regierung setzt auf freiwillige Vereinbarungen und Anreize für Unternehmen, um eine Kreislaufwirtschaft zu fördern, anstatt strikte Vorschriften zu erlassen. Dies hat dazu geführt, dass die Recyclingquoten variieren und stark von den Initiativen der jeweiligen Unternehmen abhängen. Gleichzeitig gibt es jedoch staatliche Förderprogramme, die Innovationen im Bereich des Batterierecyclings unterstützen.

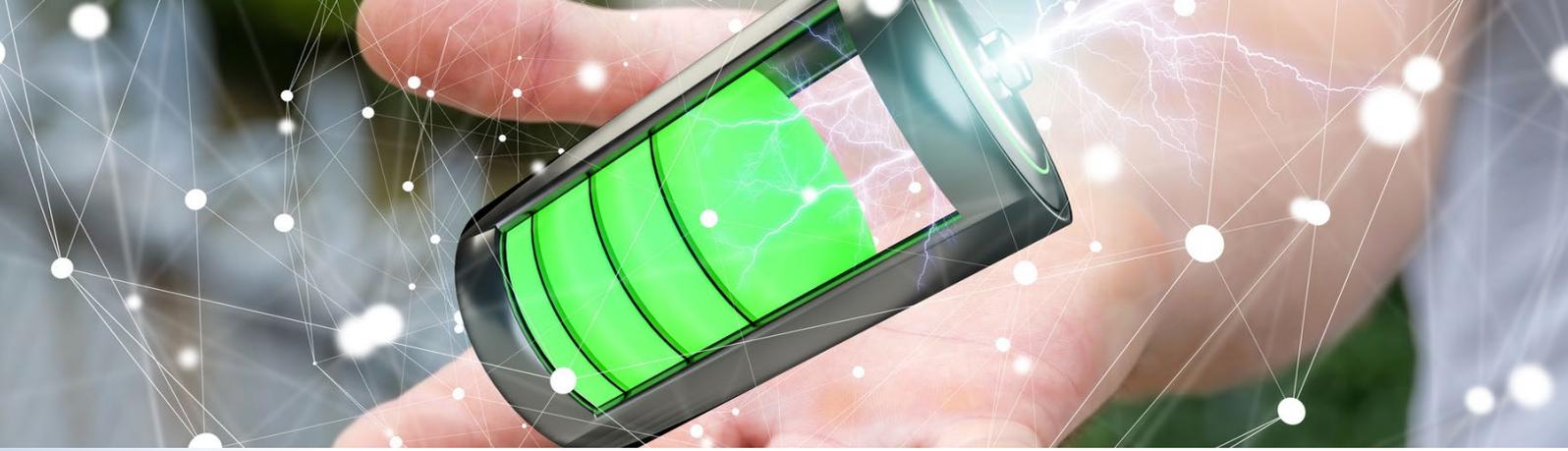
In China hingegen sind strenge Recyclingquoten und Rücknahmepflichten gesetzlich verankert. China hat klare Vorschriften für die Sammlung und das Recycling von Altbatterien eingeführt, um die Umweltauswirkungen zu minimieren und die Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe zu maximieren. Diese Vorschriften sind wesentlich strenger als in vielen anderen Ländern und stellen sicher, dass sowohl Hersteller als auch Verbraucher ihren Beitrag zur Kreislaufwirtschaft leisten. Durch diese strikte Regulierung ist China in der Lage, hohe Recyclingquoten zu erreichen und die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen für die Batterieproduktion zu sichern.

Auch innerhalb des EU-Raumes gibt es Unterschiede bei der Umsetzung der Batterieverordnung. Länder

wie Deutschland und Schweden gelten als Vorreiter, da sie bereits erhebliche Investitionen in den Ausbau von Recyclingkapazitäten und die Entwicklung innovativer Verfahren getätigt haben. Andere Länder, insbesondere im süd- und osteuropäischen Raum, stehen noch vor der Herausforderung, die notwendigen Infrastrukturen aufzubauen und die Vorgaben der EU-Batterieverordnung vollständig umzusetzen. Diese Unterschiede führen zu einer variierenden Effektivität der Kreislaufwirtschaft innerhalb Europas.

Ein interessantes Beispiel für Best Practices bietet Norwegen. Obwohl Norwegen nicht Mitglied der EU ist, hat es die Anforderungen der EU-Batterieverordnung freiwillig übernommen und setzt hohe Standards im Bereich der Sammlung und Wiederverwendung von Lithium-Ionen-Batterien um. Norwegen hat zudem ein effektives Pfandsystem eingeführt, das zu einer hohen Rücklaufquote von Altbatterien führt und als Vorbild für andere Länder dienen kann.

Die Analyse internationaler Strategien zeigt, dass es keine einheitliche Lösung für die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft für Lithium-Ionen-Batterien gibt. Europa setzt auf ambitionierte und verbindliche Standards, während andere Länder wie die USA eher auf freiwillige Initiativen setzen und China strenge regulatorische Maßnahmen durchsetzt. Für das CE:Bat-Projekt bieten diese unterschiedlichen Ansätze wertvolle Erkenntnisse, um Best Practices zu identifizieren und geeignete Maßnahmen für die bayerische Region zu entwickeln. Besonders die Kombination von Anreizen, strengen Vorschriften und Pfandsystemen könnte ein effektiver Ansatz sein, um die Kreislaufwirtschaft weiter zu stärken.



4. Second-Use-Anwendungen von Lithium-Ionen-Batterien

Second-Use-Anwendungen werden eine immer bedeutendere Rolle in der Kreislaufwirtschaft von Lithium-Ionen-Batterien spielen. Dabei geht es darum, Batterien, die in Ihrem ursprünglichen Anwendungsfeld nicht mehr ausreichend Leistung erbringen, in einem neuen Kontext zu nutzen, bevor sie einem finalen Recyclingprozess zugeführt werden. Für Second-Use Anwendungen können entweder direkt das Pack oder seine Komponenten (Module/ Zellen) weiterverwendet werden. Man spricht hier von Refurbish, Remanufacturing oder Repurpose.

Eine Batterie gilt typischerweise als verschlissen, wenn die Restkapazität nur noch 80% der ursprünglich angebotenen Kapazität entspricht.

Der allgemeine Zustand der Batterie wird auch als SoH – „State of Health“ bezeichnet. Er berücksichtigt auch den SOC – „State of Charge“, also die verbleibende Restkapazität. Der SOP – „State of Power“ sagt etwas über die Leistungsabgabefähigkeit aus. Gerade in der Anwendung im E-Fahrzeug muss eine Batterie beim Beschleunigen schnell ansprechen und hohe Ströme liefern. Mit sinkendem SoH liefert eine Batterie mit niedrigem SOP möglicherweise nicht ausreichend Leistung, was möglicherweise die Sicherheit beeinträchtigt. Der SOP wird durch den SoH, den internen Widerstand und die Temperatur beeinflusst.

In diesem Kapitel werden die Potenziale, Herausforderungen und regulatorischen Aspekte der Second-Use-Anwendungen untersucht.

4.1. Potenziale und Anwendungsfelder von Second-Use Speichern

Grundsätzlich unterscheiden sich Second Use Speicher nicht von Neuprodukten in ihren Geschäftsmodellen, wenn Sie die dafür notwendig Leistung und Kennzahlen noch erbringen.

Ein großes Potenzial für Second-Use-Batterien liegt im stationären Energiesektor. Hier können gebrauchte Batterien, die nicht mehr für den Einsatz in Elektrofahrzeugen geeignet sind, zur Speicherung von Überschussenergie aus erneuerbaren Quellen wie Wind- und Solarenergie verwendet werden. Diese Second-Use-Batterien bieten eine kostengünstige Möglichkeit, die Nutzungsdauer von Batterien zu

verlängern und gleichzeitig die Nachfrage nach neuen Speichersystemen zu reduzieren. Oft wird hierzu das gebrauchte Batteriemodul ohne weitere Veränderung als Stationärspeicher genutzt. Im besten Fall gibt der OEM die Kommunikationsschnittstelle mit dem Batteriemanagementsystem (BMS) frei.

Ein Beispiel für eine erfolgreiche Nutzung von Second-Use-Batterien im Energiesektor sind Netzspeicher, die als Puffer dienen, um Spannungsschwankungen auszugleichen und die Netzstabilität zu verbessern. Dadurch kann die Integration von erneuerbaren Energien in das Stromnetz erleichtert werden, was zu einer nachhaltigeren Energieversorgung beiträgt. Auch in Wohngebäuden und kleineren gewerblichen Anwendungen haben Second-Use-Batterien das Potenzial, eine erschwingliche Speicherlösung darzustellen. Dies ist allerdings noch nicht ein verbreitetes Geschäftsmodell sondern häufig eine individuelle Lösung. Der Markt für kommerzielle Second-Use Speicher ist noch sehr jung. Die Firma Fenecon eröffnete in 2024 ein Werk in Bayern und startet mit der Herstellung großer Energiespeichersysteme, die aus EV-Batterien hergestellt wurden [16].

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über mögliche Konzepte der Verwendung bei stationärer, quasistationärer und mobiler Anwendung.

