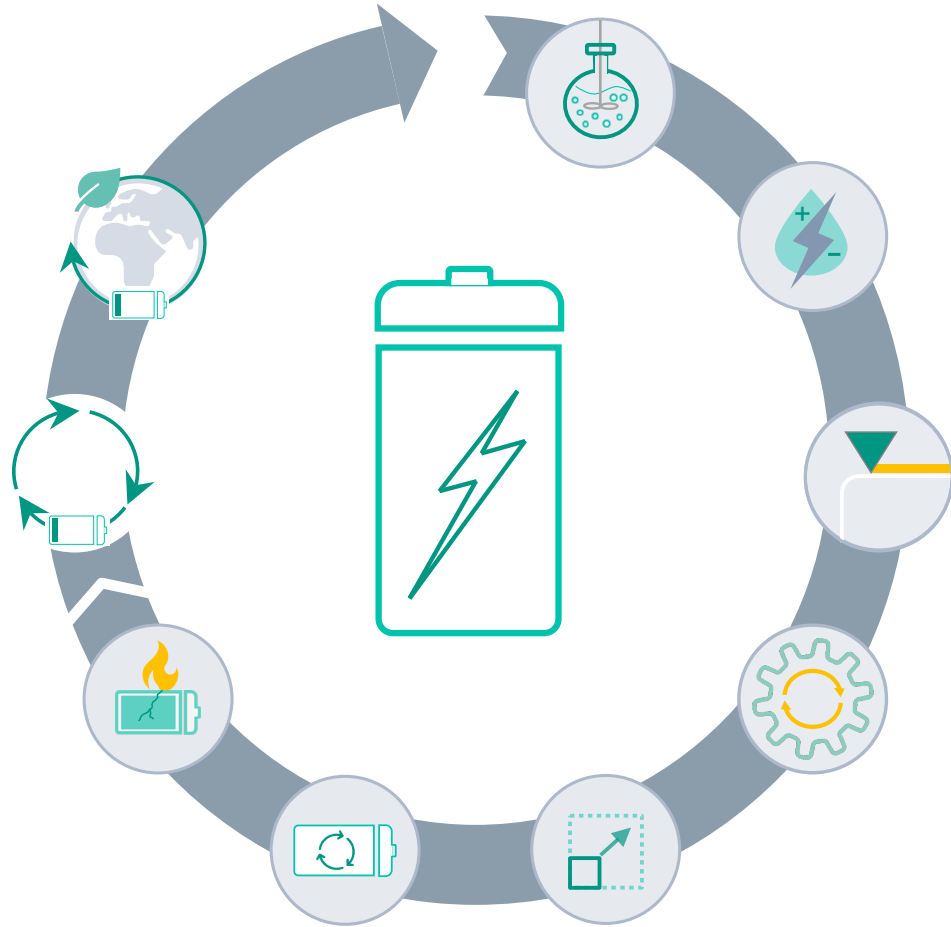


# Für eine wettbewerbsfähige und nachhaltige Batteriewertschöpfungskette in Europa „Batteri recycling“

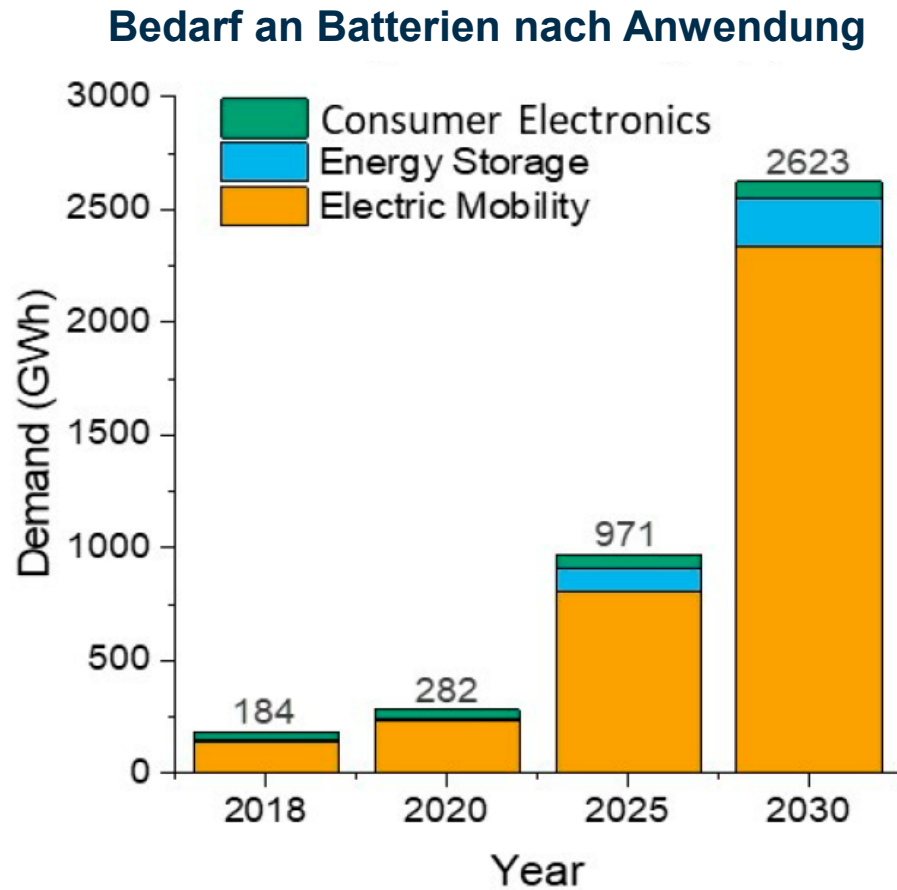
Prof. Dr. Helmut Ehrenberg, Dr. Michael Knapp, Dr. Isabelle Südmeyer et.al.

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



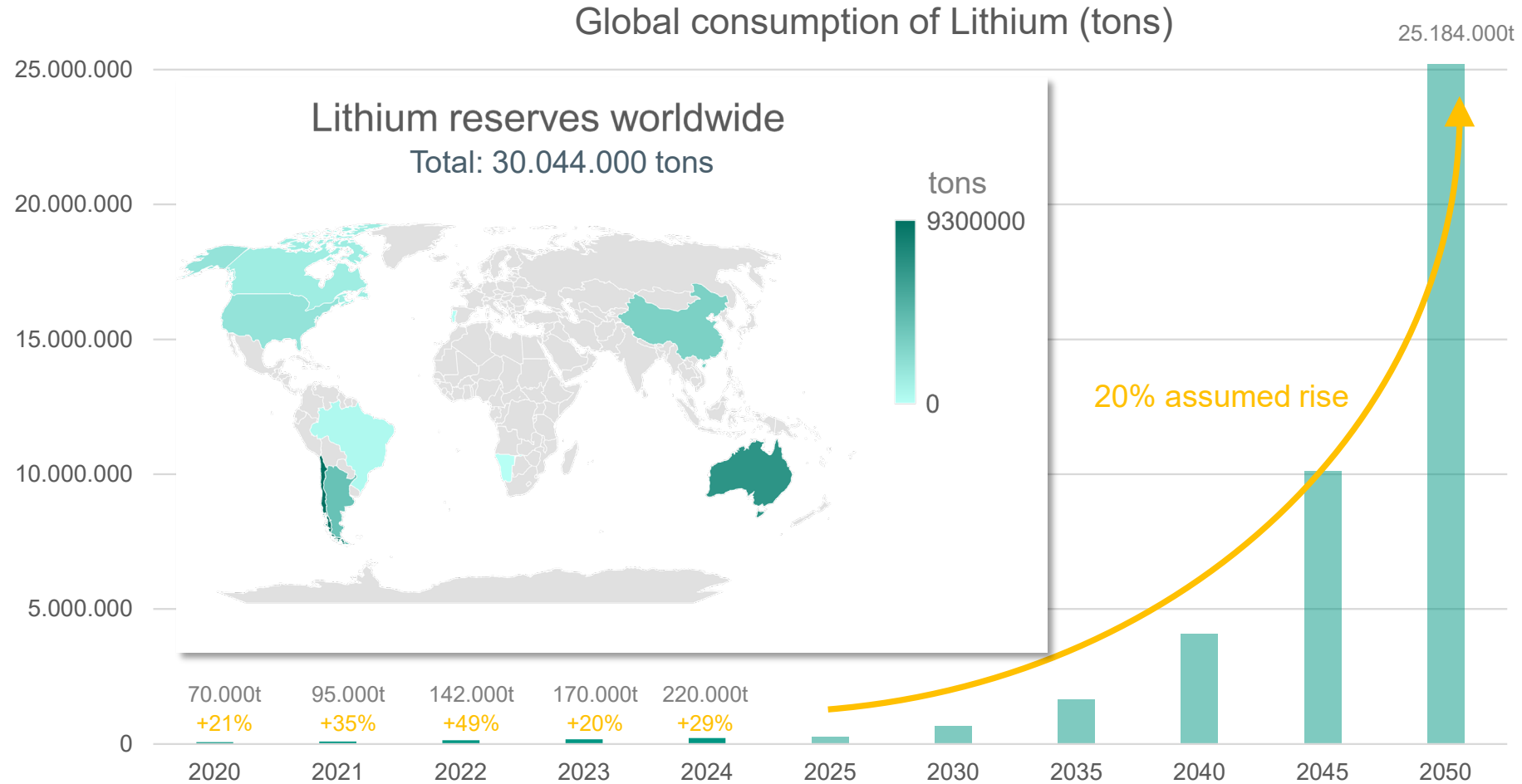
- Motivation
- Stand der Technik Recyclingverfahren
- Beispiele KIT-Forschung „Batterierecycling“
- Zusammenfassung

