

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis

## Teil 1 – Kurzbericht

<b>Vorhabenbezeichnung:</b> ecoLiga – Recycling und Resynthese von Kohlenstoffmaterialien aus Lithium- Batterien: Rückgewinnung, Aufbereitung, Wiedereinsatz und angepasstes Zelldesign	
<b>Zuwendungsempfänger:</b> TU Braunschweig – Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF)	<b>Förderkennzeichen</b> 03XP0326D
<b>Projektleiter*in</b> Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann	<b>Laufzeit</b> 01.11.2020 – 31.01.2024

### 1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Das Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der TU Braunschweig war im Rahmen des Projektes ecoLiga für die Datenerhebung von Energie- und Materialflüssen der Prozessschritte zur Rückgewinnung von Graphit aus Lithium-Batterien zuständig, die anschließend die Bilanzierungsgrundlage für die Nachhaltigkeitsbewertung in Form einer Ökobilanz bilden sollte. Nach erfolgter Datenaufnahme sollte eine erste modellbasierte Abschätzung der Ressourcenströme auf Basis einer Material- und Energieflussanalyse (MEFA) durchgeführt werden. Die Ergebnisse sollten anschließend in die weitere Prozessentwicklung bei den Konsortialpartnern einfließen. Im abschließenden AP6 sollte das IWF eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung vornehmen, die mit Hilfe einer Ökobilanz umgesetzt werden sollte. Neben dem Eintrag der Ergebnisse in das eigene Projekt sowie das Begleitprojekt sollte zudem die Übertragung der Prozesskette auf innovative Zellsysteme mit unterschiedlicher Kohlenstoffzusammensetzung untersucht werden sowie die Ermittlung der aus ökologischer Perspektive optimalen Prozessparameter durchgeführt werden.

### 2. Ablauf des Vorhabens

Das Projekt startete mit Verzögerungen bei der Versuchsdurchführung und somit der Datenaufnahme und –bereitstellung durch die Projektpartner aufgrund der Covid-19-Pandemie. Daher stand zunächst die Analyse der Primärproduktion, welche als Benchmark hinzugezogen wurde, im Fokus der Arbeiten des IWFs. Zudem wurde ein qualitatives Grundmodell der Prozesskette in Abstimmung mit den Projektpartnern erstellt, welches über den Projektverlauf iterativ angepasst und aktualisiert werden konnte. Die Datenaufnahme erfolgte dann hauptsächlich im zweiten und dritten Projektjahr, welche vollumfänglich für die Schritte der Vorbehandlung, Flotation und hydrometallurgische Aufreinigung des Graphits durchgeführt wurde. Bei der Resynthese wurde sich auf die Aufnahme der Materialflüsse und Auswertung der Analyseergebnisse zur Qualität der Materialien und Zellen beschränkt.

Die Ergebnisse der Material- und Energiefluss-Analyse sowie der ersten ökologischen Bewertung wurden zur Identifikation der ökologischen Hotspots und kritischen Prozessparameter

genutzt. Erkenntnisse aus der ökologischen Bewertung wurden zur weiteren Prozessentwicklung und –optimierung an die Projektpartner weitergegeben und diskutiert. Auf Basis der ökologischen Bewertung von Parametervariationen und Szenarien konnte zudem ein ökologisches Best-Case-Szenario der Prozesskette identifiziert werden. Abschließend wurde die Übertragung der Prozesskette auf Lithium-Schwefel-Zellen ökologisch bewertet. Aufgrund von Sicherheitsproblemen bei der Versuchsdurchführung und damit einer unzureichenden Datengrundlage wurde sich auf eine qualitative ökologische Analyse sowie der Ableitung von Empfehlungen für die weitere Prozesskettenentwicklung beschränkt. Insgesamt konnten alle Arbeitspakete des IWF erfolgreich abgeschlossen werden.