4.2. Wirtschaftlichkeit und technische Herausforderungen

Trotz der Vorteile von Second-Use-Anwendungen gibt es auch einige Herausforderungen, insbesondere hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und dem Umgang mit den gebrauchten Batterien. Im Folgenden sind einige besonders wichtige und kostenrelevante Punkte aufgelistet.

Produktspezifische Herausforderungen zur Langlebigkeit: Im Automotivbereich gilt eine Batterie als verschlissen, wenn Sie nur noch 80% der Nominalkapazität bzw. des "State of Health" (SoH) erbringt. Oft werden in Batteriepacks Leistungsreserven vorbehalten, damit das Pack eine längere Lebensdauer hat. In Batteriepacks können auch häufig einzelne Module oder Zellen dafür sorgen, dass die Performance des gesamten Packs einbricht. Moderne Batteriemanagementsysteme (BMS) können inzwischen einzelne Zellen umgehen oder weniger belasten.

Systemunterschiede - Heterogenität der gebrauchten Batterien: Batterien unterscheiden sich je nach Hersteller, Chemie und Nutzungsprofil erheblich, was die Standardisierung von Second-Use-Speichersystemen erschwert. Dadurch sind umfassende Tests erforderlich, um die Restkapazität und Leistungsfähigkeit der Batterien zu bewerten, bevor sie in neuen Anwendungen genutzt werden können. Wenn die Daten über den Einsatz und Leistung der Batterie gemäß dem Battery Pass im BMS gespeichert werden, lassen sich schneller Aussagen zum möglichen weiteren Einsatz treffen. Projekte wie KlemA und ReALBatt.befassen sich mit einer besseren Lebensdauervorhersage und der Entwicklung energie- und kostensparender verbesserter Verfahren, bei denen wesentliche Zellkomponenten zurückgewonnen und in sogenannten Recyclat-Zellen wieder eingesetzt werden können [17][18][19].

Qualitätssicherung und Benchmarking mit Neuprodukten: Die Wiederaufbereitung von gebrauchten Batterien erfordert oft zusätzliche Investitionen in die Prüfung und Wiederaufarbeitung der Module, um sicherzustellen, dass sie den Sicherheitsstandards genügen. Diese Kosten können die Wirtschaftlichkeit

Netzangeknüpfte Anwendung

Perspektive des Anwenders	Perspektive des Anwenders	Speicherbetreiber		Ladelösungsanbieter	Quartiersbetreiber
Anwendung (Geschäftsmodelle)	Kurzzeitspeicher, Lastspitzenmanagement, PML	Teilnahme an den Märkten zur Netzstabilisierung	Kurzzeitspeicher zur Netzstabilisierung und Regulierung	Pufferspeicher, geringere Netzanschlussleistung, speziell DC	Leistungsmanagement unter den Einrichtungen

Off-grid Lösungen (mit Netzanbindung)

Perspektive des Anwenders	Private Haushalte / Kleinbetriebe		Betreiber kritischer Infrastruktur	Autarke Infrastruktur
Anwendung (Geschäftsmodelle)	Eigenverbrauchs-optimierung (PV)	Unterbrechungsfreie Stromversorgung	Notfallstromversorgung	Bsp.: Micromobilität

Off-grid Lösung (ohne Netzanbindung)

Anwendung (Geschäftsmodelle)	Versorgung von Events, Sondereinsätze	Baustellenstrom
------------------------------	---------------------------------------	-----------------

Industrielösungen

Anwendung (Geschäftsmodelle)	Wiederverwendung in Schwerlastfahrzeugen, Gabelstaplern, Traktoren, ...	Wiederverwendung in Autonomen Logistikfahrzeugen
------------------------------	---	--

Private und Kommerzielle Lösungen

Anwendung (Geschäftsmodelle)	Wiederverwendung in E-Bikes, Cargo-Bikes, Golfautos	Batteriewechselsysteme	Wiederverwendung in Autonomen Transportfahrzeugen
------------------------------	---	------------------------	---

Tabelle 1: Übersicht über die Anwendungen von Energiespeichersystemen: Auflistung der potenziellen Umsetzungen und Lösungen für den privaten und kommerziellen Bereich. Dabei wurden verschiedene Branchen und mit variablem Anforderungsprofil (stationär, mobil) berücksichtigt (nach [17]).

von Second-Use-Produkten beeinträchtigen, insbesondere im Vergleich zu Neuprodukten. Batterien, die aus Ihrem „First Purpose“ kommen, konkurrieren wirtschaftlich mit den Neuprodukten, die sich in Sachen Performance und Kosten stark verbessert haben.

Ökologisch-Wirtschaftliche Herausforderungen: Eine grundsätzlich zu beantwortende Frage bei der Betrachtung aller Aspekte gebrauchter Batterien ist auch, ob diese eher als Rohstoffquelle für effizientere Batterien dienen können oder die Second-Use Anwendung zu bevorzugen ist. Bei dem festgelegten Nutzen als Rohstoff wird die Verwendung für eine eventuell sinnvollere (effizientere) Anwendung „blockiert“. Batterien kommen also dann als Second Use Speicher in Frage, wenn die Refurbish oder Remanufacturing Kosten geringer sind als die Herstellungskosten neuer Batterien. Der Trend zu günstigeren und unkritischeren Zellchemien (z.B. LFP oder Natrium-Ionenakkumulatoren) begünstigen Second-Use Konzepte gegenüber dem Recycling. Moderne Zellchemien versprechen auch deutlich längere Lebensdauern (Zyklen) in der First Purpose Anwendung sowie in der Second Use Anwendung, was die Verwendung als solche wirtschaftlicher macht.

4.3. Gesetzliche Rahmenbedingungen für Second-Use

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für Second-Use-Anwendungen von Lithium-Ionen-Batterien sind noch in der Entwicklung. Die EU-Batterieverordnung sieht zwar die Förderung von Second-Use-Anwendungen vor, es fehlen jedoch klare Vorgaben zur Standardisierung und Zertifizierung von Second-Use-Batterien. Dies führt zu Unsicherheiten für Unternehmen, die in diesen Markt investieren möchten. Ansonsten gelten für Second Use Speicher die gleichen Sicherheitsanforderungen wie für neue Speicher. Die IEC 62619 regelt die „Sicherheitsanforderungen für Lithium-Akkumulatoren und -Batterien für die Verwendung in industriellen Anwendungen“ [20]. Sie empfiehlt auch die funktionale Sicherheit zu gewährleisten nach IEC 61508. Zudem sollte aufgrund der höheren Brandgefahr eine generische Risikoanalyse nach IEC 62061 gemacht werden [21]. Im Automotive-Bereich muss eine Gefahren- und Risikoanalyse nach ISO 26262 Part 3 erfolgen [22].

Eine wichtige regulatorische Frage ist die Definition des rechtlichen Status einer gebrauchten Batterie. Ist eine Batterie, die für eine Second-Use-Anwendung aufbereitet wurde, als Abfall oder als Produkt zu betrachten? Diese Unklarheit wirkt sich direkt auf die Genehmigungsprozesse und die rechtlichen Verpflichtungen der Unternehmen aus. Gebrauchte E-Fahrzeuge fallen unter die Altfahrzeugeverordnung, der Akku fällt nach der Batterieverordnung unter die Industriebatterien. Für Akkus sonstiger Herkunft gilt typischerweise die Verordnung für Elektrogeräte. Klare Richtlinien und Normen könnten dazu beitragen, den Markt für Second-Use-Batterien zu beleben und Investitionen in diesen Bereich zu fördern.

Darüber hinaus müssen auch Sicherheitsstandards und Qualitätsanforderungen definiert werden, um sicherzustellen, dass Second-Use-Batterien sicher betrieben werden können. Einheitliche Tests und Zertifizierungen würden nicht nur die Sicherheit verbessern, sondern auch das Vertrauen von Verbrauchern und Investoren in diese Technologie stärken. Ein von Versicherern anerkannter Messstandard würde die Wirtschaftlichkeit und die Marktakzeptanz deutlich verbessern.

Zusammenfassung der Vor- und Nachteile von Second-Use Anwendungen für Lithium-Ionen-Batterien

Unter Berücksichtigung der verschiedenen potenziellen Anwendungsfelder ergeben sich insbesondere im Stationärspeicherbereich ökonomische Vorteile für Seco Speicher.

Diese müssen aber auch mit den technisch-wirtschaftlichen Herausforderungen und gesetzlichen Gegebenheiten abgewogen werden [23].

Begünstigende Faktoren für die Verwendung von Traktionsbatterien als Second-use Speicher:

- Traktionsbatterien sind keine Hochstromanwendung
- Hohe Nachfrage an Stationärspeichern (und rechtlich vereinfacht)
- Hochlauf der Elektromobilität (privat/industriell)
- Große und modulare Stationärspeicher
(kleine müssen zuverlässig und wenig Wartungsintervalle haben, um wirtschaftlich zu bleiben)
- Standardisierte Batteriemanagementsysteme und Daten (Battery Pass)

Hemmende Faktoren:

- Kosten des "Remanufacturings" bzw. der Demontage
- Preiskonkurrenz zu günstigeren weiterentwickelten/ zukünftigen Batterien
- Quote an Recyclingmaterial für die zukünftige Zellproduktion
- Keine eindeutige Norm derzeit für den stationären Bereich (MiBZ Projekt, 2019) [17]
- Keine allgemeine anerkannte (normierte) Messmethode, die schnell geht, möglichst automatisiert und belastbar (versicherbar) die Restlebensdauer prognostiziert.