# Bedarf an Batterien



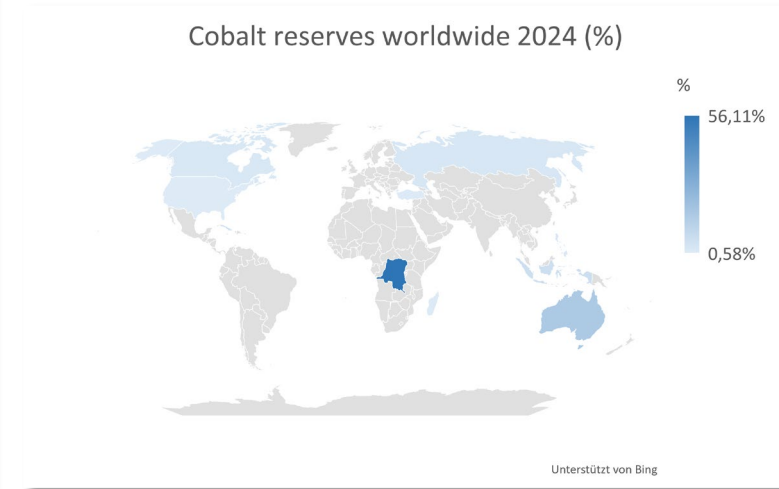
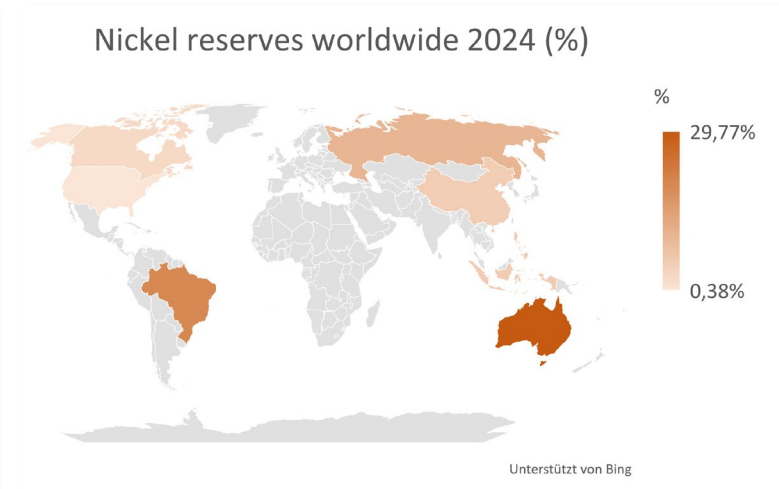
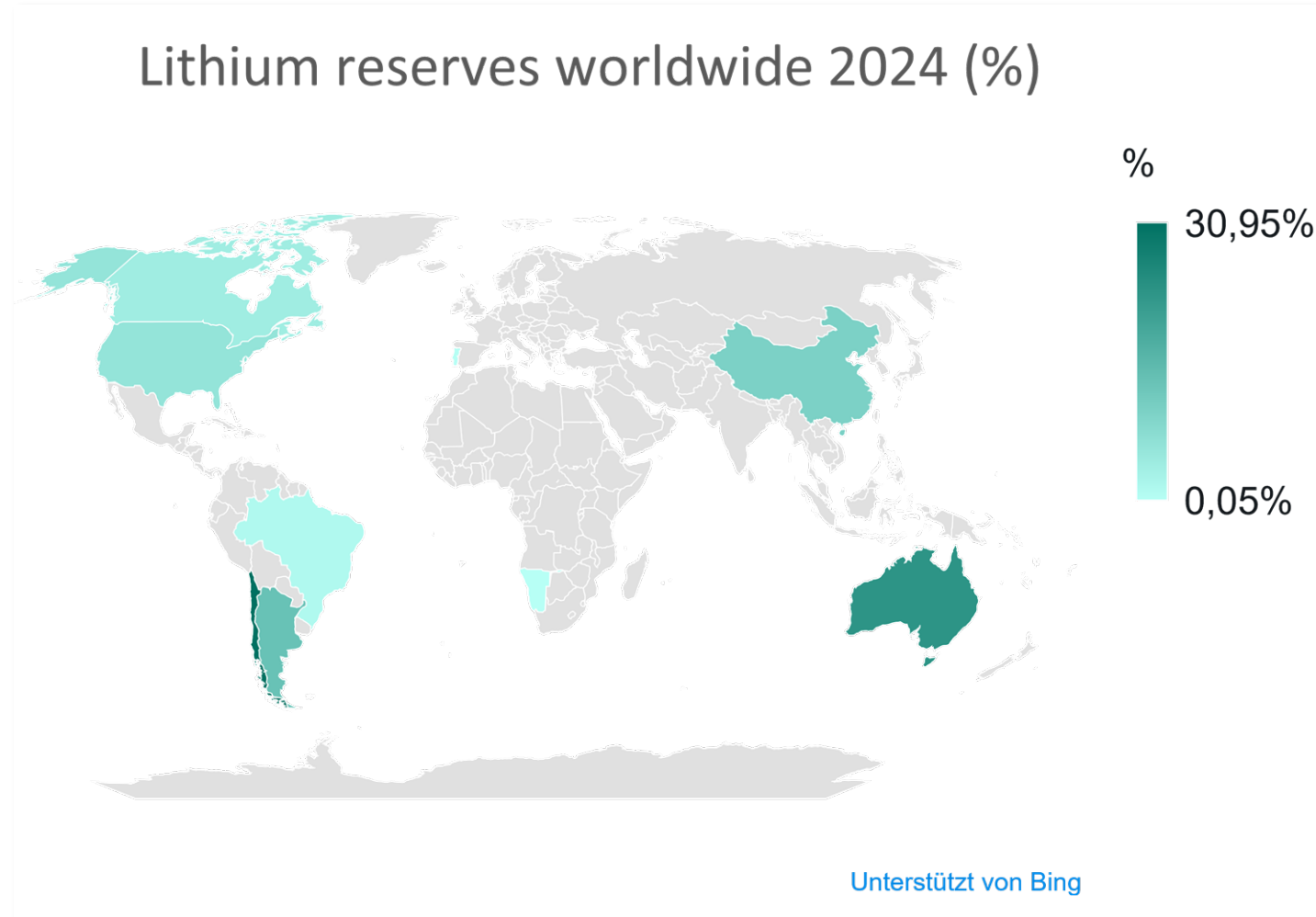
*Sustain. Chem.*, **2021**, 2, 167–205.