### **3. Wesentliche Ergebnisse**

Folgende Ergebnisse wurden im Rahmen des Projektes ecoLiga seitens des IWFs der TU Braunschweig erzielt:

- Quantifizierung der Material- und Energieflüsse für jeden Prozessschritt bis zur Rückgewinnung des Graphits (mit HZDR und RWTH IME): Bezogen auf die Masse dominiert der Wasserbedarf der Flotation und hydrometallurgischen Aufreinigung die Prozesskette. Der höchste Energiebedarf besteht bei der thermischen Vorbehandlung der Zellen.
- Erstellung eines Sachbilanz-Modells für die Rückgewinnung von Graphit mittels der ecoLiga-Prozesskette: Es wurde ein modulares Modell unter Nutzung der Ökobilanzdatenbank ecoinvent im LCA-Software-Framework brightway2 erstellt.
- Ökologische Bewertung der ecoLiga-Prozesskette und Identifikation von ökologischen Hotspots sowie Ableitung von Handlungsempfehlungen für die weitere Prozessentwicklung: Der Bedarf an Elektrizität sowie der Einsatz von Chemikalien bei der hydrometallurgischen Aufreinigung sowie Abgasbehandlung dominieren die Umweltwirkung der Prozesskette.
- Auswertung von Parameter-/Szenario-Studien für die Vorbehandlung und hydrometallurgische Aufreinigung (mit RWTH IME) zur ökologischen Optimierung der Prozesse: Stickstoff wurde als aus ökologischer Perspektive optimales Schutzgas bei der Vorbehandlung identifiziert. Bei der hydrometallurgischen Aufreinigung sollte vor allem der Einsatz von Wasserstoffperoxid reduziert werden, um die Umweltwirkung zu vermindern.
- Ökologisches Benchmarking mit der Primärproduktion von Graphit unter Einbezug der Qualitätsunterschiede: Bei einer Hochskalierung der ecoLiga-Prozesskette könnte das Treibhauspotential der rezyklierten Graphits um bis zu 75% geringer sein als das von synthetischem Graphit.
- Qualitative Bewertung der Übertragung der ecoLiga-Prozesskette auf die Rückgewinnung von Graphit aus Lithium-Schwefel-Zellen: Die ecoLiga-Prozesskette zeigt großes ökologisches Potential für das Recycling von Lithium-Schwefel-Zellen, da diese neben dem Lithium auch die Rückgewinnung von Graphit ermöglicht. Es müssen jedoch weitere Entwicklungsarbeiten erfolgen, um dazu eine quantitative Bewertung zu ermöglichen.

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis

## Teil 2 – Eingehende Darstellung

<b>Vorhabenbezeichnung:</b> ecoLiga – Recycling und Resynthese von Kohlenstoffmaterialien aus Lithium- Batterien: Rückgewinnung, Aufbereitung, Wiedereinsatz und angepasstes Zelldesign	
<b>Zuwendungsempfänger:</b> TU Braunschweig – Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF)	<b>Förderkennzeichen</b> 03XP0326D
<b>Projektleiter*in</b> Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann	<b>Laufzeit</b> 01.11.2020 – 31.01.2024

### 1. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse des Teilvorhabens

Die Hauptaufgabe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der TU Braunschweig im Projekt ecoLiga bestand in der Nachhaltigkeitsbewertung der Prozesskette (AP 6). Dazu war das IWF für die Sammlung von Prozessdaten in allen weiteren Arbeitspaketen (abgesehen von AP1) involviert.

#### Modellbasierte Abschätzung der ökologischen Auswirkungen (UAPs 2.4, 3.3, 4.2, 5.3)

Für jeden Schritt der ecoLiga-Prozesskette erfolgte im Rahmen der Unterarbeitspakete 2.4, 3.3, 4.2, und 5.3 eine modellbasierte Abschätzung der Umweltauswirkungen auf Basis von Messungen relevanter Energie- und Materialströme. Dabei wurde in AP2 die Vorbehandlung, in AP3 die Flotation, in AP4 die Rohstoffextraktion und -raffination und in AP5 die Resynthese untersucht. Da das grundsätzliche Vorgehen für die verschiedenen Unterarbeitspakete identisch war, werden die Ergebnisse hier gemeinsam berichtet.

Einführung der Projektpartner in die Ökobilanzierung: Zunächst wurde eine Einführung der Projektpartner in das Thema Life Cycle Assessment im Rahmen eines Online-Workshops beim Treffen der Querschnittsinitiative Batterielebenszyklus des Cluster greenBatt durchgeführt, um die Projektpartner für die anstehenden Datenaufnahmen zu sensibilisieren.