5. Recyclingprozesse und Technologien

Die Weiterentwicklung von Recyclingprozessen und -technologien ist von zentraler Bedeutung, um die Kreislaufwirtschaft von Lithium-Ionen-Batterien effizient zu gestalten. In diesem Kapitel werden verschiedene Recyclingverfahren vorgestellt und deren jeweilige Vor- und Nachteile analysiert.

5.1. Mechanische Recyclingverfahren

Mechanische Recyclingverfahren stellen oft den ersten Schritt im Batterierecycling dar. Dabei werden die Batterien physisch zerkleinert und die einzelnen Bestandteile durch verschiedene Trennverfahren (z.B. Magnetabscheidung, Windsichtung) separiert. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in seiner vergleichsweise geringen Komplexität und den niedrigen Kosten. Das Schreddern erfolgt häufig unter Schutzgas, um eine Entzündung der Materialien zu verhindern. Allerdings ist der Reinheitsgrad der gewonnenen Materialien oft geringer als bei anderen Verfahren, was die Weiterverwendung in neuen Batterien erschwert.

Die mechanische Zerkleinerung bietet jedoch den Vorteil, dass sie flexibel auf verschiedene Batteriezusammensetzungen angewendet werden kann. Auch wenn Batteriemodule z.B. wegen verklebter Zellen schwer demontierbar sind, können diese im gesamten geschreddert werden. Besonders wertvoll ist die Gewinnung der sogenannten "Schwarzmasse", die Lithium, Kobalt, Nickel und Mangan enthält. Diese muss allerdings in weiteren Verfahrensschritten aufbereitet werden, um die Metalle in einer für die Batterie-neuproduktion geeigneten Reinheit zu gewinnen.

5.2. Hydrometallurgische und pyrometallurgische Verfahren

In Ergänzung zu dem mechanischen Recyclingverfahren können chemische Verfahren wie die hydrometallurgische oder auch die pyrometallurgische Methode als zweiten Recyclingschritt eingesetzt werden, um Rohstoffe in der höchsten Reinheit zu erzielen. Aber auch ein direkter Einsatz ist bei diesen etablierten Methoden zur Gewinnung von Metallen aus gebrauchten Batterien möglich.

Beim hydrometallischen Verfahren werden die Schlacken oder geschredderten Batterien zur Lösung der Metalle in Säure oder andere chemischen Lösungen getaucht. Dieses Verfahren ermöglicht eine hohe Ausbeute und Reinheit der gewonnenen Metalle und ist daher insbesondere für die Rückgewinnung von Lithium, bzw. Lithiumcarbonat aus Lithium-Ionen-Batterien geeignet. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es unter milden Bedingungen (niedrige Temperatur) durchgeführt werden kann, was den

Energieverbrauch reduziert und die Umweltbelastung minimiert. Allerdings werden größere, aufwändige Anlagen und zu entsorgende Chemikalien benötigt, was wieder zur Umweltbelastung beiträgt.

Beim pyrometallurgischen Verfahren werden die Batterien in Hochöfen bei hohen Temperaturen eingeschmolzen, wodurch die Metalle wegen des unterschiedlichen Schmelzpunkts voneinander getrennt werden können. Restenergie in den Batterien kann den Energieaufwand zum Aufschmelzen verringern. Hierbei verbrennt das Lithium oder der Elektrolyt und dient zusätzlich als Brennstoff. Dieses Verfahren ist sehr effektiv, um Metalle wie Kobalt und Nickel zurückzugewinnen. Allerdings gehen Lithium, Mangan und andere wertvolle Elemente oft verloren, da sie in der Schlacke verbleiben und die Reinheit der Metalle geringer ist als beim hydrometallischen Verfahren. Die Schlacke müsste auch wieder aufwändig in weiteren Verfahren aufgetrennt werden. Das pyrometallische Verfahren bietet viele Einsatzmöglichkeiten, da es sehr robust gegenüber unterschiedlicher Zellchemien ist, wird aber wegen des hohen Energiebedarfs (hohe Temperaturen von 800 bis 1500°C), geringerer Qualität und Metallverlusten in der Schlacke und beim Verdampfen mittlerweile seltener eingesetzt.

5.3. Technologische Innovationen und Effizienzsteigerungen

Um die Wirtschaftlichkeit und Effizienz des Batterierecyclings weiter zu verbessern, sind technologische Innovationen notwendig. Neue Entwicklungen im Bereich der Direktrecycling-Verfahren, bei denen Batteriematerialien direkt zurückgewonnen und für die Herstellung neuer Batterien aufbereitet werden, bieten vielversprechende Ansätze. Diese Verfahren haben das Potenzial, den Energieverbrauch erheblich zu senken und gleichzeitig die Menge der gewonnenen Sekundärrohstoffe zu maximieren. Diese Verfahren eignen sich sehr gut direkt bei der Zellproduktion, da hier die verwendeten Materialien bekannt sind. Kathodenpulver oder die Metallfolien lassen sich in hoher Reinheit zurückgewinnen.

Beispiel ist die Elektrohydraulische Zerkleinerung, bei der mittels Spannungspulsen an Elektroden Schockwellen in einem Wasserbad erzeugt werden, die die verschiedenen Bestandteile der Batteriezellen an der Materialgrenze auftrennen können. Dieses Verfahren ist ein "Batch"-Prozess, der unter anderem am Fraunhofer ISC entwickelt wird und sowohl ein energiesparendes Pulssystem und ein Dauerprozess mit entsprechender Materialführung als Ziel verfolgt [24]. Die gewonnenen Produkte der festen Bestandteile, insbesondere die gewaschene Schwarzmasse stehen so einer weiteren Verwertung in reiner Form zur Verfügung.

Eine weitere Innovation ist der Einsatz von Robotik und Automatisierungstechnologien in der Demontage von Batteriepacks. Durch automatisierte Demontageprozesse können Batterien schneller und sicherer in ihre einzelnen Module zerlegt werden, wodurch die Effizienz des Recyclings gesteigert wird. Dies ist besonders wichtig, da die manuelle Demontage von Batteriepacks sehr zeitaufwändig und kostspielig ist. Mehrere Projekte an der RWTH Aachen wurden dazu in den Jahren 2024 und 2025 gestartet, unter anderem zur Schraubenerkennung und -entfernung bei Roboter unterstützter Demontage [25].

Auch die Erforschung neuer Elektrolyte und Batteriedesigns, die das Recycling erleichtern sollen, ist ein wichtiger Teil der aktuellen Entwicklungen. Batterien, die so konzipiert sind, dass sie am Ende ihres Lebenszyklus einfacher zerlegt und recycelt werden können, tragen wesentlich zur Verbesserung der Kreislaufwirtschaft bei.



6. Herausforderungen und Hemmnisse

6.1. Rücknahme und Sammlung von Altbatterien

Die Sammlung von Altbatterien stellt eine der größten Herausforderungen für die Kreislaufwirtschaft von Lithium-Ionen-Batterien dar. Trotz bestehender gesetzlicher Vorgaben zur Rücknahme und Entsorgung ist die Sammelquote in vielen Ländern noch unzureichend. Die Gründe hierfür können vielfältig sein:

- Fehlende Anreize für Verbraucher, ihre alten Batterien zurückzugeben
- Unzureichende Infrastruktur für die Sammlung
- Verwendung von Einwegprodukten, die als Fehlwürfe im Haushaltsmüll landen, wie z. B. Einweg-Verdampfer ("Vapes")
- Fehleinwürfe von Produkten in Papiertonnen oder anderen Mülltonnen, z. B. singende Postkarten, die Batterien enthalten, aber in Altpapiercontainern geworfen werden.

Die Einführung eines europaweiten Pfandsystems könnte hier eine Lösung darstellen. Ein solches System würde Verbraucher dazu motivieren, ihre Altbatterien zurückzugeben und gleichzeitig sicherstellen, dass diese dem Recyclingprozess zugeführt werden. Allerdings werden in diesem Zusammenhang noch Aspekte diskutiert, ab welcher Kapazität ein Batteriepfand sinnvoll ist und wie die Durchführung aussehen kann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass viele Batteriesysteme im Umlauf sind, auf die noch kein Pfand erhoben wurde. Zudem müssen die Sammelstellen besser vernetzt und die Logistik für den Transport von Altbatterien optimiert werden, um eine effiziente Sammlung sicherzustellen.

6.2. Lagerkapazitäten und Sicherheitsaspekte

Ein weiteres Problem stellen die begrenzten Lagerkapazitäten für Altbatterien dar. Lithium-Ionen-Batterien bergen aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften ein Sicherheitsrisiko, insbesondere bei unsachgemäßer Lagerung (z. B. bei Elektrolytaustritt oder unklarem Batteriezustand). Brände in Lagerhallen, die durch defekte Batterien verursacht werden, stellen ein erhebliches Risiko dar und führen zu hohen Kosten für Versicherungen und Betreiber.