# Prognostizierter globaler Verbrauch von Lithium versus Lithiumreserven



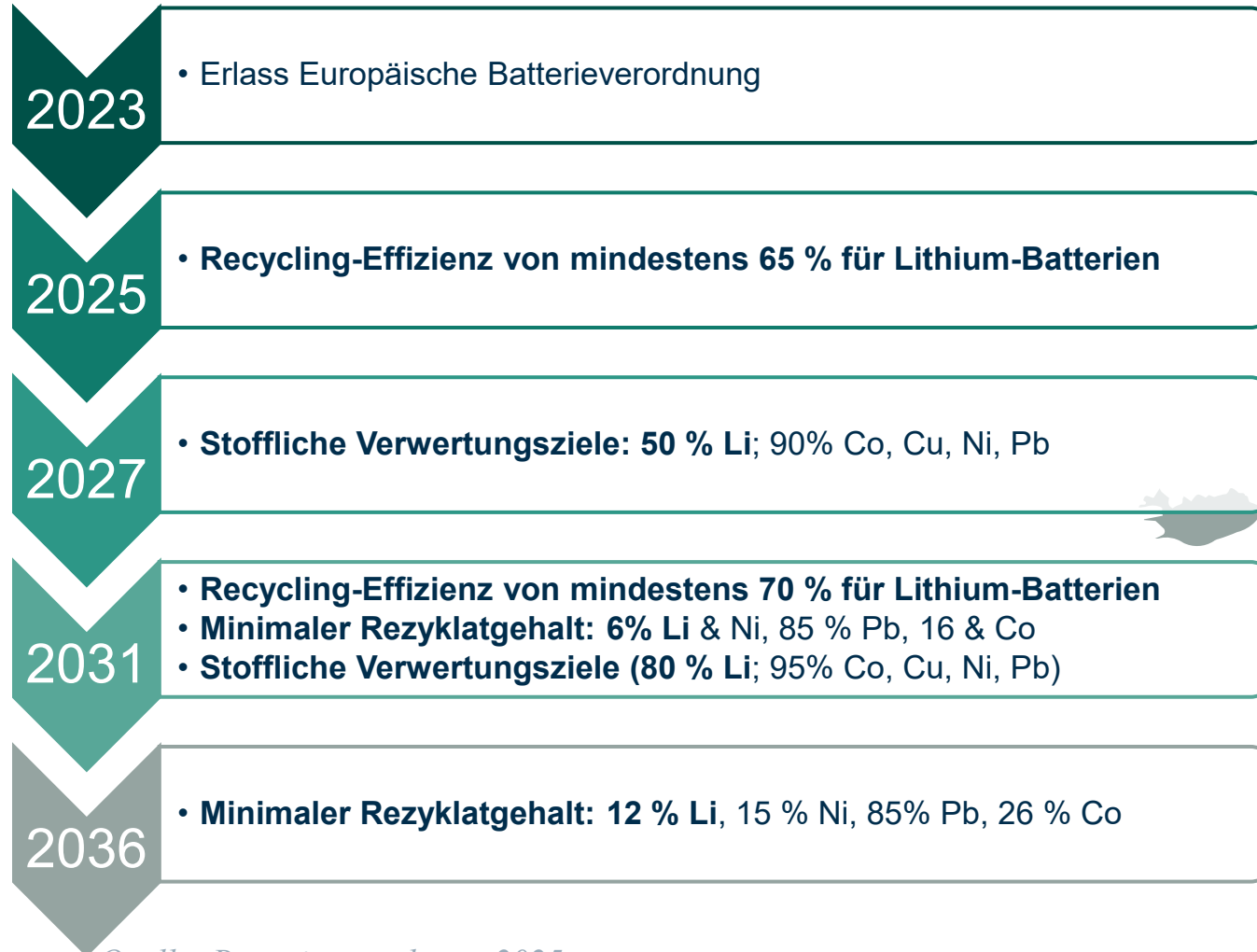
Quelle: U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2025

# Weltweite Verteilung relevanter Metalle für LIB



Quelle: Mineral Commodity Summaries 2022, 2025 (US Department of Interior, US Geological Survey)

