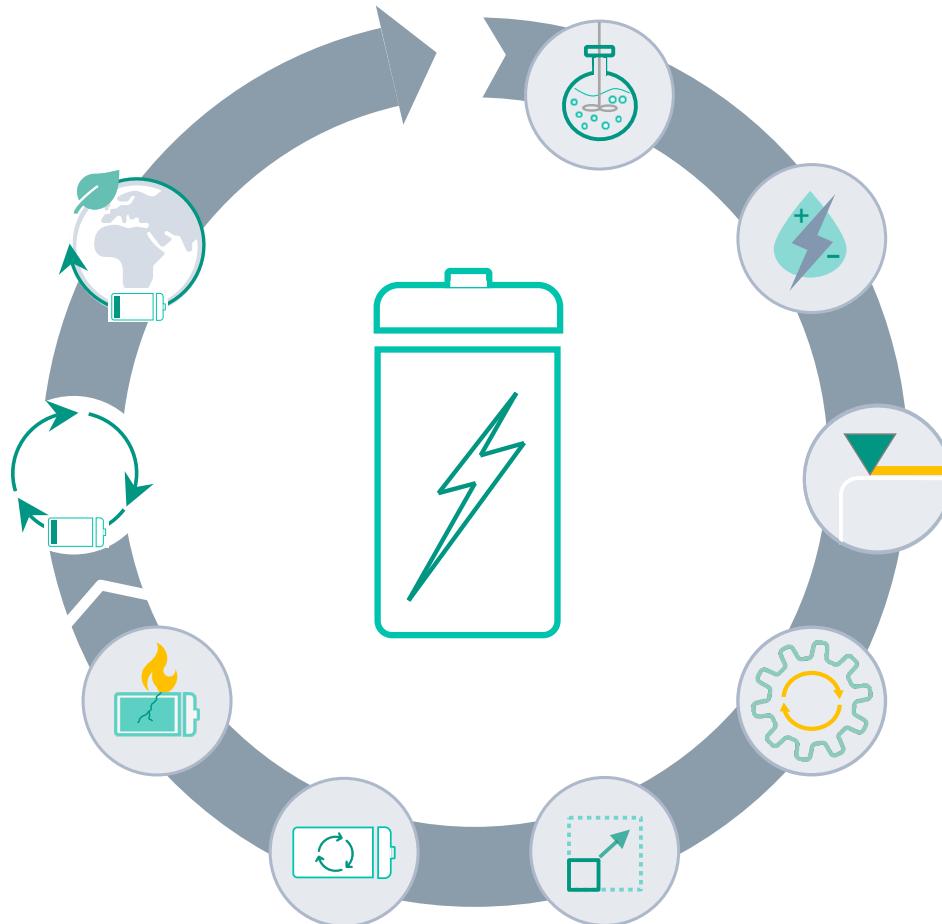




Für eine wettbewerbsfähige und nachhaltige Batteriewertschöpfungskette in Europa „Batterierecycling“

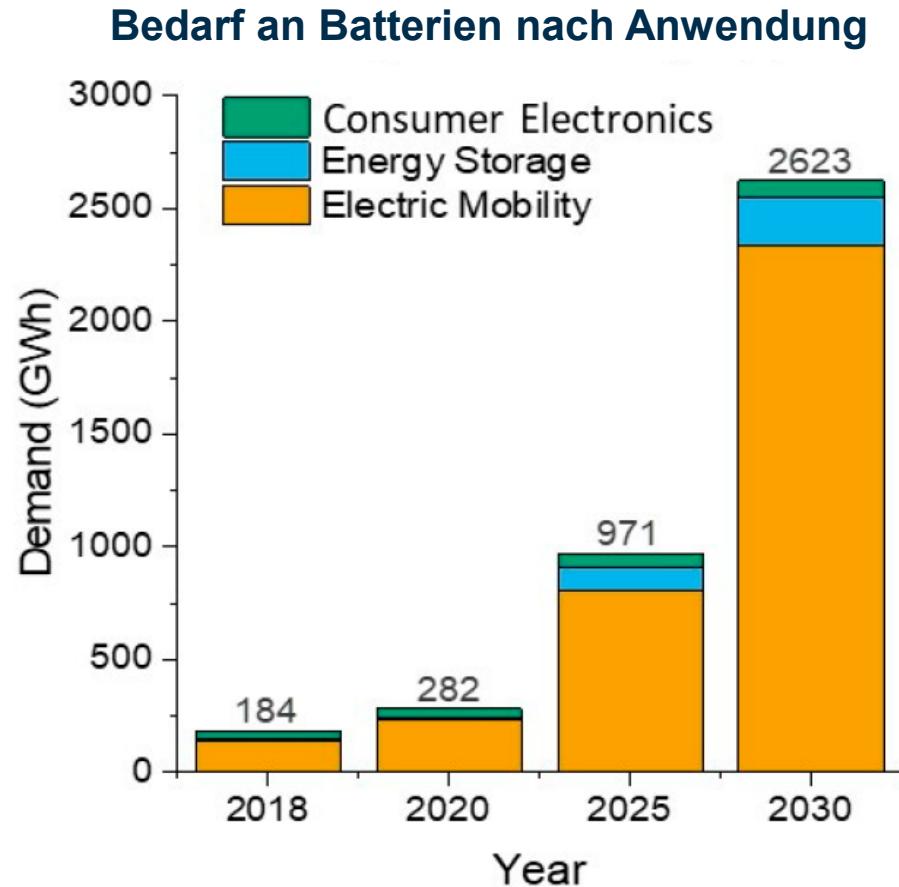
Prof. Dr. Helmut Ehrenberg, Dr. Michael Knapp, Dr. Isabelle Südmeyer et.al.

Für eine wettbewerbsfähige und nachhaltige Batteriewertschöpfungskette in Europa „Batterierecycling“ mit Fokus auf LiB



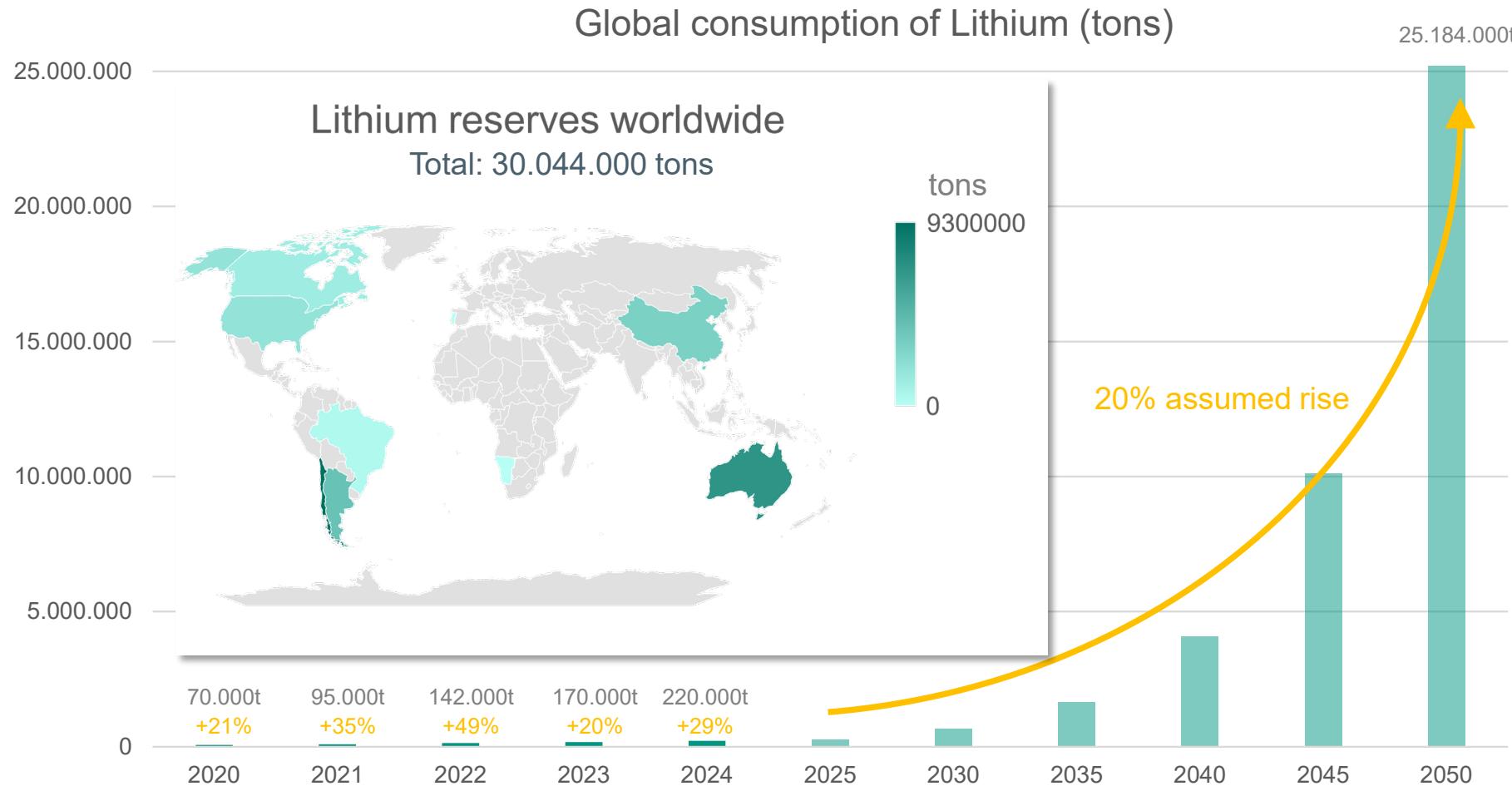
- Motivation
- Stand der Technik Recyclingverfahren
- Beispiele KIT-Forschung „Batterierecycling“
- Zusammenfassung