Um diese Risiken zu minimieren, müssen strenge Sicherheitsstandards für die Lagerung von Altbatterien eingeführt werden. Dies umfasst die Schulung des Personals, das mit den Batterien arbeitet, sowie die Entwicklung sicherer Lagertechnologien. Eine mögliche Lösung sind spezielle Container, die so konzipiert sind, dass sie das Risiko von Kurzschlüssen und Bränden minimieren (z. B. Wasserbecken).

6.3. Wirtschaftliche Herausforderungen

Das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien ist ein kostenintensiver Prozess, der oft nur mit staatlicher Unterstützung wirtschaftlich betrieben werden kann. Die Preise für die zurückgewonnenen Materialien sind in der Regel nicht wettbewerbsfähig mit den Preisen für Primärrohstoffe, was die Verwendung von recycelten Materialien weniger attraktiv macht. Hier sind politische Maßnahmen erforderlich, um Anreize für den Einsatz von Sekundärrohstoffen zu schaffen, beispielsweise durch Steuervergünstigungen oder Quotenregelungen.

Zudem sind die Investitionen in die Recyclinginfrastruktur hoch. Es müssen neue Technologien entwickelt und bestehende Anlagen modernisiert werden, um die Effizienz zu steigern und die Kosten zu senken. Hier sind nicht nur finanzielle Mittel erforderlich, sondern auch die Bereitschaft der Industrie, in neue Prozesse zu investieren. Eine mögliche Lösung könnte in der Förderung von öffentlich-privaten Partnerschaften liegen, um die finanziellen Risiken für einzelne Unternehmen zu reduzieren.

In Vorbereitung sind Netzwerke, die sich um das Sammeln, die Logistik und einige Recyclingverfahren (hydro- bzw. pyrometallurgisch) entwickeln und hochskalieren können. Ein Beispiel ist das Netzwerk "ePunkt", das von LOGEX initiiert und koordiniert wird [26]. In diesem Netzwerk kommen die Logistikunternehmen und die Recyclingunternehmen zusammen, um eine effiziente Infrastruktur für ein flächendeckendes Rücknahmesystem und Recycling zu schaffen.

6.4. Grundsätzliche Fragen der Cluster zum Thema Batterierecycling und Ergebnisse der Interviews im Projekt CE:Bat

6.4.1. Schwerpunkte der Cluster zum Thema Batterierecycling

Da die drei beteiligten Cluster (der Umweltcluster, der Cluster Neue Werkstoffe und der Cluster Energie und Bau) unterschiedliche Fachschwerpunkte beinhalten, ergibt sich daraus auch jeweils ein anderer Fokus auf das Thema Batterierecycling:

- Umweltcluster: Welche Sorte Batterien und in welchem Zustand kommt auf den Wertstoffhöfen und bei den Recyclern an?
- Cluster Neue Werkstoffe: Welche Materialien sind in welcher Menge in der Produktion und im Recycling im Einsatz?
- Cluster Energie und Bau: Stehen Second-Life-Anwendungen zur Verfügung?

Beim Umweltcluster wird der Fokus auf die Analyse der auf den Wertstoffhöfen und bei den Recyclern angelieferten Batterien und deren Zustand gelegt. Gemäß dem Verband kommunaler Unternehmen (VKU) werden die Batterien in über 3.000 Wertstoffhöfen in Deutschland in verschiedenen Formaten und Zuständen angenommen. Typischerweise werden hier die kleinen Batterien (Knopf- und zylindrische Zellen) und Gerätebatterien (Handyakkus oder Batterien/Akkus aus verschiedensten Elektrogeräten) abgegeben. Dies ist grundsätzlich positiv zu bewerten, da auf diese Weise die Entsorgung der Batterien

über den Restmüll oder Schrott vermieden werden kann. Allerdings besteht hier auch ein erhöhtes Risiko für Fehlwürfe, insbesondere von durch Stöße schon beschädigten Batterien. Diese können zu Bränden führen und damit einen immensen Schaden verursachen. Die Zahl der Brände ist auffallend hoch, und die Versicherer verweigern zunehmend die Versicherung der Wertstoffhöfe [27]. Für die betroffenen Betriebe kann diese Situation als existenzbedrohend angesehen werden. Die hohen Versicherungsprämien und die hohen Investitionskosten für Brandüberwachungs- und Löschanlagen können sich die meisten Betriebe nicht leisten. Ebenso steigen die Kosten der Schulung für das Personal, das eine genauere Sortierung der Elektroaltgeräte und Alt-Batterien vornehmen muss.

Neben den kleinen Batterien und Gerätebatterien sind auch die Batterien/Akkus von Elektrofahrrädern zu erwähnen. Diese können im Fachhandel wieder abgegeben werden. Der Markt für EV-Batterien ist unübersichtlich, da die Automobilhersteller die Entsorgungskette für ihre eigenen Produkte teilweise intern abbilden in Bayern beispielsweise Audi und BMW mit Vertragspartnern. Die von Automobilverwertern gesammelten EV-Batterien gelangen jedoch auch in die Recyclingströme der Schwarzmasse. Unter den etwa 1700 Betrieben der Entsorgungswirtschaft gibt es Vertreter, die in den beschriebenen Verfahren mehr oder weniger viel Material im Bereich um 1000 bis 5000 t pro Jahr verwerten [28][29].

Die Fragestellungen bezüglich der Materialzusammensetzung sowie der Recyclingprozesse des Clusters Neue Werkstoffe werden zum Teil bereits in Kapitel 5 behandelt. Darüber hinaus existieren bereits gesetzliche Vorgaben für die Mengenproduktion und das Recycling bestimmter Metalle in der LIB-Technologie. Zudem werden feste Quoten für den Anteil an Rezyklat in neuen Produkten vorgeschrieben (Tabelle 2). Auch eine Recyclingquote der einzelnen Metalle aus Altbatterien wurde schon festgelegt. Die exakten Zahlen und Zeithorizonte wurden nach dem Inkrafttreten im Jahr 2024 weiter definiert. Die EU-Regulierung BATT2 zeigt, dass die Quoten für das Rezyklat von Blei (90 %) durch das etablierte Pfandsystem bereits heute realisierbar sind und belastbare Zahlen verfügbar sind. Im Fall der Metalle Kobalt, Kupfer, Nickel und Lithium ist demgegenüber ein Anstieg der Recyclingquoten zu erwarten. Dieser ist jedoch davon abhängig, dass ein ausreichendes Recycling der entsprechenden Materialien einsetzt.

Die vorliegenden regulatorischen Vorgaben unterstützen die Entwicklung eines Post-Consumer-Wertschöpfungsnetzwerks, das im Rahmen der Arbeiten zum Battery Pass beim VDI/VDE seit Jahren konzipiert wird. In einer 2018 durchgeführten Studie zur Regulierung wurden bereits wichtige Bereiche identifiziert, die heute noch in Bearbeitung sind und ein mögliches Kreislaufwirtschaftssystem für LIB entwickelt (Abbildung 4). Einige Punkte wie Recyclingeffizienz, Rückgewinnungsquoten und Datenerhebung für den BatteryPass (bzw. Product Pass) sind bereits in der EU-Batt2-Verordnung berücksichtigt.

Der Fokus des Clusters Energie und Bau lag auf Second-Life-Anwendungen und der Frage, inwieweit bereits ein klares Konzept vorliegt. Wie bereits in Kapitel 4 dargelegt, wurden bisher verschiedene Second-Life-Anwendungen angedacht und diskutiert, jedoch noch nicht umgesetzt. Dies liegt unter anderem an den noch nicht etablierten Faktoren der Herstellerverantwortung in der Entsorgungswirtschaft und den Anforderungen an eine sichere Zweitverwertung.

Recycling-Effizienz (min.) [%]	31.12.2025	31.12.2030
Blei-Säure-Batterien	75%	80%
Lithium-Batterien	65%	70%
Nickel-Cadmium-Batterien	80%	
Sonstige Altbatterien	50%	

Recycelte Menge [%]	31.12.2027	31.12.2031
Kobalt	90%	95%
Kupfer	90%	95%
Blei	90%	95%
Lithium	50%	80%
Nickel	90%	95%

Tabelle 2: EU-Batterieverordnung 2023: Zielvorgaben zur Recyclingeffizienz und zur stofflichen Verwertung [14]

6.4.2. Ergebnisse der Befragungen und Interviews im Projekt CE:Bat

Im Rahmen des Projektes CE:Bat wurden eine Ist-Analyse in einer Umfrage und Interviews mit relevanten Akteuren durchgeführt, um bestehende Herausforderungen zu identifizieren.