# Meilensteine der Europäischen Batterieverordnung mit Fokus auf Lithium



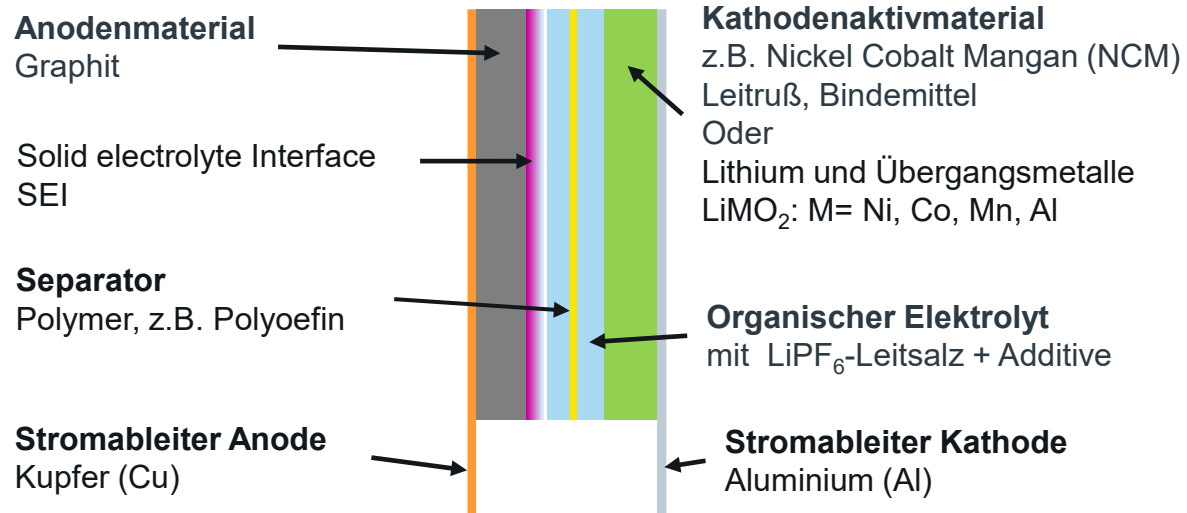
Quelle: Batterieverordnung 2025



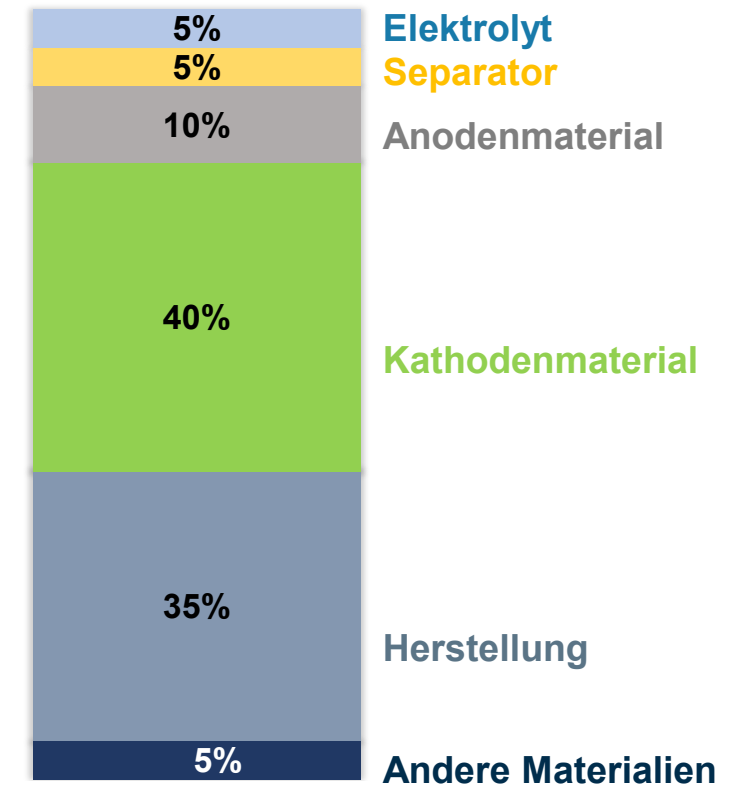
# Lithium-Ionen-Batterie

## Aufbau und Verteilung der Kosten

### Aufbau einer Lithium Ionen Batterie (Materialien)

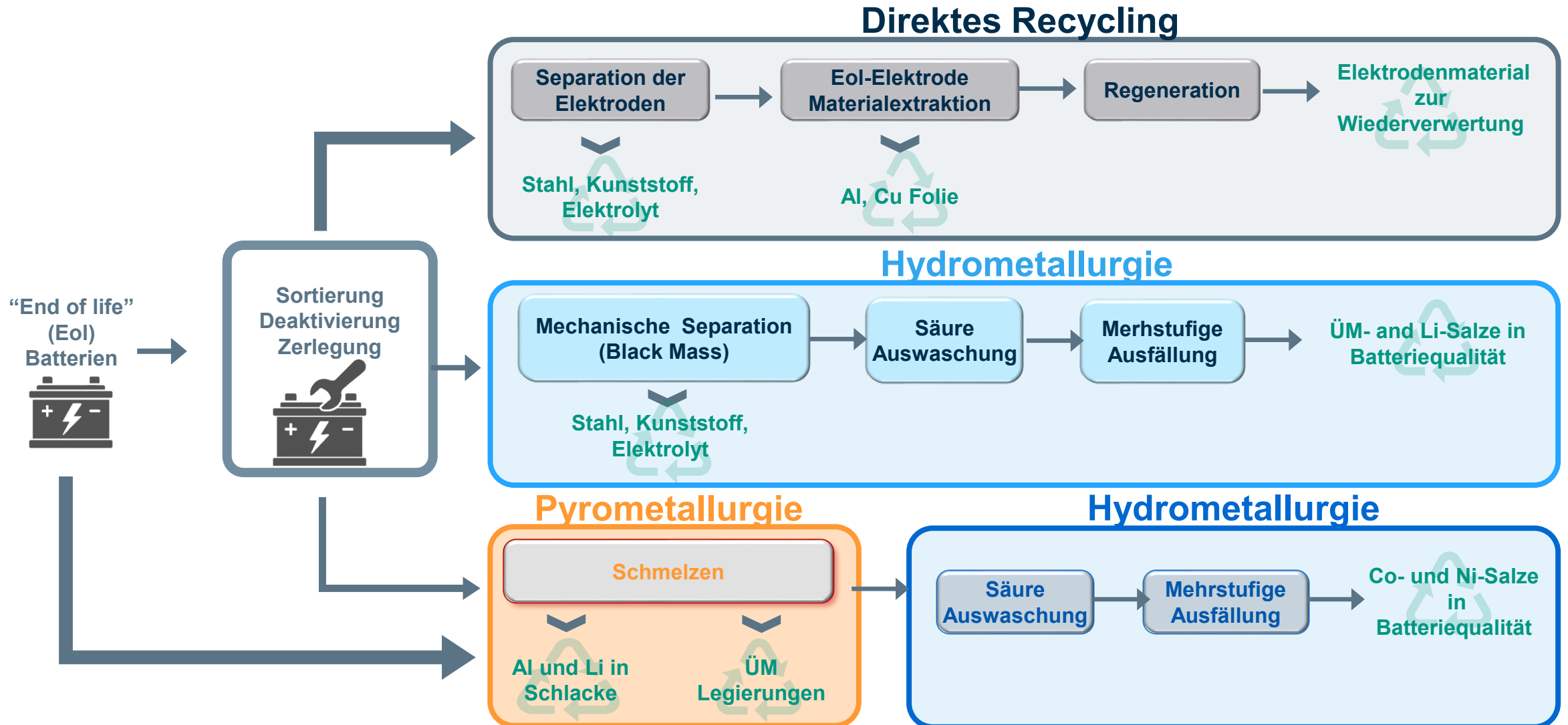


### Zusammensetzung der LiB - Kosten



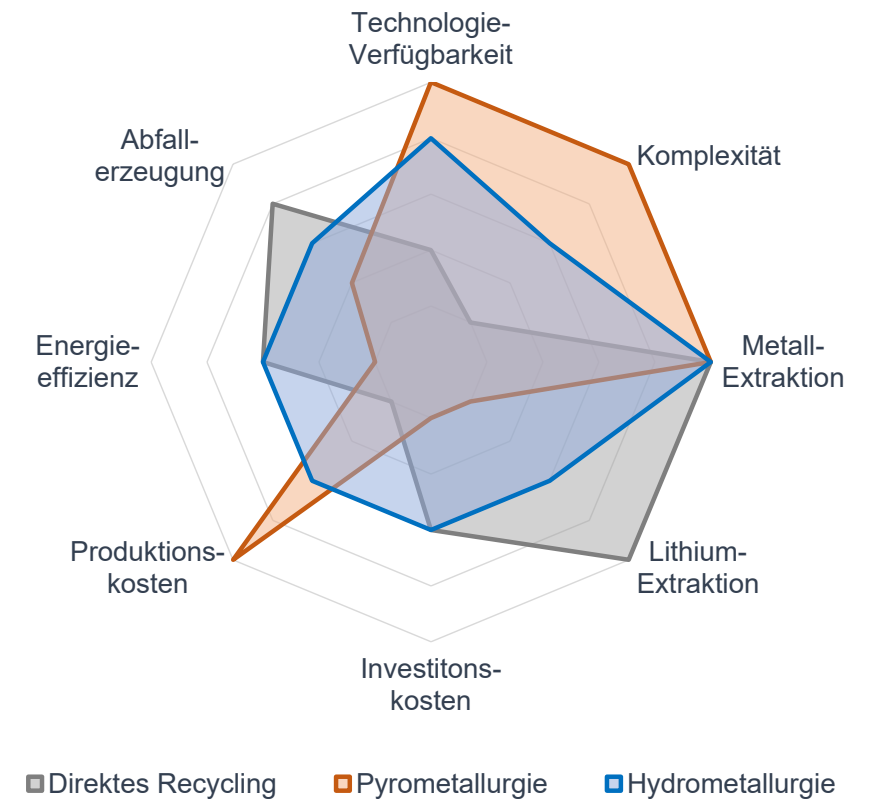
Zahlen: McKinsey & Company 2023

# Die drei relevantesten Recyclingverfahren

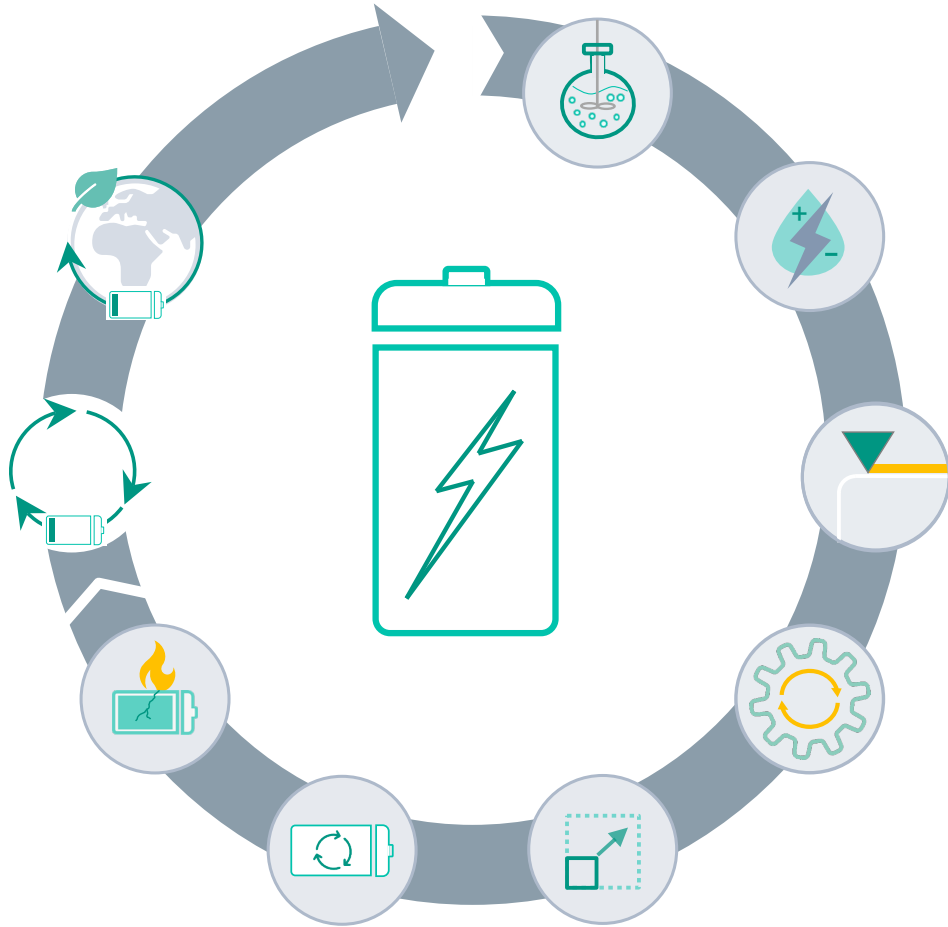


# Vor- und Nachteile der Recyclingverfahren von Lithium-Batterien

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



*Bisher kein bevorzugtes Verfahren zum Recyceln von Batteriematerialien!*

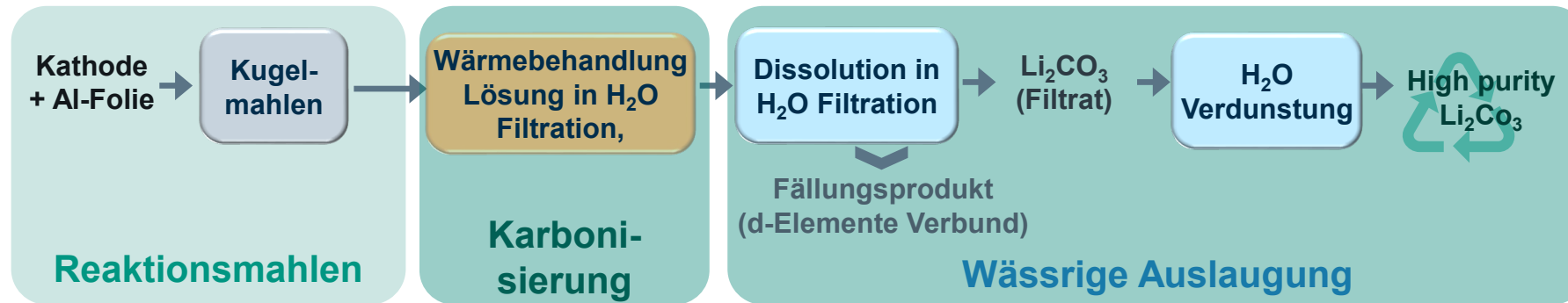


- Motivation
- Stand der Technik Recyclingverfahren
- **Beispiele KIT-Forschung „Batterierecycling“**
- Zusammenfassung und Ausblick