Bedarf an Batterien



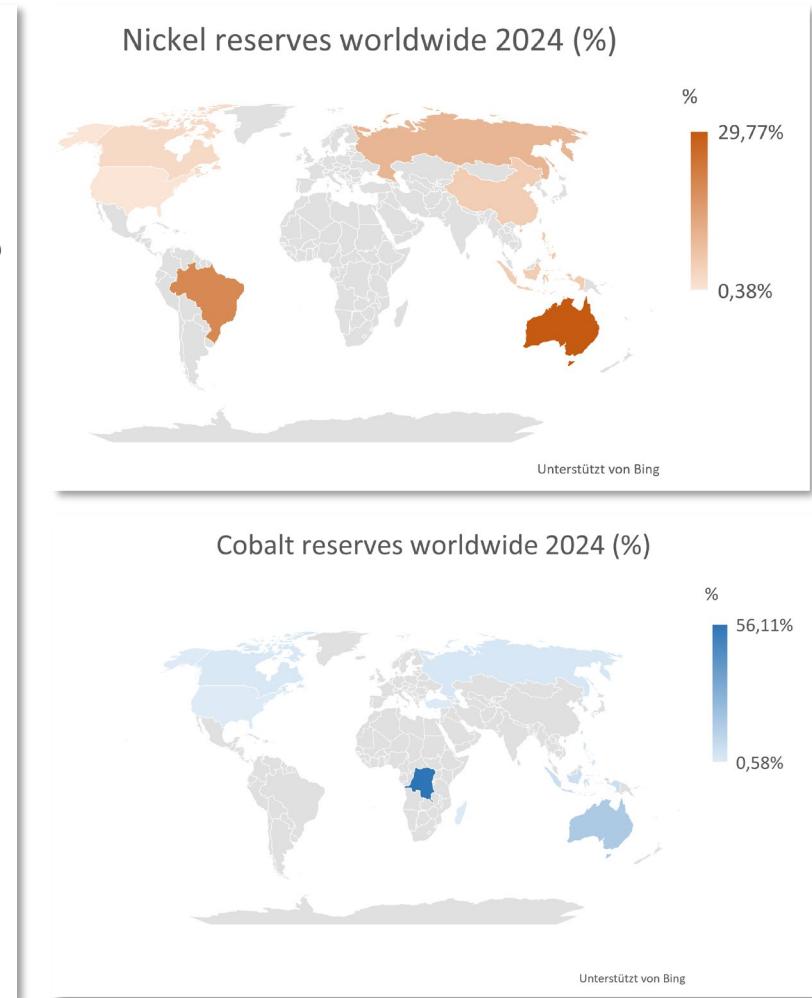
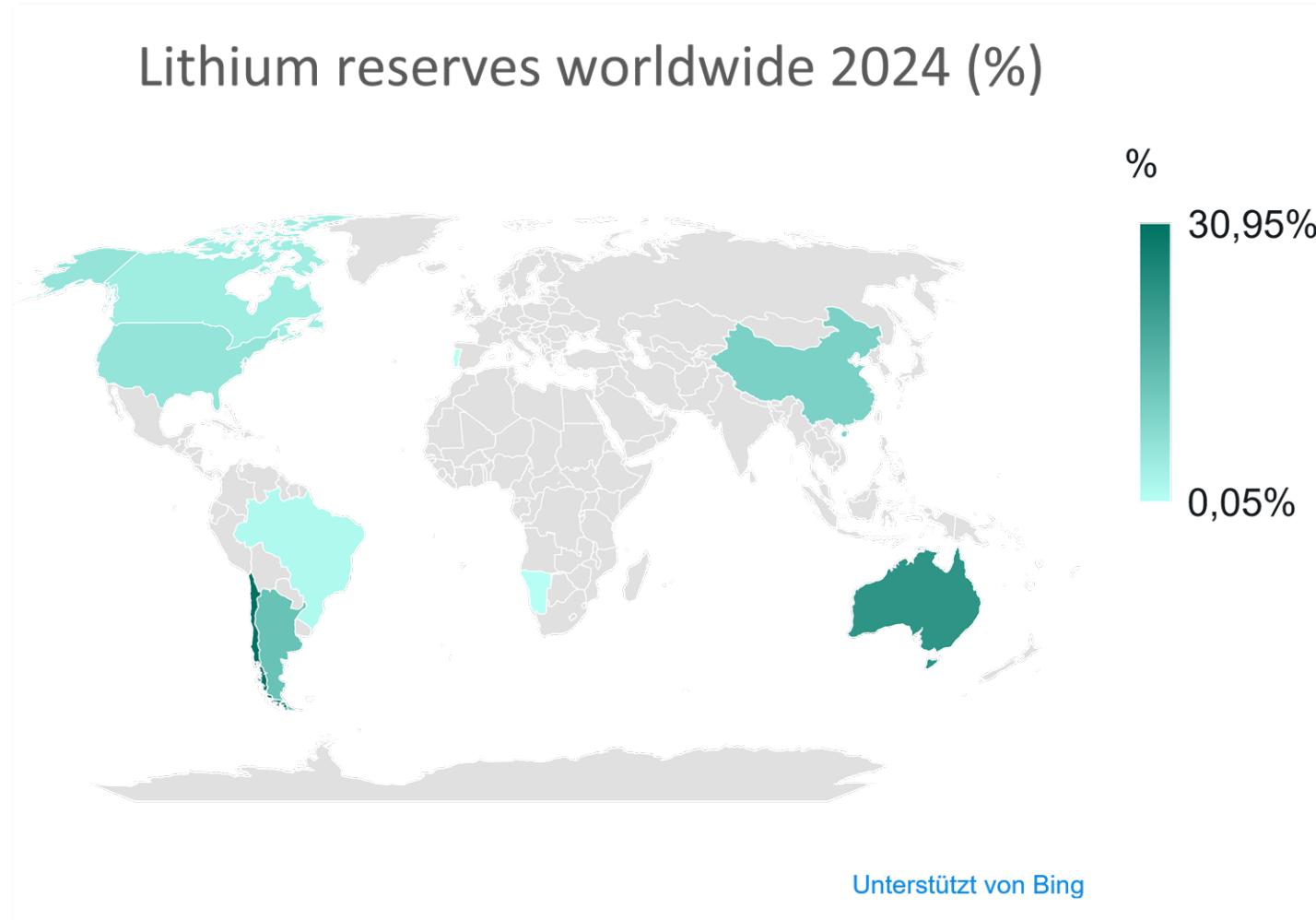
Sustain. Chem., 2021, 2, 167–205.