Um einen aktuellen Überblick über die Situation der Partnerunternehmen, Forschungseinrichtungen, Entsorger und Clustermitglieder zu erhalten, wurde ein Fragebogen erstellt, der im Zeitraum vom 14. Juli bis 30. September 2024 beantwortet werden konnte. Insgesamt 19 Teilnehmer aus verschiedenen Branchen (F&E, Entsorger, Recycler, Planungsbüros, Software und weitere Komponenten rund um Batterien) haben die Fragen ausführlich beantwortet. Inhaltlich wurden organisatorische Angaben zu den Teilnehmern, deren Bezug zur Kreislaufwirtschaft im Allgemeinen und deren Bezug bzw. Umfang zu LIB abgefragt. Darüber hinaus wurden die Teilnehmer gebeten, ihre Betroffenheit von Regularien und individuell auftretende Hemmnisse zu thematisieren. Außerdem gaben die Teilnehmer an, welche Themen und Stakeholdergruppen für sie im Rahmen eines Workshops von Interesse sind. Die teilnehmenden Partner wiesen eine gute Verteilung über die Beteiligungsfelder in der Wertschöpfungskette und auch unterschiedliche Größen (10 KMU, 9 Großunternehmen) auf, so dass ein repräsentativer Durchschnitt in den Antworten zu erwarten war. Im Rahmen des Projektes CE:Bat wurde nach einer Analyse der aktuellen Situation eine Umfrage durchgeführt und Interviews mit relevanten Akteuren geführt, um bestehende Herausforderungen zu identifizieren.

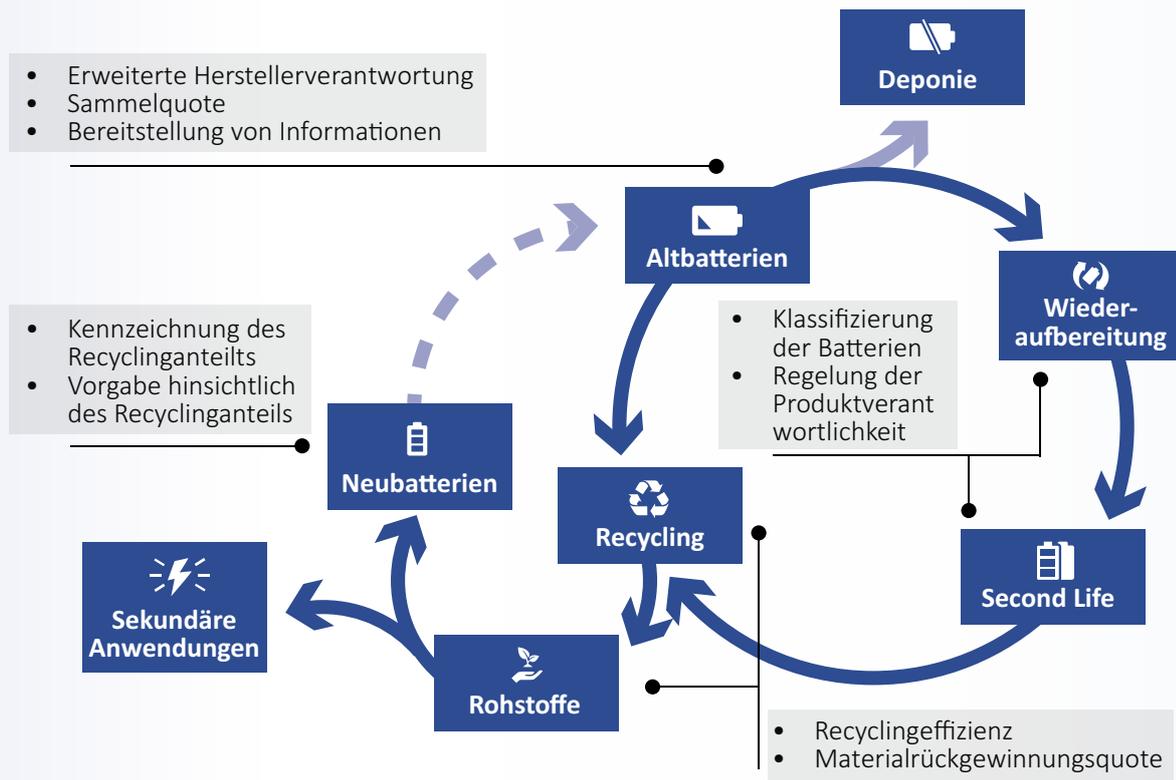


Abbildung 4: Darstellung der potenziellen Verwertungswege für Altbatterien und der regulatorischen Ansätze zur Förderung einer Kreislaufwirtschaft im Batteriesektor: Die hellgrauen Felder in der Abbildung stellen die in der VDI/VDE-Studie [30] erwähnten regulatorischen Maßnahmen zur Stärkung der Batteriekreislaufwirtschaft dar.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Batterie für die Geschäftsmodelle der Teilnehmenden von entscheidender Bedeutung ist und bei der Mehrheit bereits seit über fünf Jahren zum Einsatz kommt. Die Teilnehmer zeigen eine vielfältige Aktivität in verschiedenen Förderprojekten, aber auch den Wunsch, diese Aktivitäten auszubauen und haben daher den Bedarf nach einer Vernetzungsveranstaltung geäußert (siehe Abbildung 5). Die verschiedenen Regularien sind bereits ein Thema für die meisten Teilnehmenden, insbesondere der Battery Pass stößt auf Interesse.

Für alle Teilnehmenden ist die Kreislaufwirtschaft von Relevanz, wobei die Schwerpunkte der Umsetzung deutlich im Bereich ReUse bis ReCycle zu verorten sind (Abbildung 6). Auf etwa ein Drittel der Teilnehmenden treffen die verschiedenen R-Strategien auch angesichts Ihres eigenen Geschäftsumfelds und internen Struktur nicht zu. Erfreulicherweise setzen bereits zwei Drittel der Teilnehmenden die Strategien um bzw. planen deren Umsetzung.

Batteriebrände sind für alle Teilnehmenden von großer Bedeutung und stellen einige von ihnen vor Herausforderungen, wie bereits im Kapitel 6.2 erörtert.

Im Rahmen der Erörterung der Hindernisse für die Implementierung der Kreislaufwirtschaft gemäß der Teilnehmenden wurden folgende Punkte in der Zusammenfassung hervorgehoben:

Mit welchen gesetzlichen Rahmenverordnungen beschäftigen Sie sich aktiv im Unternehmen?

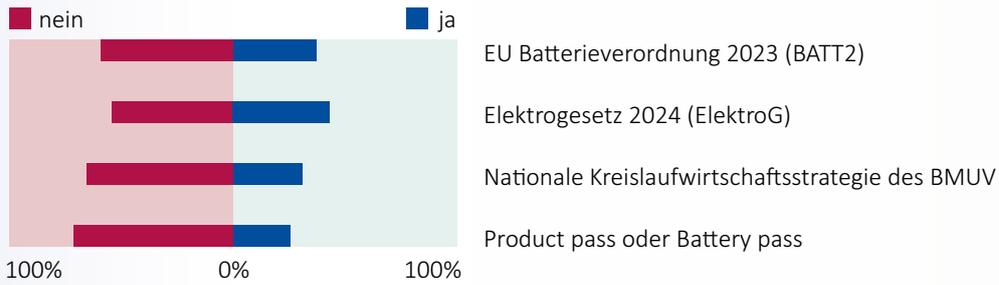


Abbildung 5: Umfrage zu der industriellen Umsetzung gesetzlicher Richtlinien

Welches der 10'R', der in der Kreislaufwirtschaft definierten Prozesse, berücksichtigen Sie in ihrem Unternehmen?

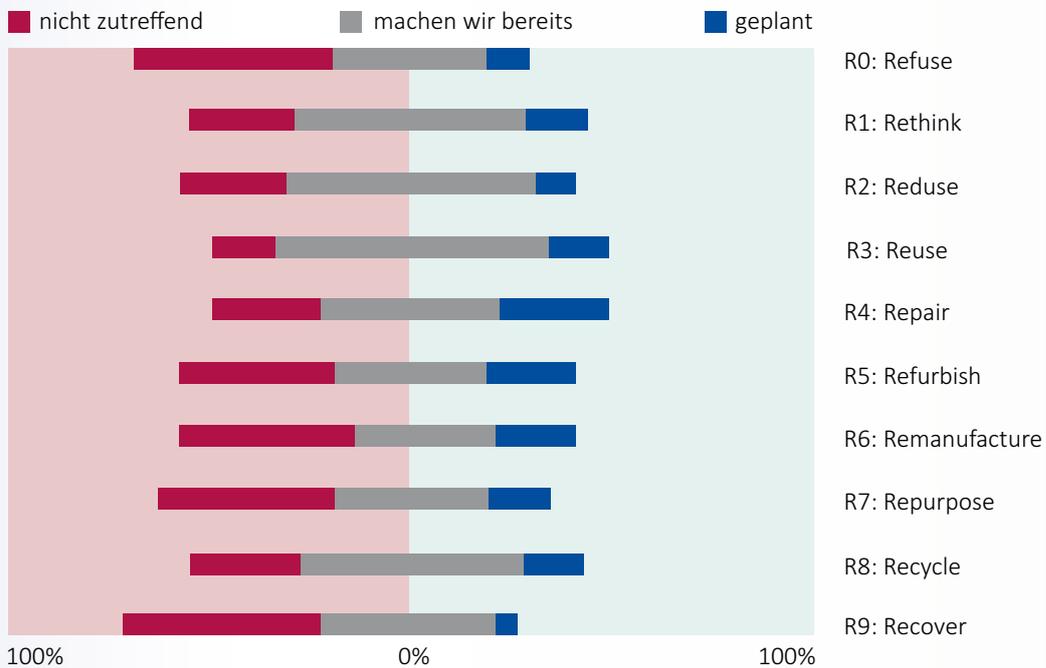


Abbildung 6: Umfrage der industriellen Umsetzung der R-Prozesse

1. Die rechtlichen Rahmenbedingungen stellen ein Hemmnis dar, weil sie noch zu viel Interpretationsspielraum lassen und dadurch im Augenblick zu viel Unsicherheit führen, obwohl eine Informationskampagne angeboten wird.
2. Zudem wurden eine reverse Logistik und ein funktionierendes und sicheres Sammelsystem für die verschiedenen Batterieklassen als erforderlich identifiziert. Eine vollständige Erfassung der Mengen und verwendeten Materialien ist ebenfalls nicht gegeben, was eine wirtschaftliche Verwertung von Altbatterien verhindert.
3. Darüber hinaus sind die Rücklaufmengen derzeit noch zu gering und zu heterogen, um einen stabilen Zustrom von Alt-Batterien für die Entsorger zu gewährleisten und hoch skalierte Verfahren

ökonomisch zu realisieren.