# Mechanochemisches Recyclingverfahren am KIT

## Verfahrensschritte in der Übersicht

### Mechanochemisches Recycling @ KIT

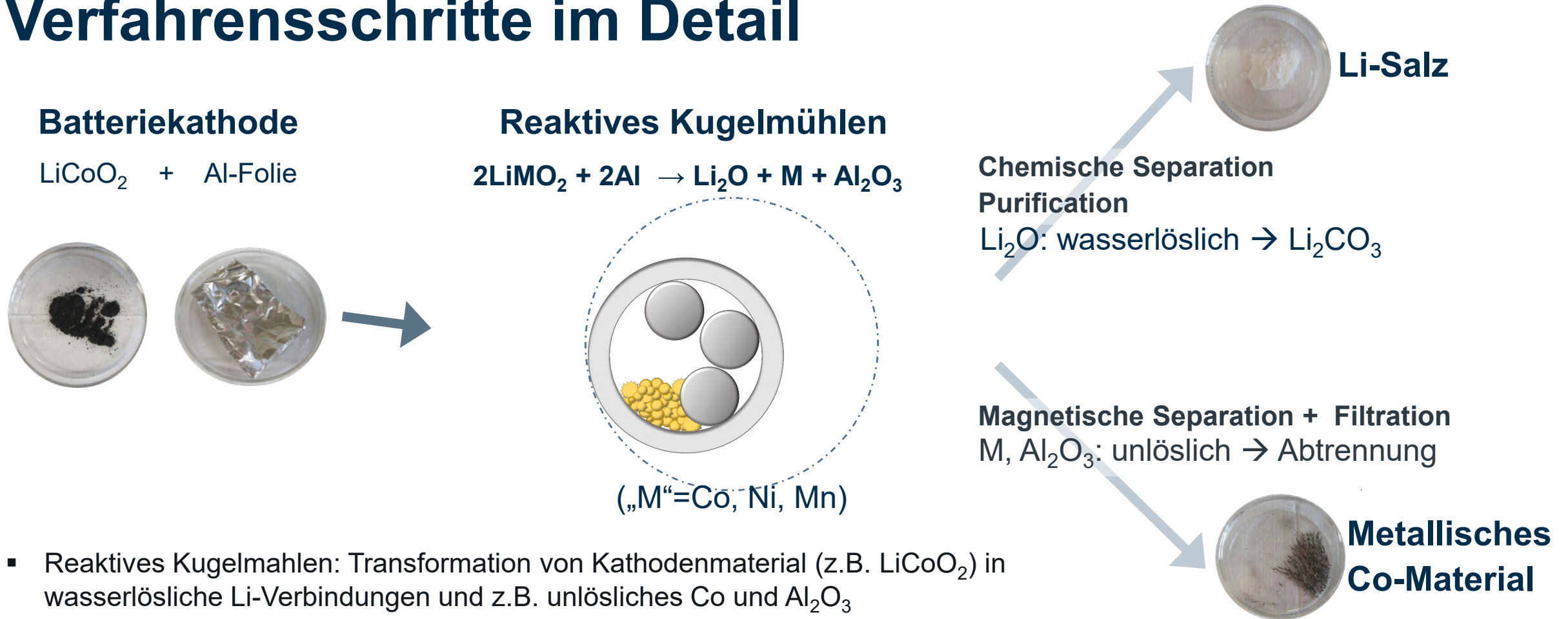


- Kugelmahlen wird mit einer chemischen Reaktion (Reduktion) kombiniert
- Reduzierung der Anzahl der Prozessschritte
- Verfahren ist im Labor- und industriellen Maßstab anwendbar

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

# Mechanochemisches Recyclingverfahren @ KIT

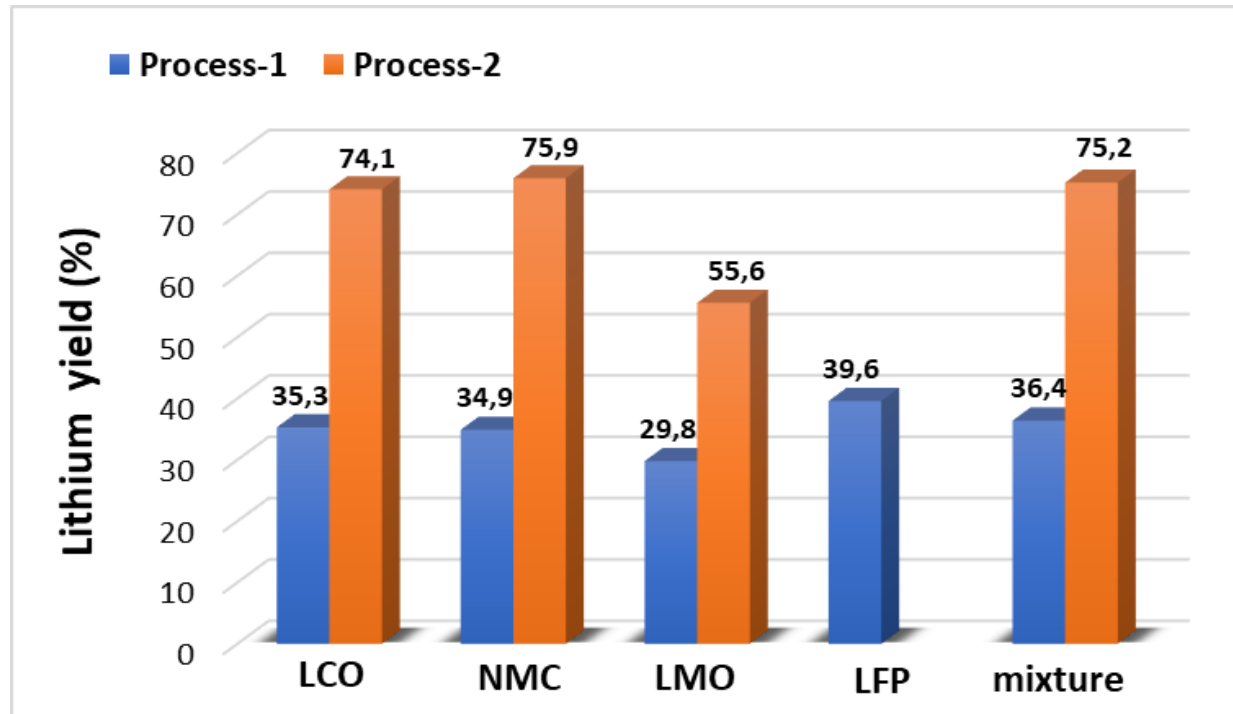
## Verfahrensschritte im Detail



- Reaktives Kugelmahlen: Transformation von Kathodenmaterial (z.B.  $\text{LiCoO}_2$ ) in wasserlösliche Li-Verbindungen und z.B. unlösliches Co und  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- $\text{Li}_2\text{O}$  reagiert über ein spezielles Waschverfahren mit Wasser zu  $\text{Li}_2\text{CO}_3$
- Übergangsmetalle können ebenfalls in wasserlösliche Verbindungen überführt werden
- Recycelte Materialien stehen anschließend für erneute Synthese von Aktivmaterialien zur Verfügung