Qualitative Modellierung der Prozesskette: Anschließend wurden gemeinsam mit den Projektpartnern im Rahmen von gemeinsamen Workshops und Gesprächen die grundlegenden Prozessschritte sowie weitere Details zur Prozesskette ermittelt.

- Es wurden die Inputmaterialien und Zwischenprodukte der jeweiligen Unterprozesse sowie die dazugehörigen Nebenprodukte und Abfallströme identifiziert. Zudem wurden die von den Prozessen benötigten Energieströme qualitativ dokumentiert.
- Es wurden weitere Informationen zu dem Equipment, der Größenordnung der jeweiligen Prozesse, der beeinflussbaren Prozessparameter sowie der genutzten Software zur Prozesssimulation und -durchführung erhoben.

Auf Basis der erhobenen Daten erfolgte eine erste qualitative Modellierung der jeweiligen Prozessschritte, d.h. eine Definition der jeweiligen Prozessinputs und -outputs, welche die Grundlage der weiteren Modellentwicklung für die ökologische Bewertung der Prozesskette bildete (für Beispiel Hydrometallurgie siehe Abbildung 1).

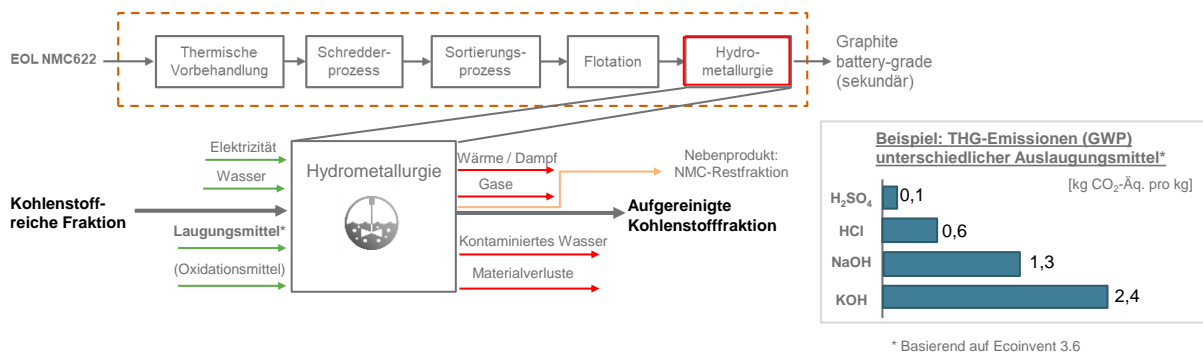


Abbildung 1: Qualitative Modellierung des hydrometallurgischen Prozessschrittes.

**Ermittlung vergleichbarer Prozessdaten:** Parallel zur Datenaufnahme wurden Daten zu vergleichbaren Prozessen in der Literatur recherchiert. Es konnte eine LCA-Studie zum Recycling von Graphit [1] identifiziert werden, welche im weiteren Projektverlauf als Referenz herangezogen wurde.

**Ermittlung der Prozessdaten mittels Datenaufnahmebogen:** Für alle Unterarbeitspakete wurde ein Datenaufnahmebogen, welcher innerhalb des greenBatt-Clusters abgestimmt und einheitlich verwendet wurde, an die jeweils beteiligten Projektpartner versendet. Mit Hilfe des Datenaufnahmebogens konnten die Höhe der bereits identifizierten, für die Ökobilanz relevanten Material- und Energieflüsse erfasst werden. Für jeden Prozessschritt kann im Datenaufnahmebogen ein Arbeitsblatt angelegt werden, welches sich in drei Hauptbereiche gliedert: Prozessparameter & Geräte, Inputs (Material- und Energieströme) und Outputs (Produkte, Nebenprodukte, Abfall, Emissionen). Die Datenaufnahmebögen wurden zur Unterstützung der Projektpartner für die jeweiligen Prozessschritte vorkonfiguriert und es wurde sich über die Erfassungsmöglichkeiten der Material- und Energieflüsse beraten.