Prognostizierter globaler Verbrauch von Lithium versus Lithiumreserven



Quelle: U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2025

Weltweite Verteilung relevanter Metalle für LIB



Quelle: Mineral Commodity Summaries 20222, 2025 (US Department of Interior, US Geological Survey)

Meilensteine der Europäischen Batterieverordnung mit Fokus auf Lithium

2023

- Erlass Europäische Batterieverordnung

2025

- Recycling-Effizienz von mindestens 65 % für Lithium-Batterien

2027

- Stoffliche Verwertungsziele: 50 % Li; 90% Co, Cu, Ni, Pb

2031

- Recycling-Effizienz von mindestens 70 % für Lithium-Batterien
- Minimaler Rezyklatgehalt: 6% Li & Ni, 85 % Pb, 16 & Co
- Stoffliche Verwertungsziele (80 % Li; 95% Co, Cu, Ni, Pb)

2036

- Minimaler Rezyklatgehalt: 12 % Li, 15 % Ni, 85% Pb, 26 % Co

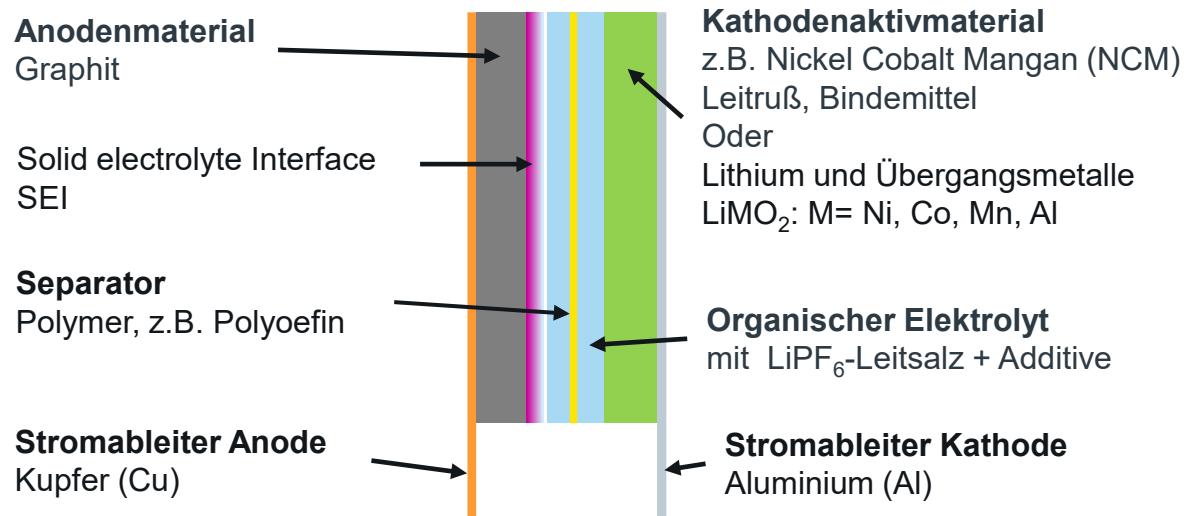
Quelle: Batterieverordnung 2025



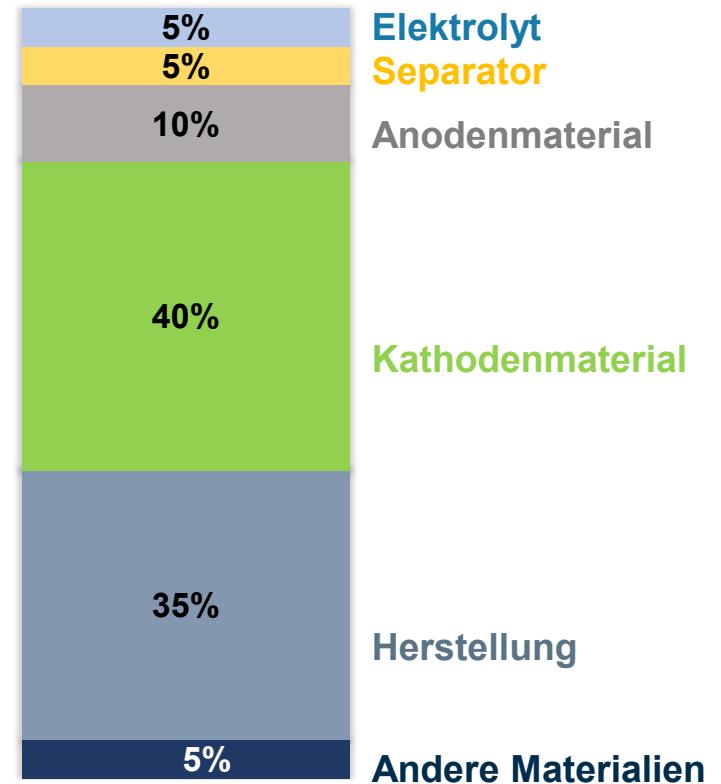
Lithium-Ionen-Batterie

Aufbau und Verteilung der Kosten

Aufbau einer Lithium Ionen Batterie (Materialien)