# 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.



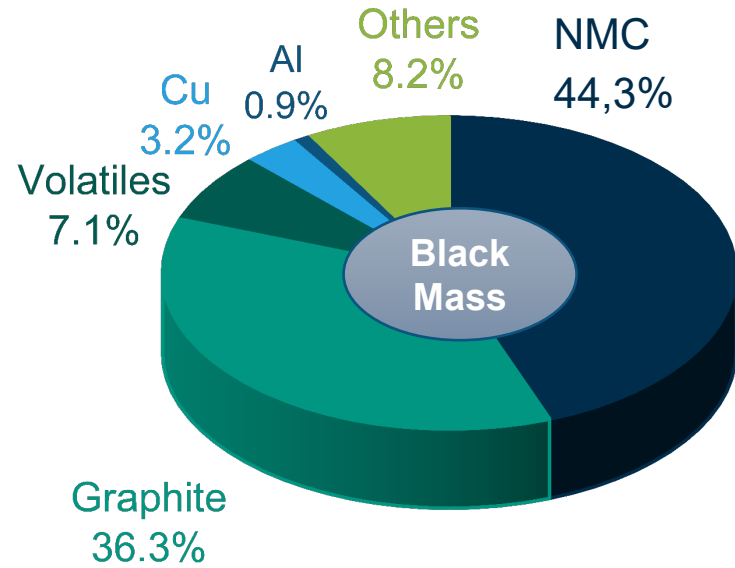
- **KIT Aufgaben innerhalb des Konsortiums:**
  - **Lithium Recycling aus Altbatterien (Black Mass).**
- **Partners:** Foundation Technalia Research & Innovation, ACCUREC, Hydrometal, Eco Recycling, Arkema, TES-AMM, Watt4Ever, LEITAT, VITO, Chalmers University of Technology, University of Agder, Sapienza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



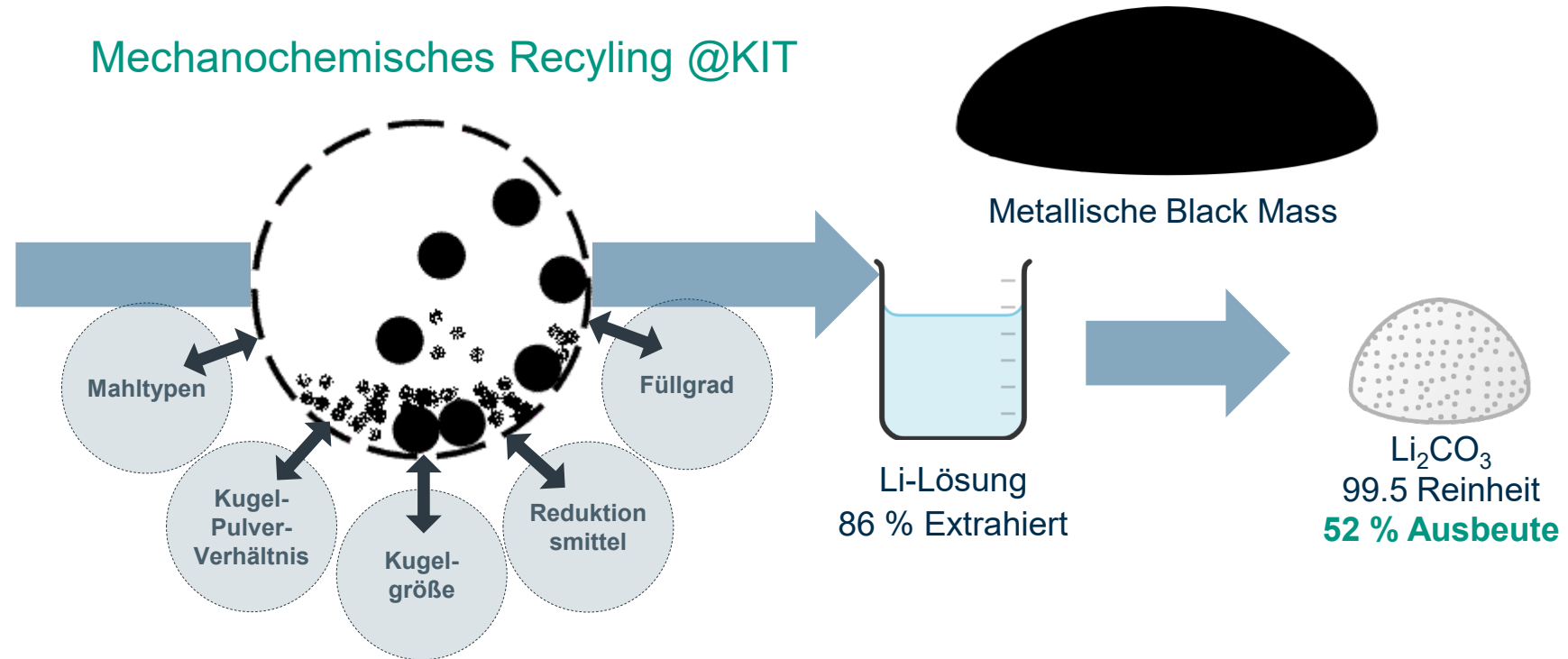
Funded by the European Union under Grant Agreement No 101069685  
<https://www.rhinoceros-project.eu/>



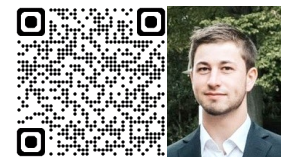
# Mechanochemisches Recycling ist auf Black Mass anwendbar



## Mechanochemisches Recycling @KIT



- Graphit und Lösemittel senken die Reaktionsgeschwindigkeit deutlich, können aber zum Teil entfernt werden.
- Große Mengen Al machen Probleme bei der Lithium Extraktion
- Wiedergewonnene Lithium muss von F<sup>-</sup> und Al<sup>3+</sup> Ionen gereinigt werden
- 52 % des Li wurden als Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> in Batterie-Reinheit aus der Black Mass gewonnen



Raphael Sieweck

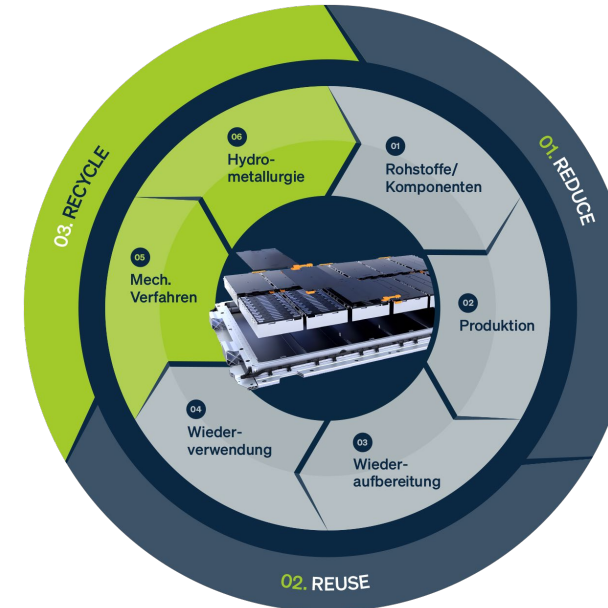
# LiBinfinity: Entwicklung eines ganzheitlichen und nachhaltigen Recyclingansatzes für Lithium-Ionen-Batterien



- **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



Federal Ministry  
for Economic Affairs  
and Climate Action



Was sind die Bedingungen  
für eine erfolgreiche  
Re-Synthese?