4. Fehlwürfe sind als Ursache für die Brandgefahr zu nennen und bedürfen einer geordneten Abfalltrennung am Wertstoffhof, welche von ausgebildeten Mitarbeitern übernommen werden sollte. Somit sind hohe Kosten bei den Sammelstellen wegen Brandvorsorge und Qualifikation zu erwarten, die gegenfinanziert werden müssen.
5. Ferner sind wirtschaftliche Recycling-Prozesse noch in der Entwicklungsphase, da die Batterien vor der Verwertung tiefentladen und zerlegt werden müssen, um möglichst wenig Vermischung von Materialien zu erhalten.
6. Darüber hinaus wurde das Argument der Skalierung und Flexibilität des Prozesses aufgrund schwankender Anteile in der Batteriechemie noch nicht umgesetzt, um einen ökonomischen Prozess zu etablieren.
7. Eine viel diskutierte Pfandlösung steht noch aus, um ein geordnetes Rücknahmesystem aufzubauen. Aufgrund der hohen Kosten für die in-Verkehr-Bringer, die das Pfand für die langlebigen Produkte hinterlegen müssten, sind in diesem Kontext ökonomisch verträgliche Lösungen zu suchen.

Darüber hinaus wurde die Evaluierung der Herausforderungen für die Bereitstellung rezyklierter Rohstoffe für die Produktion als relevant erachtet, da in der EU Batt2 feste Quoten gefordert sind (siehe Kapitel 6.4.). Es lässt sich festhalten:

1. Die voraussichtlich hohen Preise der teuer rezyklierten Materialien im Vergleich zu Primärmaterialien stellen die Hersteller vor Herausforderungen.
2. Für Wirtschaftlichkeit ist genügender Input für das Recycling und die Produktion von Batterien mit rezyklierten Materialien noch nicht absehbar. Derzeit sind spezifisch in Bayern (oder Europa allgemein) die Recyclingkapazitäten noch eher klein. Ein Aufbau einer verlässlichen Lieferkette aus Recycling-Rohstoffen ist so nicht gewährleistet.
3. Eine Dokumentation von Informationen (Status, Reinheit, Menge) der Altbatterien und Austausch mit den Herstellern und Verwertern ist noch nicht etabliert. Eine Digitalisierung der Produkte und Hinterlegung von Produktdaten ist daher unerlässlich, um eine optimale wirtschaftliche Arbeitsweise der Verwerter zu gewährleisten.
4. Die Verordnung EU BATT2 (Rechtlicher Rahmen) lässt durch noch festzulegende genaue Grenzwerte zu bestimmten Zeitpunkten keinen sicheren Zeithorizont für den Start eines ökonomischen Batterie-recyclings zu.

Im Anschluss an die Umfrage folgten ergänzende Interviews mit Partnern, die ihre Bereitschaft dazu zuvor geäußert hatten. Diese fanden im Zeitraum 1.11.2024 bis 30.11.2024 statt. Es wurden insgesamt sieben Interviews mit Beteiligten aus verschiedenen Bereichen der Wertschöpfungskette geführt.

Die Ergebnisse dieser Interviews bestätigten die Umfragerückmeldungen:

1. Die Situation in der LIB-Wertschöpfung und im Recycling ist komplex und erfordert ein Zusammenspiel verschiedener Branchen der Wirtschaft sowie Vertreter der Abfallwirtschaft, der Kommunen, der Politik und der Forschung. Die sektorübergreifenden Netzwerkstrukturen der beteiligten Cluster setzen genau hier an – als Brückenbauer und Moderatoren für ein funktionierendes, branchenübergreifendes Ökosystem.
2. Zudem herrscht in der Recycling-Branche Unsicherheit aufgrund der unklaren langfristigen Strategie der Politik (Land, Bund und EU) für eine Handhabung der LIB im Sinne der Kreislaufwirtschaft. Es mangelt an genauen Klassifikationen der Batterie-Abfallbestandteile sowie an Handlungsstrategien für den Umgang mit den prognostizierten steigenden Alt-Batterie-Mengen, die durch die zunehmende Elektrifizierung des Alltags und des Verkehrs entstehen. Eine vom Bund Ende 2024 verabschiedete Kreislaufwirtschaftsstrategie bildet als Rahmen einen ersten Schritt.
3. Ein ähnlicher Punkt ist die noch unklare bzw. ungelöste Gesetzeslage für LIB-Abfälle (auch im Transfer über Landesgrenzen hinweg) und für sichere Second-Life Anwendungen. Hier sind einfache, schnelle und sichere Testverfahren für EoL-Batterien sowie eine Klärung der Gewährleistungsbedingungen und weiterer Verantwortung für Second-Life-Anwendungen gefragt.
4. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass kein Großhersteller für LIB in Bayern aktiv ist, der als Nachfrage für Rohstoffe aus dem Kreislauf dienen könnte. Es wurde kein "Kreislauf der Materialien" bemängelt, der für einen wirtschaftlichen Antrieb sorgt und Rezyklate in größeren Mengen wie in der EU Batt2 vorgesehen für die eigene Produktion benötigt. Somit fehlt ein wichtiger Anreiz für das Materialrecycling, so dass die Ansiedlung von Batterieproduktion in Bayern für das Erstarren einer Kreislaufwirtschaft für LIB erleichtert werden könnte.

Am 3.12.2024 fand als abschließende Veranstaltung im Projekt am Fraunhofer ISC in Würzburg ein eintägiger Workshop mit 17 Teilnehmenden statt. Die Teilnehmenden stammten zum größten Teil aus dem schon befragten Stakeholder-Kreis. Im Rahmen des Workshops wurde das bis dahin recherchierte Thema LIB Kreislaufwirtschaft vorgestellt und die genannten Diskussionspunkte vertieft. Es stellten sich auch der Geschäftsführer Dr. Andreas Bittner des "Direct-Recycling" Start-ups "CellCircle" und Dr. Oleksander Gryshkov von "Niedersachsen.Next" vor und erläuterten das Planspiel der Batterie-Kreislaufwirtschaft Niedersachsen. Herr Dr. Andreas Flegler vom Fraunhofer ISC ermöglichte zudem eine Besichtigung der Kleinserien-Herstellung von LIB (basierend auf Lithium-Eisenphosphat (LFP)) für experimentelle Untersuchungen von eingesetzten Rezyklaten in der Produktion.

Die Erkenntnisse aus den Umfragen und Interviews wurden in Kapitel 7 in konkrete Handlungsempfehlungen für Industrie und Politik umgesetzt.



7. Handlungsempfehlungen für Politik und Wirtschaft

Um die Kreislaufwirtschaft von Lithium-Ionen-Batterien nachhaltig zu fördern, sind umfassende Maßnahmen erforderlich, die sowohl die Politik als auch die Wirtschaft betreffen. In diesem Kapitel werden verschiedene Handlungsempfehlungen gegeben, die auf den zuvor diskutierten Herausforderungen und Potenzialen basieren.

7.1. Einführung eines europaweiten Pfandsystems

Die Einführung eines europaweiten Pfandsystems für Lithium-Ionen-Batterien wird als eine Möglichkeit diskutiert, die Rücklaufquoten zu erhöhen und eine effiziente Kreislaufwirtschaft zu fördern. Ein solches System könnte dazu beitragen, die illegale Entsorgung von Batterien zu reduzieren und deren Rückführung in den Recyclingkreislauf zu verbessern. Erfahrungen aus anderen Bereichen, wie dem Pfandsystem für Einweggetränkeverpackungen, zeigen, dass wirtschaftliche Anreize Verbraucher dazu motivieren können, gebrauchte Produkte zurückzugeben. Der Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Kreislaufwirtschaft (BDE) fordert daher ein Pfand von 50 Euro für Batterien ab einer Spannung von 9 Volt, um Verbraucher zur Rückgabe zu motivieren und die Brandgefahr durch unsachgemäß entsorgte Batterien zu reduzieren [31].