**Ergebnisse der Material- und Energieflussanalyse (MEFA):** Basierend auf den aufgenommenen Prozessdaten wurden für die Prozesse der Vorbehandlung (UAP 2.4), der Flotation (UAP 3.3) und der hydrometallurgischen Aufreinigung (UAP 4.2) Sankey-Diagramme der Material- und Energieflüsse erstellt. Auf diese Weise wurde ein Überblick über die prozessspezifischen Inputs und Outputs geschaffen.

Die **Vorbehandlung (UAP 2.4)** der genutzten Pouch-Zellen gliedert sich in die thermische und mechanische Vorbehandlung (siehe Abbildung 2). Zunächst wird das Zellmaterial auf ca. 600°C erhitzt. Dabei wird Stickstoff zugeführt und es bilden sich Abgase, welche behandelt werden müssen, bevor diese in die Atmosphäre emittiert werden können. Anschließend an die thermische Vorbehandlung wird das Zellmaterial durch Zerkleinern und Sieben mechanisch weiter getrennt. Hauptflüsse der Vorbehandlung sind der Energiebedarf der Pyrolyse sowie die Materialauftrennung beim Siebvorgang entsprechend der Partikelgrößen.

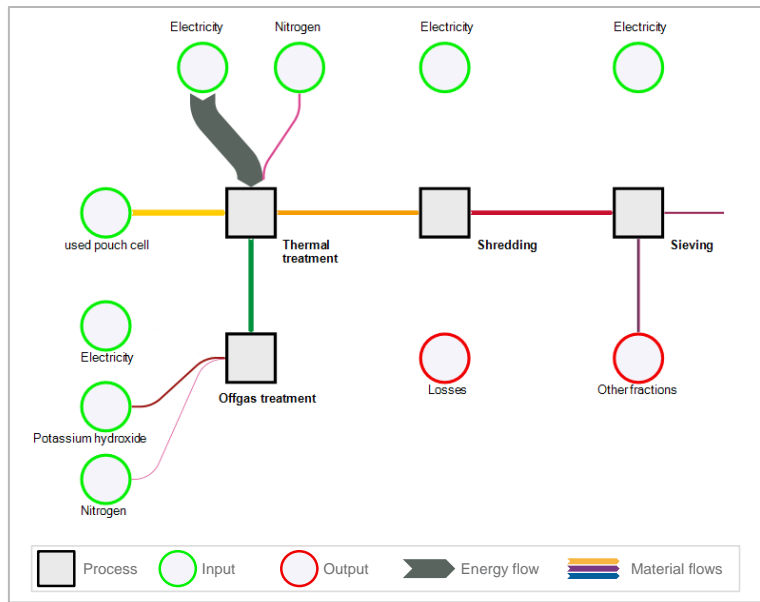


Abbildung 2: Material- & Energieflussanalyse der thermischen & mechanischen Vorbehandlung des Zellmaterials.

Auf die Vorbehandlung folgt die Flotation (UAP 3.3), bei welcher die Schwarzmasse in eine Metallreiche und eine Kohlenstoffreiche Phase getrennt werden. Dazu werden die Chemikalien 4-Methyl-2-pentanol (MIBC) und Kerosin eingesetzt. Hauptmassenfluss des Verfahrens ist jedoch der Bedarf an Wasser (siehe Abbildung 3), welches anschließend an den Flotationsprozess eine Abwasserbehandlung durchläuft, bevor es emittiert oder wiederverwendet werden kann.

Die entstehenden Phasen werden mittels Hydrometallurgie (UAP 4.2) weiter aufgereinigt. Dazu wird zunächst eine Lösung aus Schwefelsäure erwärmt. Anschließend wird zunächst die kohlenstoffreiche Phase aus der Flotation zusammen mit Wasserstoffperoxid hinzugegeben. Eine weitere Erwärmung der Lösung ist aufgrund der exothermen Reaktion nicht notwendig. Nach ca. einer Stunde Reaktionszeit werden die Rückstände der kohlenstoffreichen Lösung filtriert und das gewonnene Graphit anschließend getrocknet. Das Verfahren wird anschließend mit dem Rückstand der Schwefelsäure für die metallreiche Phase aus der Flotation zusammen mit frischem Wasserstoffperoxid wiederholt.