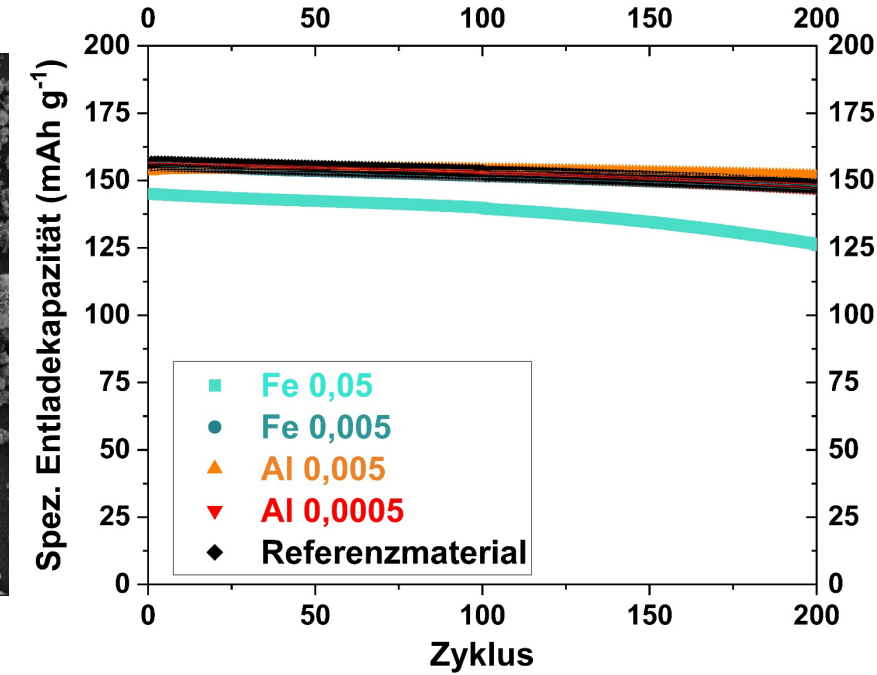
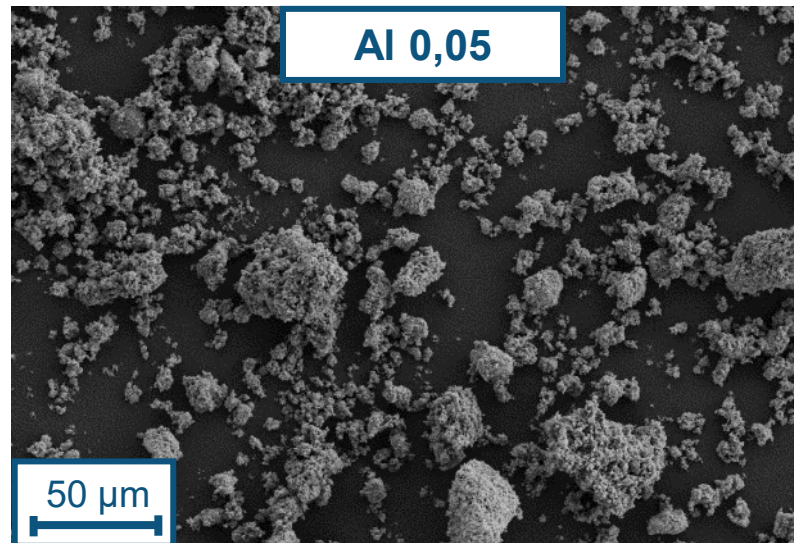
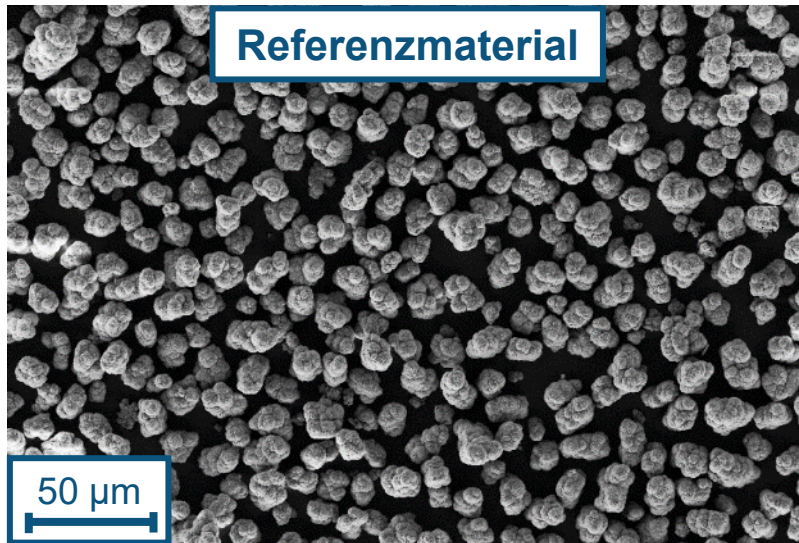


Wie gut sind Li-Ion  
Batterien, die aus  
rezyklierten Materialien  
hergestellt werden?

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



# 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



Open Acces Paper  
(Labormaßstab):

J. Chable *et al*, 2025,  
*J. Electrochem. Soc.*,  
172 020532

## Elektrochemische Leistungen:

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

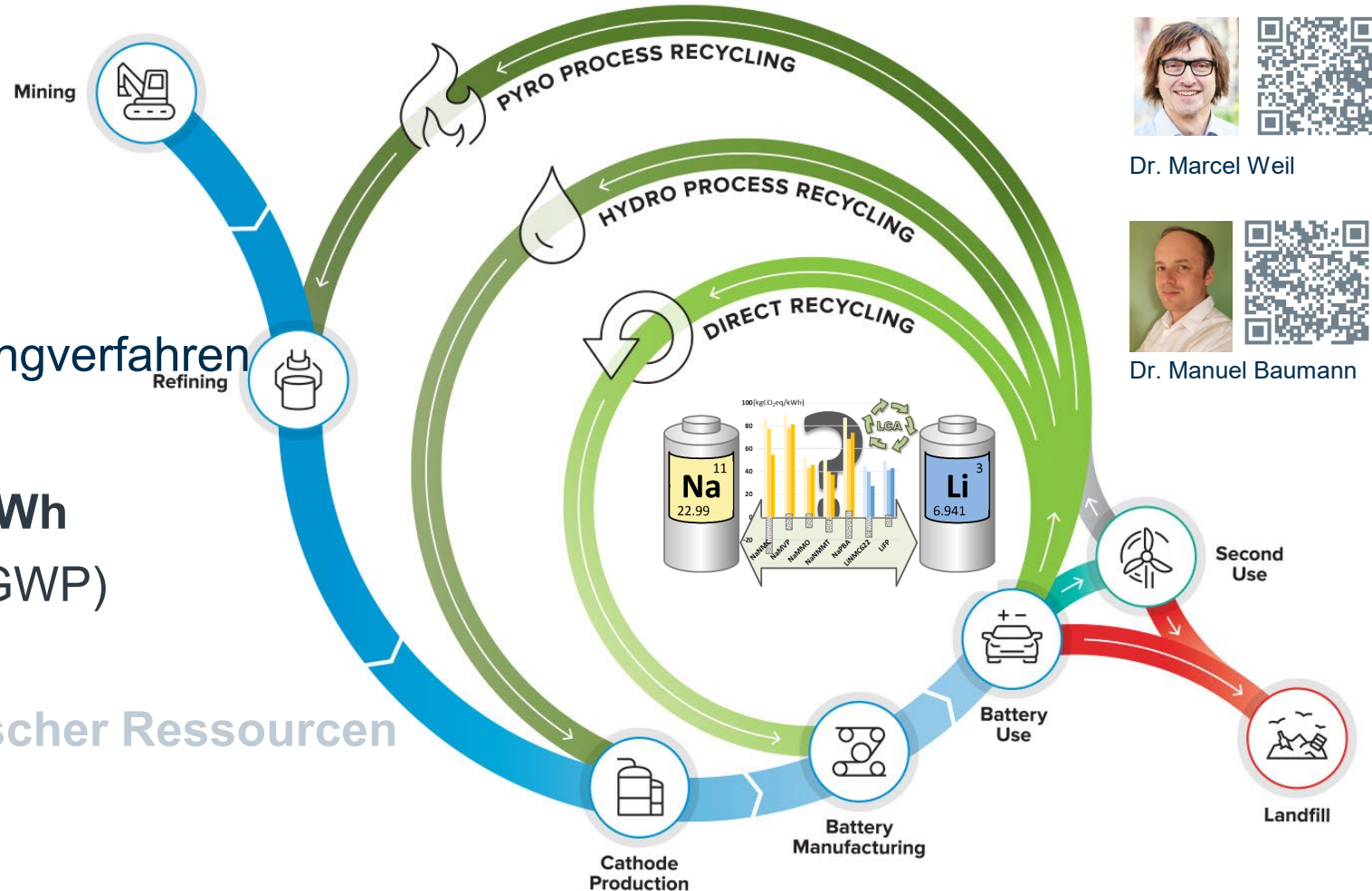
# Lebenszyklusanalyse auf Zellebene: Vergleich Natrium- zu Ionen-Batterien - ein modellbasierter Ansatz

- **Berücksichtigung von**

- Herstellungsphase
- Nutzungsphase
- EoL Phase einschließlich Recyclingverfahren

## Kategorien der Auswirkungen pro kWh

- **Globales Erwärmungspotenzial (GWP)**  
in kg CO<sub>2</sub> eq. / kWh
- **Potenzial zur Erschöpfung abiotischer Ressourcen (ADP)**  
in kg Sb eq. / kWh\*