Die Einführung eines Pfandsystems ist jedoch nicht unumstritten. Kritiker argumentieren, dass ein solches System erhebliche logistische und wirtschaftliche Herausforderungen mit sich bringt. So ist zu klären, wie ein europaweites System mit den bestehenden nationalen Rücknahmestrukturen kompatibel gemacht werden kann. Zudem könnten zusätzliche Kosten für Hersteller und Händler die Marktstruktur beeinflussen und insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen vor große Herausforderungen stellen. Auch die technische Umsetzung, insbesondere die Rückerstattung des Pfands und die Rückverfolgbarkeit von Batterien, ist mit erheblichem administrativem Aufwand verbunden.

Ein weiterer Diskussionspunkt ist die Frage, ob ein Pfandsystem tatsächlich die effektivste Maßnahme zur Förderung der Batterie-Kreislaufwirtschaft ist oder ob alternative Modelle, wie beispielsweise verpflichtende Herstellerverantwortungsprogramme, zielführender sein könnten. Einige Akteure fordern ein einheitliches, verpflichtendes System für ganz Europa, andere bevorzugen eine dezentrale Lösung, die sich an nationalen Gegebenheiten orientiert. Die Bundesregierung hat sich beispielsweise gegen

ein Pfandsystem für Lithium-Ionen-Batterien entschieden, da die Vielzahl unterschiedlicher Batteriearten eine organisatorische und praktische Umsetzung erschweren würde. Stattdessen setzt sie auf die Verpflichtung der Hersteller zur Rücknahme und ordnungsgemäßen Entsorgung [32].

Angesichts dieser kontroversen Debatte ist es entscheidend, eine fundierte Kosten-Nutzen-Analyse durchzuführen und verschiedene Umsetzungsmodelle zu evaluieren. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Politik, Industrie und Wissenschaft ist notwendig, um ein System zu entwickeln, das ökologisch sinnvoll, wirtschaftlich tragfähig und praktikabel ist.

7.2. Förderung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten

Um die Effizienz der Recyclingprozesse zu steigern und innovative Technologien für die Wiederverwendung von Lithium-Ionen-Batterien zu entwickeln, ist eine verstärkte Förderung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten notwendig. Hierzu zählen sowohl die Erforschung neuer Recyclingverfahren, die eine höhere Ausbeute an Sekundärrohstoffen ermöglichen, als auch die Entwicklung von Technologien, die die Wiederverwendung von gebrauchten Batterien erleichtern.

Ein besonderer Fokus liegt auf der Weiterentwicklung hydrometallurgischer Verfahren, die eine besonders hohe Rückgewinnungsrate ermöglichen und durch gezielte F&E-Projekte weiter optimiert werden sollten. Ein weiterer wichtiger Forschungsschwerpunkt liegt in der Entwicklung automatisierter Demontageverfahren, um die Effizienz des Recyclings zu steigern. Öffentliche Fördermittel und steuerliche Anreize können eine zentrale Rolle spielen, um Unternehmen dazu zu bewegen, in innovative Lösungen zu investieren.

Die Investitionen in das Batterierecycling nehmen weltweit erheblich zu, um den steigenden Bedarf an nachhaltigen Lösungen für die Elektromobilität zu decken. Im Jahr 2024 wurde der globale Markt für Batterierecycling auf 25,52 Milliarden US-Dollar geschätzt und soll bis 2032 auf 298,72 Milliarden US-Dollar anwachsen. In Europa sind erhebliche Investitionen geplant, um die Recyclingkapazitäten auszubauen. Ein Beispiel ist das deutsche Start-up Cylib, das von den Unternehmen Porsche und Bosch unterstützt wird und den Bau einer Batterierecyclinganlage in Dormagen, Nordrhein-Westfalen, mit einer Kapazität von 30.000 Tonnen Altbatterien pro Jahr plant. Die Anlage soll 2026 in Betrieb gehen [33]. Diese Entwicklungen unterstreichen die globalen Bemühungen, durch erhebliche Investitionen in das Batterierecycling eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu fördern und die Abhängigkeit von Primärrohstoffen zu reduzieren.

7.3. Einrichtung eines Kompetenzzentrums zur Kreislaufwirtschaft

Ein weiteres Element der Handlungsempfehlungen ist die Einrichtung eines Kompetenzzentrums für die Kreislaufwirtschaft von Lithium-Ionen-Batterien. Ein solches Zentrum könnte als zentrale Anlaufstelle für Unternehmen, Forschungseinrichtungen und öffentliche Institutionen fungieren, um den Wissensaustausch und die Entwicklung gemeinsamer Standards zu fördern.

Das Kompetenzzentrum könnte auch Schulungen und Workshops anbieten, um die Akteure der Wertschöpfungskette über die neuesten Entwicklungen im Bereich der Kreislaufwirtschaft zu informieren. Zudem könnte es als Plattform dienen, um Best Practices auszutauschen und Kooperationen zwischen verschiedenen Akteuren zu fördern. Ein solcher Wissens- und Erfahrungstransfer ist entscheidend, um die Kreislaufwirtschaft auf breiter Basis zu etablieren und die Akzeptanz von Second-Use-Anwendungen sowie Recyclinglösungen zu erhöhen.

7.4. Verbesserung der rechtlichen Rahmenbedingungen

Die bestehenden rechtlichen Rahmenbedingungen sollten weiterentwickelt werden, um die Kreislaufwirtschaft zu stärken. Hierzu zählt insbesondere die Harmonisierung der nationalen Regelungen innerhalb der Europäischen Union. Dies würde den Unternehmen Planungssicherheit geben und die grenzüberschreitende Zusammenarbeit erleichtern. Eine solche Harmonisierung könnte dazu beitragen, die Effizienz der Recyclingprozesse zu steigern und den Aufbau einer einheitlichen Infrastruktur zu unterstützen.

Darüber hinaus sind klare Definitionen für den rechtlichen Status von gebrauchten Batterien erforderlich, um Unsicherheiten bezüglich ihrer Behandlung und Entsorgung zu vermeiden. Die Einführung einheitlicher Standards und Zertifizierungen für Second-Use-Batterien würde ebenfalls dazu beitragen, das Vertrauen der Verbraucher zu stärken und die Akzeptanz solcher Anwendungen zu erhöhen.

7.5. Förderung von öffentlichen Beschaffungsprogrammen

Ein wichtiger Hebel zur Förderung der Kreislaufwirtschaft ist die öffentliche Beschaffung. Staatliche Institutionen sollten bei ihren Ausschreibungen vermehrt auf Produkte setzen, die recycelte Materialien enthalten oder aus Second-Use-Batterien bestehen. Durch diese gezielte Nachfrageförderung kann der Markt für Sekundärrohstoffe und wiederverwendbare Batterien gestärkt werden, was wiederum die Attraktivität von Recyclinglösungen erhöht.

Öffentliche Beschaffungsprogramme könnten beispielsweise Anforderungen an die Mindestquote recycelter Rohstoffe in Batterien definieren oder Produkte mit einer nachgewiesenen Nachhaltigkeitsbilanz bevorzugt beschaffen. Diese Maßnahmen würden nicht nur den Markt für recycelte Materialien stimulieren, sondern auch ein wichtiges Signal an die Industrie senden, dass nachhaltige Produkte gefördert werden.

7.6. Öffentlichkeitsarbeit und Sensibilisierung der Verbraucher

Neben politischen und wirtschaftlichen Maßnahmen ist auch die Sensibilisierung der Verbraucher von entscheidender Bedeutung. Nur durch die Aufklärung der Verbraucher über die Bedeutung der Kreislaufwirtschaft und deren aktive Beteiligung kann das volle Potenzial des Recyclings ausgeschöpft werden. Öffentlichkeitskampagnen sollten sich daher darauf konzentrieren, die Vorteile der Rückgabe von Altbatterien hervorzuheben und das Bewusstsein für die ökologischen Vorteile der Kreislaufwirtschaft zu stärken.

Zudem sollten Kooperationen mit Schulen, Universitäten und anderen Bildungseinrichtungen frühzeitig initiiert werden, um junge Menschen bereits in der Schul- und Universitätszeit für das Thema zu sensibilisieren. Bildungskampagnen und Informationsveranstaltungen tragen dazu bei, das Wissen über die Kreislaufwirtschaft in der breiten Bevölkerung zu verankern und die Bereitschaft zur Teilnahme an Sammelprogrammen zu erhöhen.



8. Fazit

Die Kreislaufwirtschaft von Lithium-Ionen-Batterien ist ein wichtiger Baustein für eine nachhaltige Energiezukunft. Die Herausforderungen, die mit der Sammlung, Wiederverwendung und dem Recycling von Batterien verbunden sind, erfordern ein gemeinsames Handeln von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Ein europaweites Pfandsystem, die Förderung von F&E-Projekten, die Einrichtung eines Kompetenzzentrums und die Verbesserung der rechtlichen Rahmenbedingungen sind dabei von entscheidender Bedeutung, um die Kreislaufwirtschaft maßgeblich zu stärken.