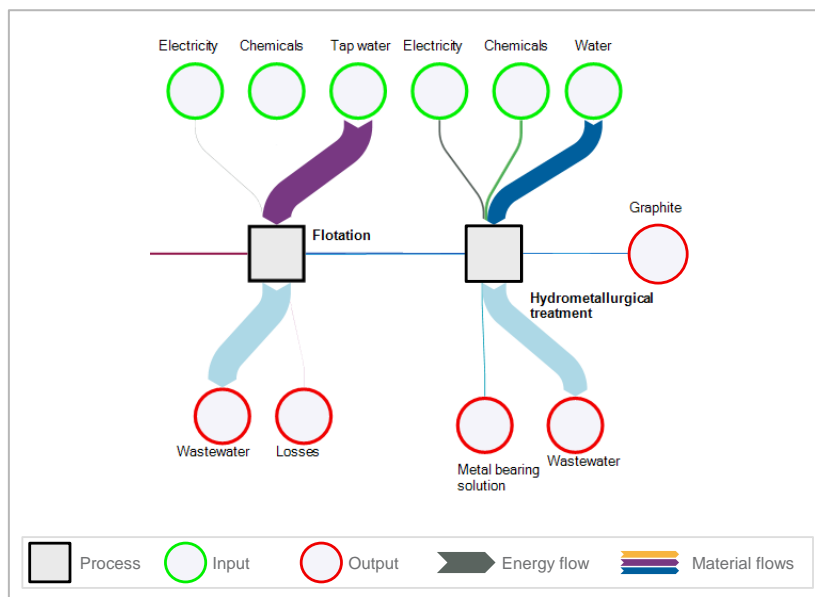


Abbildung 3: Material- & Energieflussanalyse der Flotation und hydrometallurgischen Aufreinigung.

Für den Prozess der Resynthese (UAP 5.3) und anschließenden Elektroden- und Zellherstellung wurde gemeinsam mit den Projektpartnern vom Fraunhofer IWS entschieden, keine vollumfänglichen Messungen der Material- und Energieströme durchzuführen. Die Elektroden- und Zellherstellung stellt einen hoch komplexen Prozess dar, für welchen die Messung aller Material- und Energieflüsse äußerst umfangreich gewesen wäre und den geplanten Arbeits- und Zeitumfang überschritten hätte. Die Messungen wären zudem nur dem Projekterfolg dienlich gewesen, wären unterschiedliche Material- und Energieflüsse für das primäre und sekundäre Graphit aufgetreten. Dies wurde von den Prozessexperten als unwahrscheinlich bewertet. Zudem wäre bei Auftreten dieser Unterschiede zusätzlich zu prüfen gewesen, ob diese repräsentativ für das jeweilige Material sind oder aufgrund der Prozessdurchführung auf Labormaßstab auftreten.

Um jedoch die Qualität des rückgewonnenen Graphits beim erneuten Einsatz in Elektroden und Zellen zu berücksichtigen, wurden die Versuchs- und Analyseergebnisse des Fraunhofer IWS in die ökologische Bewertung integriert. Da sich bei vorherigen Untersuchungen Unterschiede in der massenbezogenen Kapazität des rezyklierten Graphits gezeigt haben, wurde im weiteren Projektverlauf die Flächenbeladung für verschiedene Anteile von primärem und sekundärem Graphit erhöht, um dieselbe Kapazität pro Fläche zu erreichen (siehe Abbildung 4). Die Angaben zu den Masseströmen des Graphits und dem zusätzlich benötigten Binder sowie Leitruß wurden für die erweiterte ökologische Bewertung des rezyklierten Graphits aufgenommen. Zur Erreichung derselben Kapazität ergibt sich eine ca. 11,8% höhere Gesamtmasse der Elektrode pro Fläche bei Einsatz für 100% recyceltem Graphit in Vergleich zu primärem Graphit.