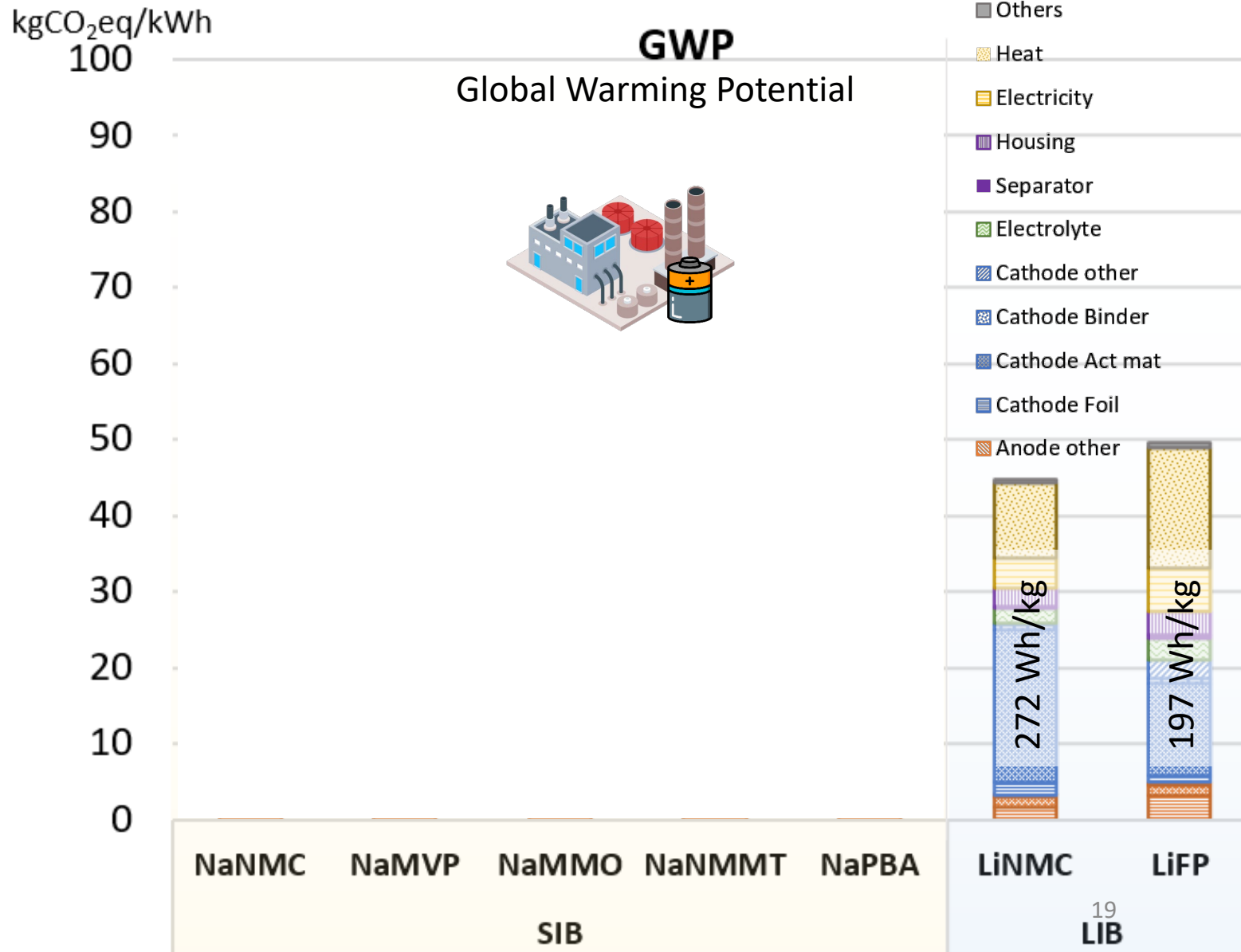
Dr. Marcel Weil



Dr. Manuel Baumann

\*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))

# Lebenszyklusanalyse auf Zellebene - GWP unter Berücksichtigung des **Herstellungsverfahrens**



## GWP

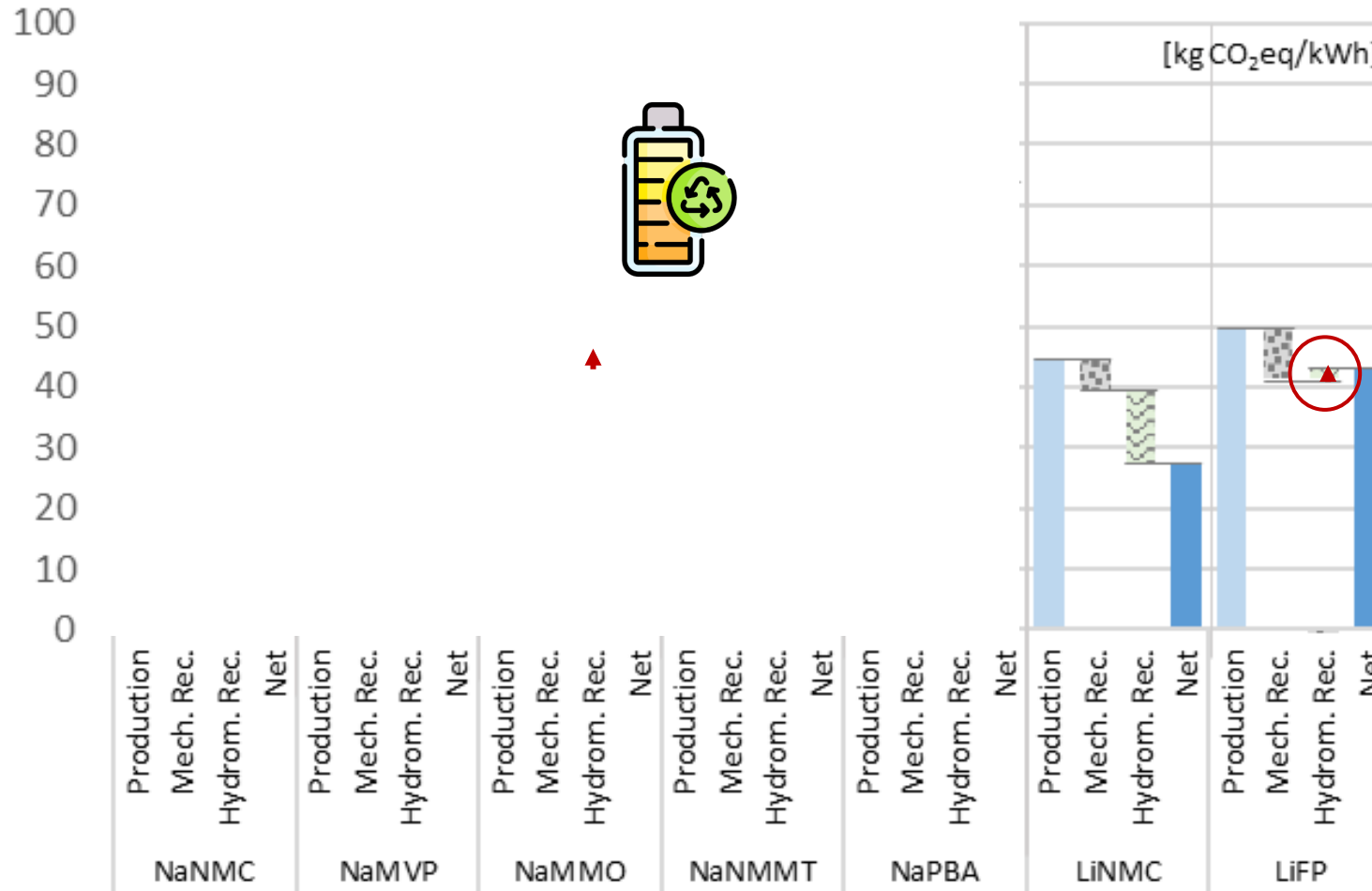
- Gute GWP-Ergebnisse für LIB und SIB Typ MMO und NMMT (hohe Energiedichte)
- **Haupttreiber**
- Kathodenaktives Material
- Herstellungsenergie
- Energiedichte



Veröffentlichung: Sustainable energy & fuels, 24, 2021. [doi:10.1039/d1se01292d](https://doi.org/10.1039/d1se01292d)

# Lebenszyklusanalyse auf Zellebene – GWP unter Berücksichtigung des Recyclingverfahrens

GWP = Global Warming Potential



## GWP

- Beste GWP-Ergebnisse für NMC<sup>622</sup>
- 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](https://doi.org/10.1039/d1se01292d)

# Zusammenfassung

- Es gibt viele verschiedene, teilweise ergänzende Ansätze zur Realisierung nachhaltigerer wiederaufladbarer Li-Batterien, darunter:
  - Die Verwendung von  $\text{H}_2\text{O}$  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