Eine ganzheitliche Herangehensweise, die alle Akteure der Wertschöpfungskette einbezieht, ist erforderlich, um die Nutzung von Sekundärrohstoffen zu maximieren und die Umweltauswirkungen der Batterieproduktion zu minimieren. Die vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen bieten einen klaren Fahrplan, um die Kreislaufwirtschaft von Lithium-Ionen-Batterien in Europa erfolgreich zu etablieren und langfristig die Ressourceneffizienz zu verbessern.

Es hat sich gezeigt, dass die Cluster in Bayern eine sehr geeignete Plattform für die Vernetzung in diesem Technologieübergreifenden Feld der Kreislaufwirtschaft für LIB bilden. Gemeinschaftlich lässt sich so die Öffentlichkeitsarbeit und die Aufmerksamkeit der Verbraucher zu dem Thema vielfältiger aufbauen. Die Kompetenzen und das Know-how der Mitglieder aus verschiedenen Branchen können durch gemeinsame Veranstaltungen initiiert durch die Cluster ein breiteres Publikum ansprechen.

9. Quellenverzeichnis

[1] Zanoletti et al, Batteries, 2024, Open Source Review, URL: <https://www.mdpi.com/2313-0105/10/1/38>

[2] Fraunhofer ISE , URL: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/lithium-ionen-batterie-recycling-europa-kapazitaeten-update-2024.html>

[3] International Energy Agency, URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-vehicle-batteries>

[4] VDI Broschüre: URL: <https://www.dke.de/resource/blob/2229314/e51b2fd920cc239ad-1ca0bc1b3a87395/deutsche-normungsroadmap-circular-economy-data.pdf>

[5] Fraunhofer ISI, URL: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/recycling-lithium-ionen-batterien-europa-starke-zunahme-2030-2040.html>

[6] BloombergNEF, " URL: <https://about.bnef.com/blog/1h-2023-energy-storage-market-outlook/>

[7] European Environment Agency URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/batteries_en#statistics

[8] Kraftfahrt-Bundesamt, URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz14_n_uebersicht.html?nn=3514348

[9] European Commission, URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act_en

[10] European Environment Agency, URL: <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/analysis-of-supply-chain-challenges-49b749>

[11] Fraunhofer ISI, URL: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2021/VDMA_Kurzstudie_Batterierecycling.pdf

[12] Stena, URL: <https://www.stenarecycling.com/de/news-einblicke/newsroom/2022/the-swedish-energy-agency-supports-stena-recyclings-major-investment-in-battery-recycling/>

[13] IW, URL: <https://www.iwkoeln.de/studien/cornelius-baehr-thilo-schaefer-umsetzung-der-eu-batterie-verordnung-in-deutschland.html>

[14] EU Verordnung, URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A32023R1542>

[15] BMUV, URL: <https://www.bmuv.de/themen/kreislaufwirtschaft/kreislaufwirtschaftsstrategie>

[16] Fenecon: URL: <https://fenecon.de/en/carbatteryrefactory/>

[17] Vortrag von Dr. Jostes zu "Zweites Leben für Lithium-Ionen-Batterien – technische und regulatorische Herausforderungen", im Rahmen des MiBZ-Projektes. URL: [Zweites Leben für Lithium-Ionen-Batterien,](#)

MiBZ-Projekt: URL: <https://mibz.automotive.oth-aw.de/index.php> Oder via: https://www.researchgate.net/publication/308022452_CoFAT_2016_-_Second-Life_Battery_Applications_-_Market_potentials_and_contribution_to_the_cost_effectiveness_of_electric_vehicles

[18] Projekt KlemA: URL: <https://batterie-2020.de/projekte/forschungsfelder/second-use-und-recycling/klema-bessere-lebensdauervorhersage/>

[19] Projekt ReALBatt,: URL: <https://batterie-2020.de/projekte/forschungsfelder/second-use-und-recycling/realbatt-ein-zweites-leben-fuer-wertstoffe/>

[20] Blog zum Inhalt der Norm, URL: <https://www.iec.ch/blog/iec-publishes-standard-battery-safety-and-performance>

[21] Normen zur Maschinensicherheit: URL: <https://www.elektrotechnik.vogel.de/die-drei-standards-der-maschinensicherheit-en-iso-13849-en-62061-und-iec-61508-a-394828/>

[22] White Paper von Rohm Semiconductor zu Norm ISO 26262, URL: https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/white_paper/iso26262_wp-e.pdf

[23] Ffe-Energietage: URL: <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/der-weg-zu-zirkulaeren-geschaeftsmodellen-fuer-elektrofahzeugbatterien/>

[24] Fraunhofer Institut ISC, URL: <https://www.isc.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/pressearchiv/pressearchiv-2016/effiziente-wiederverwertung-von-lithium-ionen-batterien.html>

[25] Projekt der RWTH Aachen zu Robotik und Automatisierung für das Recycling von EV-Batterien: URL: <https://blog.rwth-aachen.de/robotik/automatisierte-robotische-demontage-schraubenerkennung-und-entfernung-fuer-das-recycling-von-ev-batterien/>

[26] Netzwerk E-Punkt: URL: <https://www.epunkt.online/>

[27] Feuergefährlichkeit von Batterien: URL: <https://www.euwid-recycling.de/e-paper/45-2024/>

[28] Statistiken zu Verwertern, URL: <https://de.statista.com/>

[29] Schwarzmasse im Batterierecycling, URL: <https://www.faz.net/asv/die-suche-nach-der-schwarz-masse-17390138.html>

[30] Nachhaltigkeit der Batteriezellfertigung in Europa, S. 29, Abbildung 6, Analyse II/21, VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, URL: https://vdivde-it.de/sites/default/files/document/Studie_Nachhaltigkeit_der_Batteriezellfertigung_in_Europa.pdf

[31] Artikel von Energyload: Pfand für Batterien, URL: <https://energyload.eu/stromspeicher/pfand-akkus/>

[32] Entscheidung über ein Pfandsystem für Altbatterien, URL: <https://www.bundestag.de/presse/hib/kurzmeldungen-1029552>

[33] Artikel im Handelsblatt: URL: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/cylib-bosch-und-porsche-investieren-in-dieses-batterie-recycling-start-up/100037106.html>

Umweltcluster Bayern

Der Umweltcluster Bayern vernetzt Unternehmen, Forschungseinrichtungen, Kommunen und Politik, um gemeinsam innovative Umwelttechnologien voranzutreiben. Seit 2006 bündelt der Cluster Kompetenzen in den Bereichen Abfall und Recycling, Wasser und Abwasser, Luftreinhaltung sowie alternative Energiegewinnung. Er organisiert regelmäßig Workshops, Projekte und Veranstaltungen, um den Wissenstransfer und die Zusammenarbeit in der bayerischen Umweltbranche zu fördern.

FACHLICHE KOORDINATION

Stefan Meier, Cluster Neue Werkstoffe, Bayern Innovativ GmbH

Dr. Monika Voigt, Cluster Neue Werkstoffe, Bayern Innovativ GmbH

Leonard Höcht, Energie & Bau, Bayern Innovativ GmbH

Dr. Stefan Riegg, Umweltcluster Bayern e. V.

KONTAKT

info@bayern-innovativ.de

Impressum

© Bayern Innovativ GmbH

Stand: Mai 2025

HERAUSGEBER

Bayern Innovativ GmbH

Am Tullnaupark 8

90402 Nürnberg

+49 911 20671-0

info@bayern-innovativ.de

www.bayern-innovativ.de

GESCHÄFTSFÜHRER

Dr. Rainer Seßner

BILDNACHWEISE

iStock@da-kuk

AdobeStock@PRI_KI

AdobeStock@Blue Planet Studio

AdobeStock@Sergii Chernov

Fotolia@sdecoret

iStock@Petmal

AdobeStock@sommart

iStock@pielberg

iStock@Just_Super

Die Bayern Innovativ GmbH ist seit ihrer Gründung im Jahr 1995 wichtiger Bestandteil der Innovationspolitik des Freistaats Bayern. Vision der Gesellschaft ist ein Bayern, in dem jede tragfähige Idee und Technologie zur Innovation wird.

Neben der Organisation von Innovationsnetzwerken in den sieben Bereichen Digitalisierung, Energie & Bau, Gesundheit, Material & Produktion, Mobilität, Sicherheit sowie Kreativwirtschaft bietet Bayern Innovativ seinen Kundinnen und Kunden ein umfangreiches Beratungsangebot. Dieses umfasst Innovationsservices für ein erfolgreiches Technologie- und Innovationsmanagement, zum Patentwesen, zur Teilnahme an internationalen Innovations- und Kooperationsprojekten, als Projektträger mehrerer bayerischer Förderprogramme und zu Fragen rund um Gründung und Förderung.

Für einen optimalen Wissenstransfer organisiert Bayern Innovativ hochkarätige Kongresse, Arbeitskreise, Workshops, Coachings und weitere Events. Der „Gemeinschaftsstand Bayern Innovativ“ öffnet Unternehmen und Forschungseinrichtungen kostengünstig das Tor zu internationalen Leitmessen.

Im Fokus unserer Aktivitäten stehen insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) und Start-ups.

www.bayern-innovativ.de