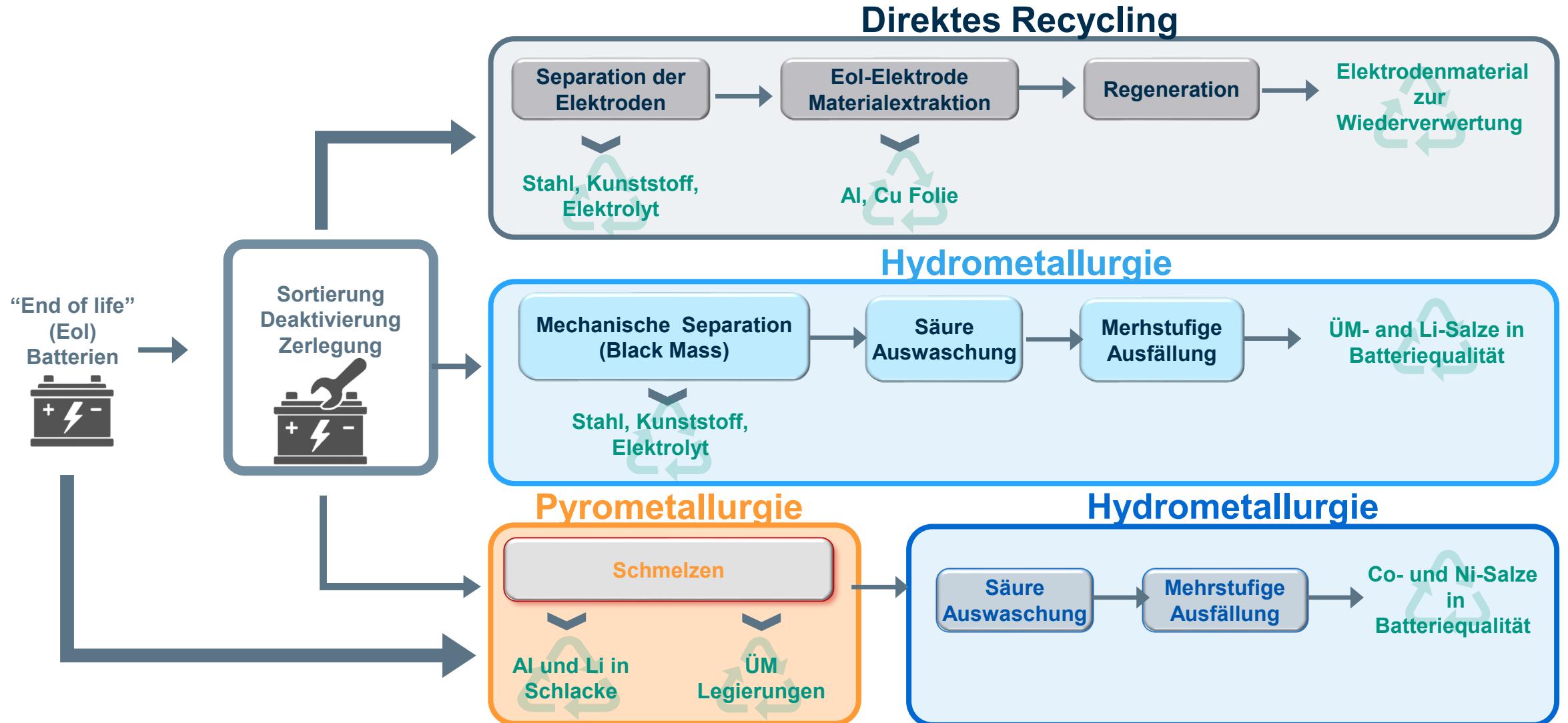


Zusammensetzung der LiB - Kosten



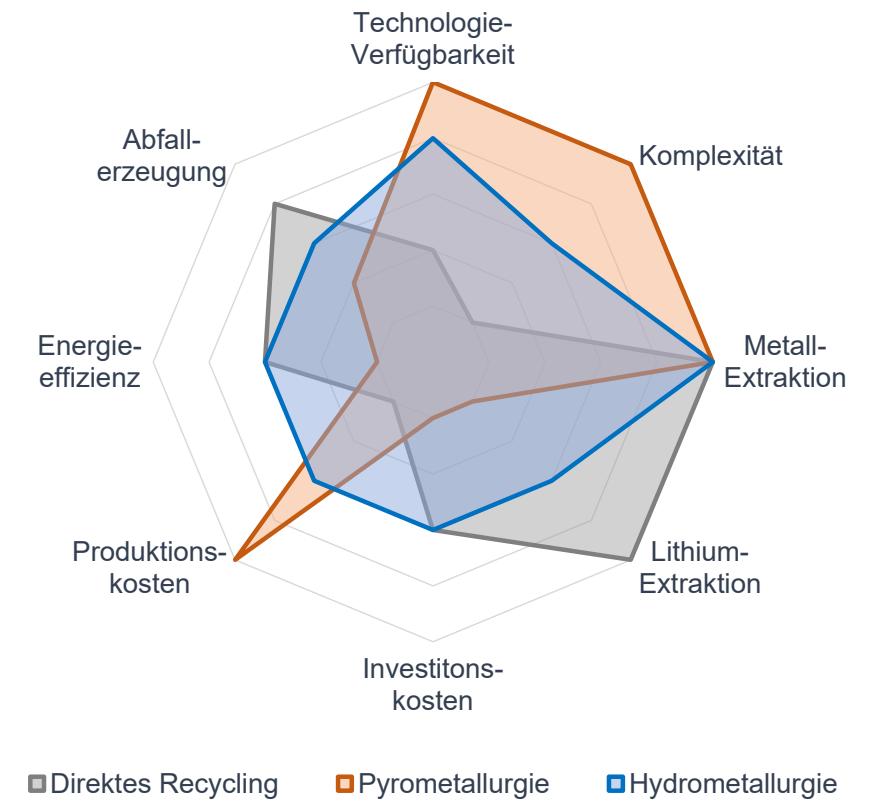
Zahlen: McKinsey & Company 2023

Die drei relevantesten Recyclingverfahren

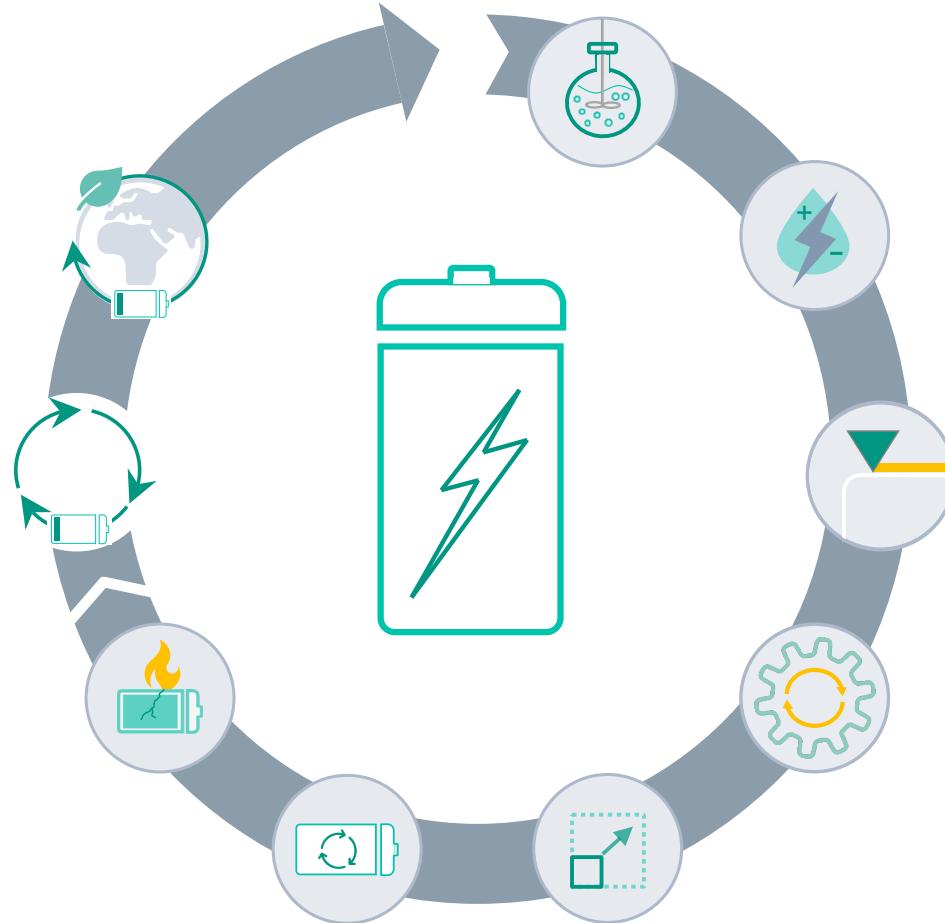


Vor- und Nachteile der Recyclingverfahren von Lithium-Batterien

	Direktes Recycling	Pyro-metallurgie	Hydrometallurgie
Technologie-verfügbarkeit	●●	●●●●●	●●●●
Komplexität	●	●●●●●	●●●
Metall-Extraktion	●●●●●	●●●●●	●●●●●
Lithium-Extraktion	●●●●●	●	●●●
Investitions-kosten	●●●	●	●●●
Produktions-kosten	●	●●●●●	●●●
Energieeffizienz	●●	●	●●●
Abfallentsorgung	●●●	●●	●●●



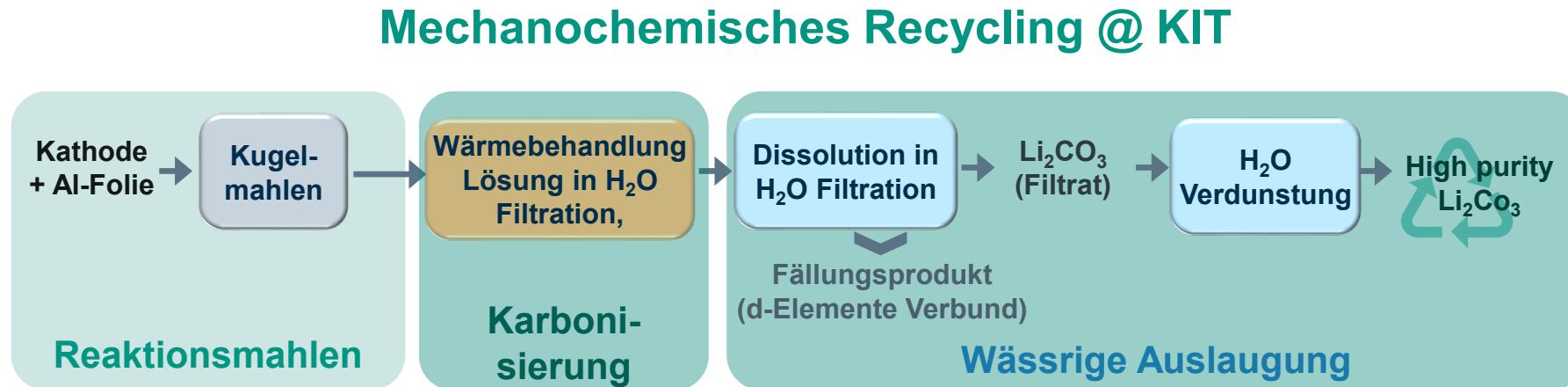
Bisher kein bevorzugtes Verfahren zum Recyceln von Batteriematerialien!



- Motivation
- Stand der Technik Recyclingverfahren
- Beispiele KIT-Forschung „Batterierecycling“
- Zusammenfassung und Ausblick

Mechanochemisches Recyclingverfahren am KIT

Verfahrensschritte in der Übersicht



- Kugelmahlen wird mit einer chemischen Reaktion (Reduktion) kombiniert
- Reduzierung der Anzahl der Prozessschritte
- Verfahren ist im Labor- und industriellen Maßstab anwendbar

O. Dolotko et al. Comm. Chem, 2023, 6:49
O. Dolotko et al. J. Alloys Comp, 2020, 824, 153876

Mechanochemisches Recyclingverfahren @ KIT

Verfahrensschritte im Detail

Batteriekathode

LiCoO_2 + Al-Folie



Reaktives Kugelmühlen



- Reaktives Kugelmahlen: Transformation von Kathodenmaterial (z.B. LiCoO_2) in wasserlösliche Li-Verbindungen und z.B. unlösliches Co und Al_2O_3
- Li_2O reagiert über ein spezielles Waschverfahren mit Wasser zu Li_2CO_3
- Übergangsmetalle können ebenfalls in wasserlösliche Verbindungen überführt werden
- Recycelte Materialien stehen anschließend für erneute Synthese von Aktivmaterialien zur Verfügung



Chemische Separation
Purification
 Li_2O : wasserlöslich $\rightarrow \text{Li}_2\text{CO}_3$

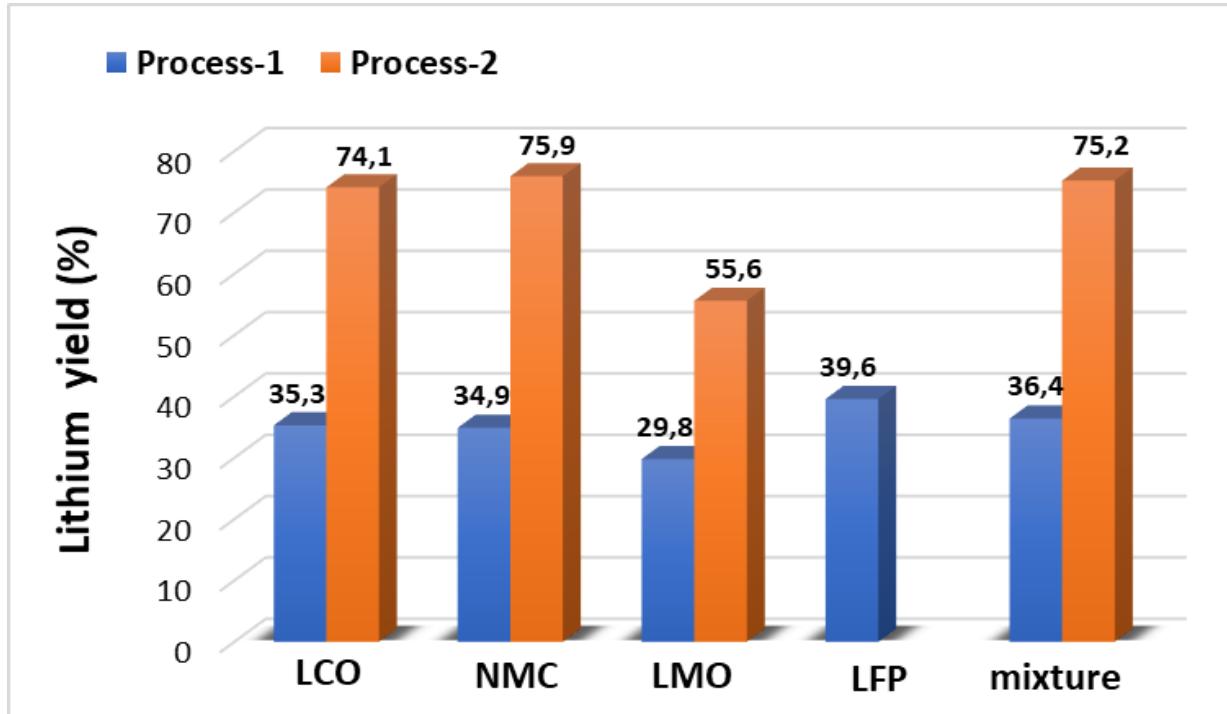
Magnetische Separation + Filtration
 $\text{M, Al}_2\text{O}_3$: unlöslich \rightarrow Abtrennung



Metallisches
Co-Material

Ergebnisse Mechanochemisches Recycling-Prozessrouten

Lithium Ausbeute über 70%



- Hohe Lithium Ausbeute bei guter Reinheit
- Kosteneffektiv und nachhaltig
 - Einfaches Verfahren
 - niedrige Temperatur,
 - Wasserbasiert, keine kritischen Reagenzien
- Verfahren ist für unterschiedliche Materialien einsetzbar

Patente:

1. O. Dolotko, M. Knapp, H. Ehrenberg "Mechanochemically Induced Universal Method for Recycling Lithium from Li-ion Batteries". 2022, EU Patent filed (K 7092EU).
2. O. Dolotko, M. Knapp, H. Ehrenberg "Mechanochemically Induced High-Efficient Method for Recycling d-elements from Li-ion Batteries Wastes". 2022, Invention disclosure filed (K 7175EU).

RHINOCEROS - Batteries reuse and direct production of high performances cathodic and anodic materials and other raw materials from batteries recycling using low cost and environmentally friendly technologies.



- **KIT Aufgaben innerhalb des Konsortiums:**
 - **Lithium Recycling aus Altbatterien (Black Mass).**
- **Partners:** Fundation Technalia Research & Innovation, ACCUREC, Hydrometal, Eco Recycling, Arkema, TES-AMM, Watt4Ever, LEITAT, VITO, Chalmers University of Technology, University of Agder, Sapienza University of Rome, PNO, Leverton, Ford
- **Project duration:** 9/2022 to 08/2026
- **Budget:** 8.9 Million € (400 k€ @ KIT)

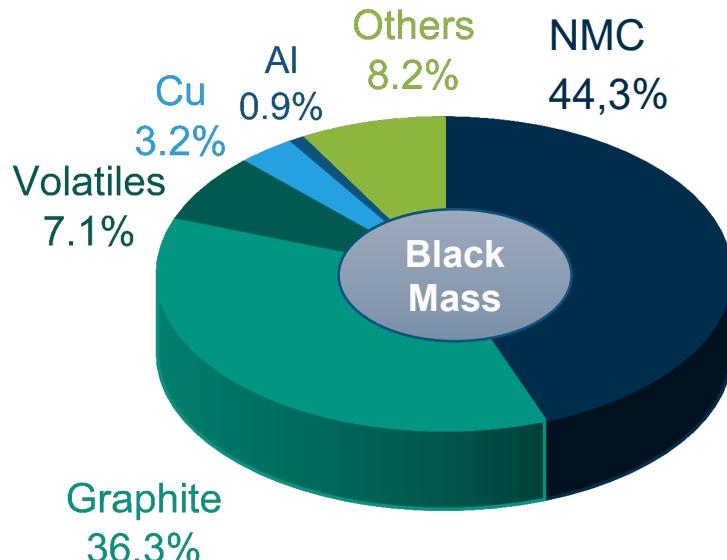


Funded by the European Union under Grant Agreement No 101069685
<https://www.rhinoceros-project.eu/>

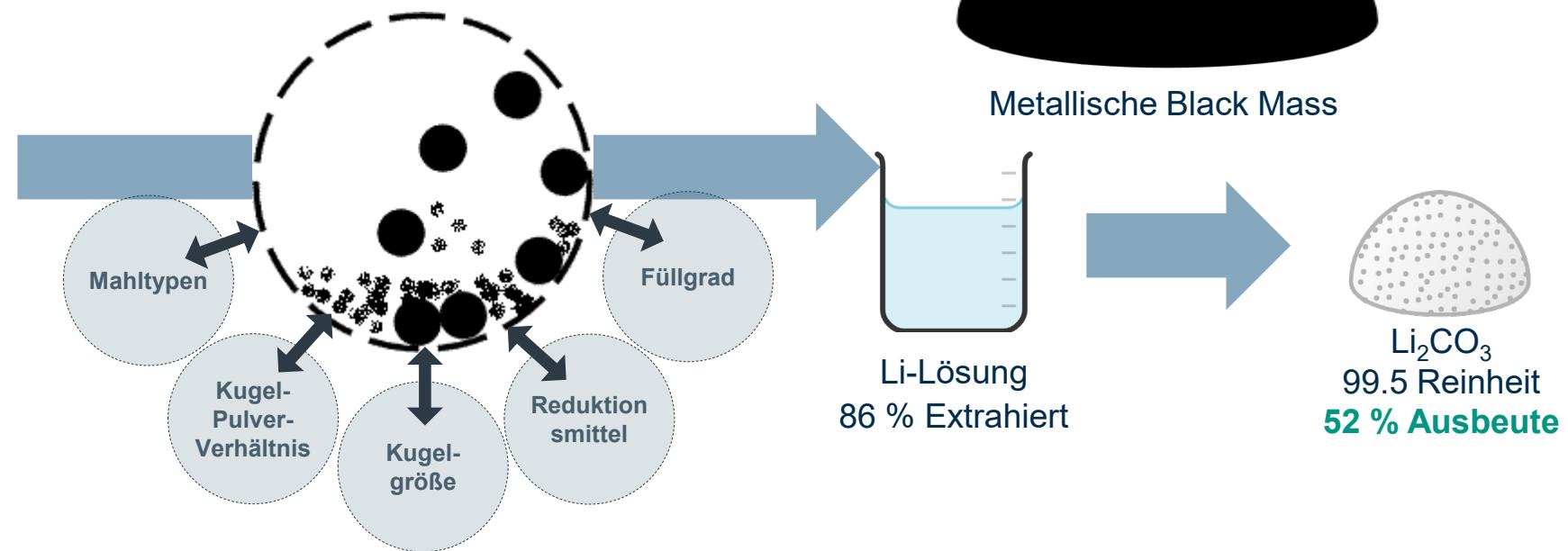


**NEW ROUTES TOWARDS
SUSTAINABLE REUSE & RECYCLING
OF LITHIUM-ION BATTERIES (LIBS)**

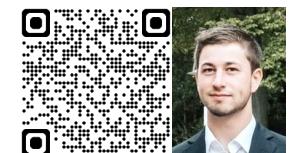
Mechanochemisches Recycling ist auf Black Mass anwendbar



Mechanochemisches Recycling @KIT



- Graphit und Lösemittel senken die Reaktionsgeschwindigkeit deutlich, können aber zum Teil entfernt werden.
- GroÙe Mengen Al machen Probleme bei der Lithium Extraktion
- Wiedergewonnene Lithium muss von F⁻ und Al³⁺ Ionen gereinigt werden
- 52 % des Li wurden als Li₂CO₃ in Batterie-Reinheit aus der Black Mass gewonnen

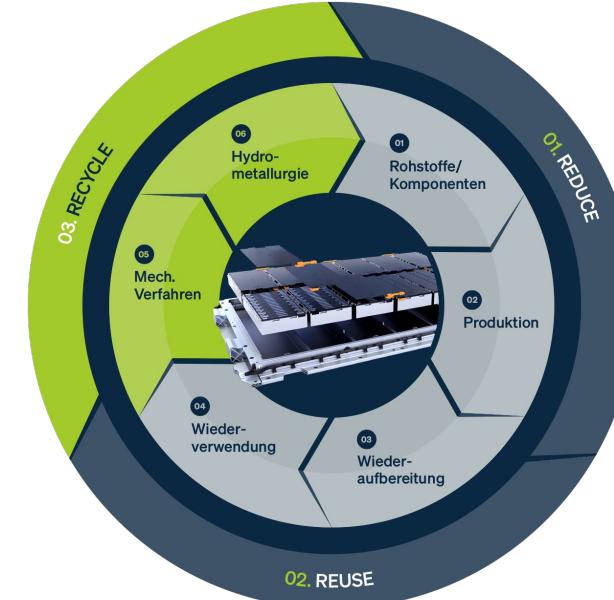


Raphael Sieweck

LiBinfinity: Entwicklung eines ganzheitlichen und nachhaltigen Recyclingansatzes für Lithium-Ionen-Batterien



- **KIT Forschungsaktivitäten:**
 - Re-Synthese von Kathodenmaterialien
 - Validierung von rezyklierten Materialien auf Zelllevel
- **Partners:** LICULAR, Mercedes-Benz, Daimler Truck, Primobius, SMS-Group, TU Clausthal, TU Berlin, KIT
- **Budget:** 19,2 MioEUR (1,2 Mio EUR@KIT)
- **Projektlaufzeit:** 07/2022 to 06/2026



[1] <https://www.licular.com/en/home> (aufgerufen am 12.05.25)

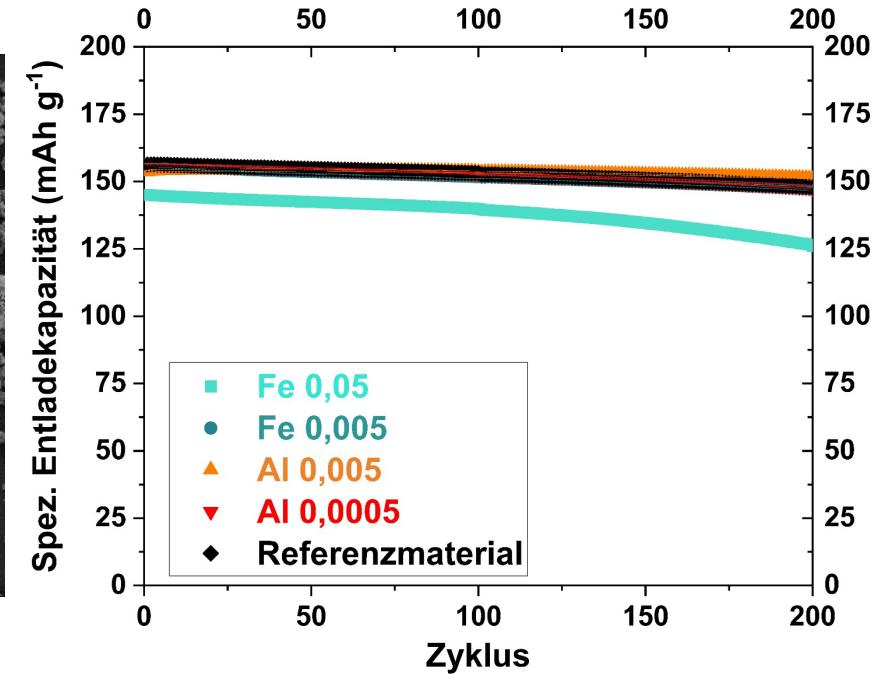
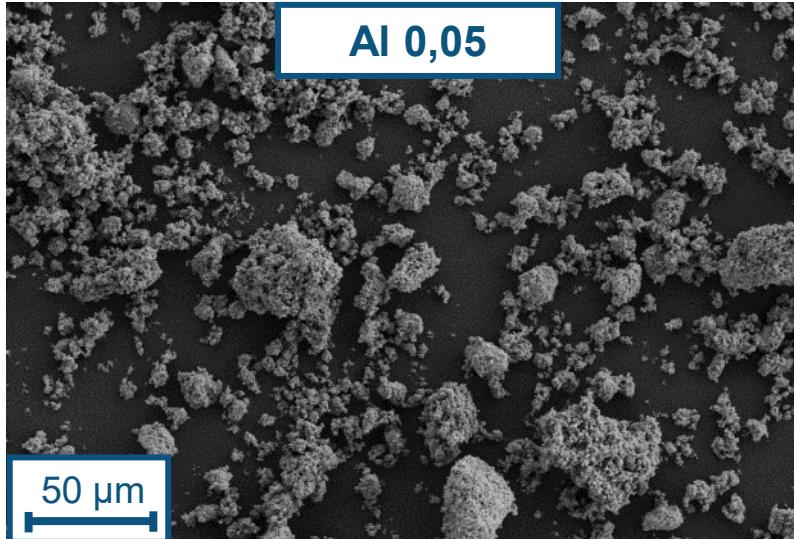
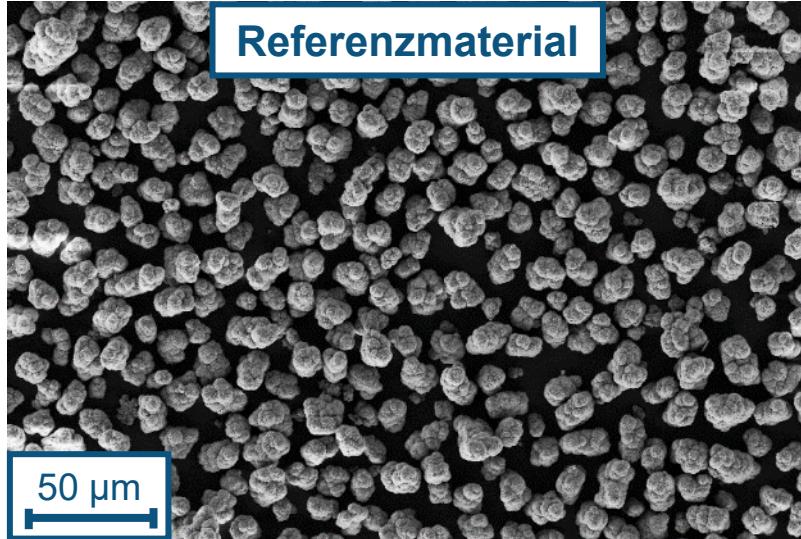


Was sind die Bedingungen
für eine erfolgreiche
Re-Synthese?

Wie gut sind Li-Ion
Batterien, die aus
rezyklierten Materialien
hergestellt werden?



Re-synthese und Materialvalidierung auf Pouchzelllevel (Single layer pouch cell, 45 mAh)



Materialmorphologie:

- Referenzmaterial: homogene sphärische Partikel, mit industrie-relevantem Durchmesser ($d_{50} = 10\mu\text{m}$)
- Zu viel Aluminium: Form und Größe vollständig gestört



Elektrochemische Leistungen:

- Referenzmaterial stimmt mit kommerziellen Materialien überein
- Leichte Konzentrationen an Al und Fe unproblematisch
- Zu viel Eisen verschlechtert verfügbare Kapazität und Stabilität

Lebenszyklusanalyse auf Zellebene: Vergleich Natrium- zu Ionen-Batterien - ein modellbasierter Ansatz

- Berücksichtigung von
 - Herstellungsphase
 - Nutzungsphase
 - EoL Phase einschließlich Recyclingverfahren

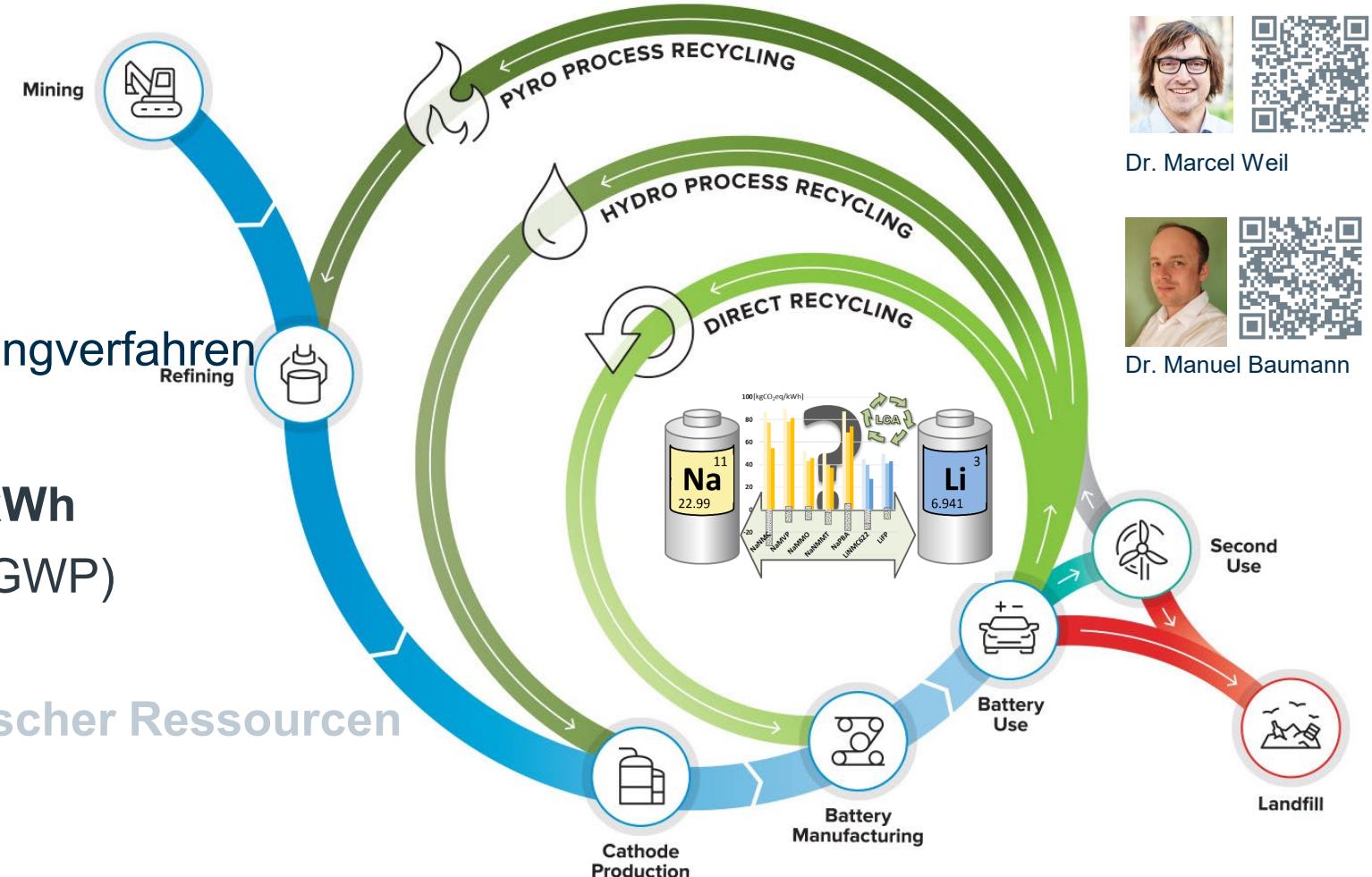
Kategorien der Auswirkungen pro kWh

- **Globales Erwärmungspotenzial (GWP)**

in kg CO₂ eq. / kWh

- **Potenzial zur Erschöpfung abiotischer Ressourcen (ADP)**

in kg Sb eq. / kWh*



*Verhältnis der jährlichen Produktion und des Quadrats der endgültigen (auf dem Krustenanteil basierenden) Reserve für die Ressource, geteilt durch das gleiche Verhältnis für eine Referenzressource (Antimon (Sb))



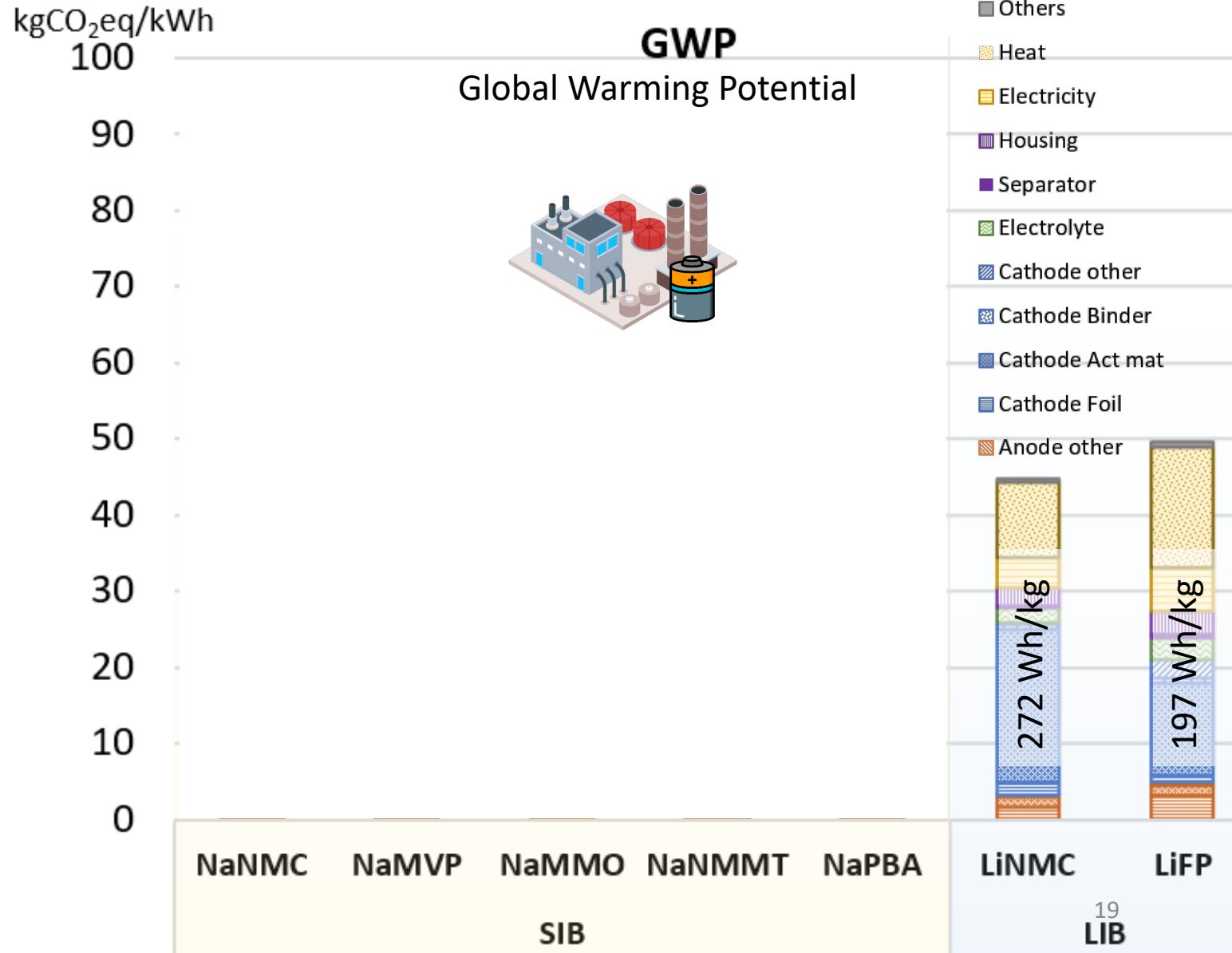
Dr. Marcel Weil



Dr. Manuel Baumann



Lebenszyklusanalyse auf Zellebene - GWP unter Berücksichtigung des Herstellungsverfahren



GWP

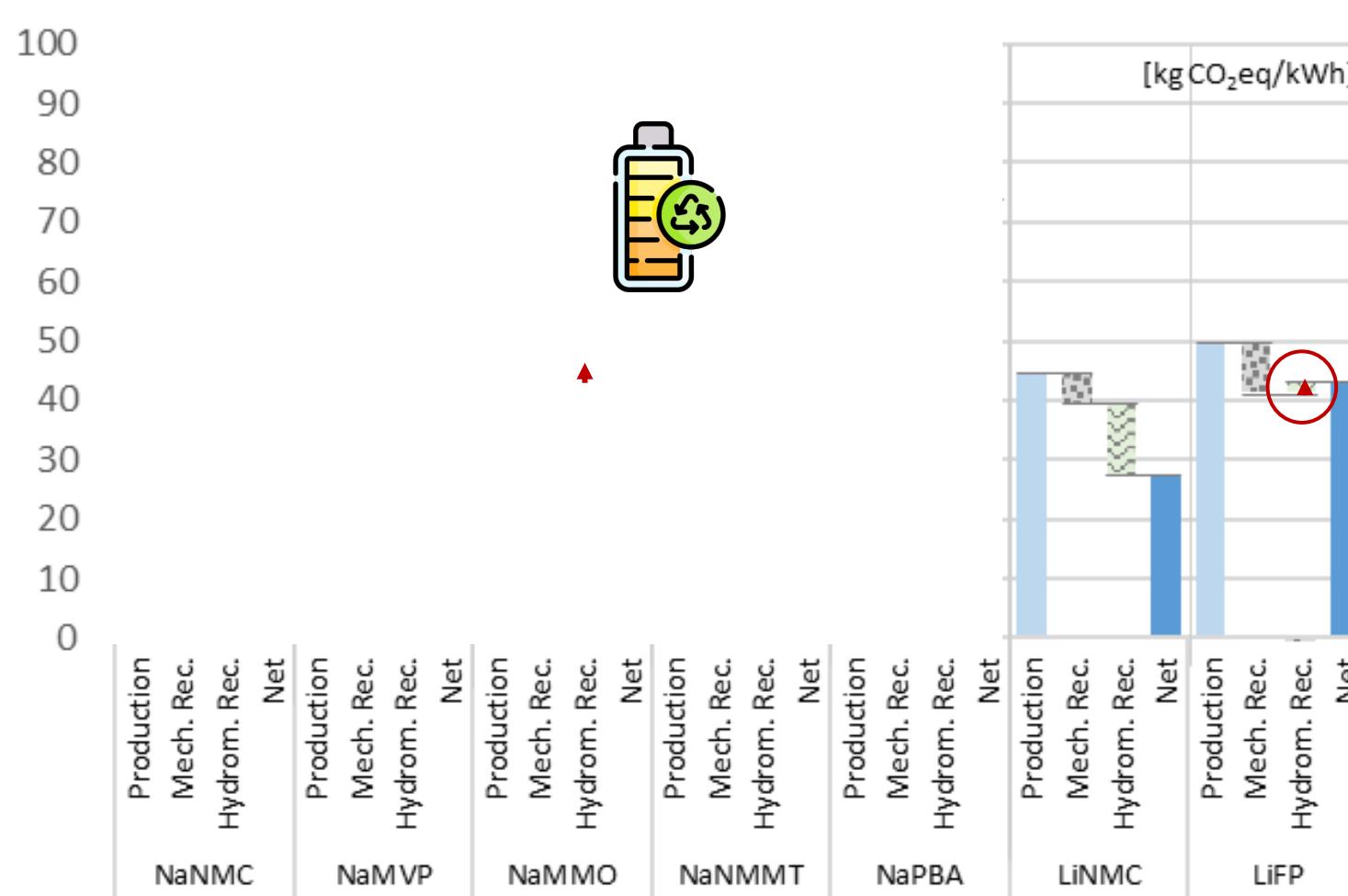
- Gute GWP-Ergebnisse für LIB und SIB Typ MMO und NMMT (hohe Energiedichte)
- **Haupttreiber**
- Kathodenaktives Material
- Herstellungsenergie
- Energiedichte



Veröffentlichung: Sustainable energy & fuels, 24, 2021. doi:10.1039/d1se01292d

Lebenszyklusanalyse auf Zellebene – GWP unter Berücksichtigung des Recyclingverfahrens

GWP = Global Warming Potential



GWP

- Beste GWP-Ergebnisse für NMC⁶²²
- höhere Recyclinggutschriften für LIBs vom Typ NMC steigern die Wettbewerbsfähigkeit
- Tiefes Recycling ungünstig für NaMVP, NaMMO, NaPBA und LiFP (Prozessinputs übersteigen die Recyclingvorteile)



Veröffentlichung: Sustainable energy & fuels, 24, 2021. doi:10.1039/d1se01292d

Zusammenfassung

- Es gibt viele verschiedene, teilweise ergänzende Ansätze zur Realisierung nachhaltigerer wiederaufladbarer Li-Batterien, darunter:
 - Die Verwendung von H_2O als Prozesslösungsmittel auch für die Kathode.
 - Die Vermeidung kostspieliger und toxischer Elemente
 - Das effiziente Recycling und/oder die Wiederverwendung der verschiedenen Zellkomponenten.
 - Verständnis der Prozesse und Reaktion für Weiterentwicklung der Prozesse
- Herausforderungen
 - Entwicklung grundlegender Konzepte mit der Möglichkeit der Übertragbarkeit
 - Kosten, Sortenreinheit, „green chemistry“, Effizienz „yield“ /Ausbeute
- Betrachtung des gesamten Lebenszyklus zur Bewertung wichtig