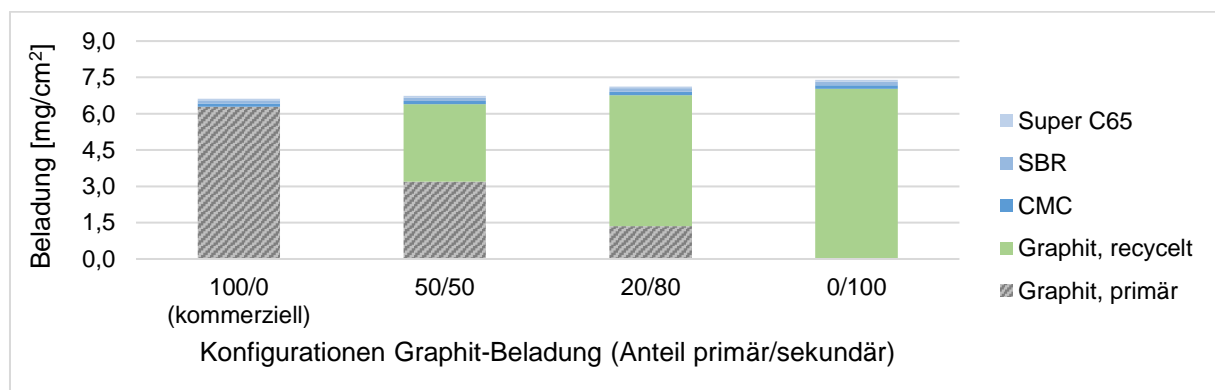


Abbildung 4: Massen des eingesetzten Graphits, Binders und Leitruß für eine theoretische Flächenkapazität von 2,2 mAh/cm<sup>2</sup> (basierend auf Daten des Fraunhofer IWS).

Parameter-Studie zur hydrometallurgischen Aufreinigung (UAP 4.2): Zur ökologischen Bewertung der seitens der RWTH Aachen am IME durchgeführten Parameterstudie für die hydrometallurgische Aufreinigung wurde zudem ein weiteres Prozessmodell für die Aufreinigung aufgestellt, welches aufgrund veränderter Systemgrenzen gegenüber dem Modell der gesamten Prozesskette eine rein komparative Bewertung der verschiedenen Prozessparameter ermöglicht (siehe Abbildung 5). Dabei werden innerhalb der Systemgrenzen nur solche Masse- und Energieflüsse betrachtet, welche sich bei Anpassung der ausgewählten Prozessparameter verändern. Ausgewertet wurde der Einfluss der Nutzung zweier verschiedener Säuren (Schwefelsäure und Salzsäure), das Volumen des zugegebenen Wasserstoffperoxids (20 oder 100 ml), die Temperatur der Säure (40° oder 60°C) sowie deren Konzentration (2 oder 3 mol/l). Insgesamt ergaben sich 16 verschiedene Parameterkonfigurationen, welche im Modell implementiert wurden. Die technisch und

ökologisch vorteilhafteste Parameterkonfiguration wurde anschließend in Abstimmung mit den Projektpartnern in das Gesamtprozessmodell übernommen.

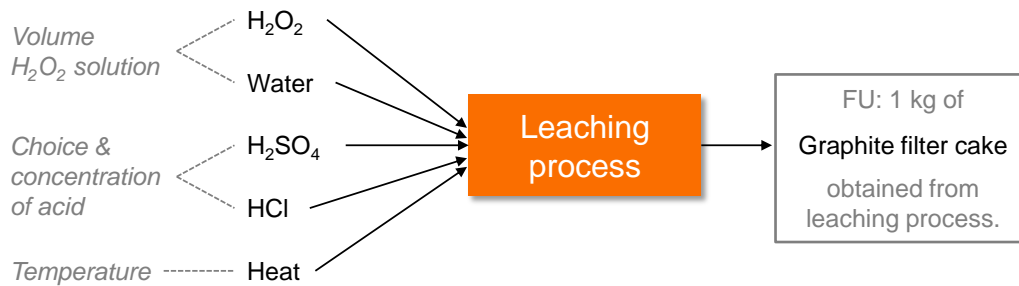


Abbildung 5: Prozessmodell für die ökologische Bewertung der von der RWTH Aachen am IME durchgeführten Parameterstudie für die hydrometallurgische Aufreinigung.

### Abschließende ökologische Nachhaltigkeitsbewertung (AP 6):

Ziel des AP6 war die Durchführung eines Life Cycle Assessments der gesamten ecoLiga-Prozesskette im Rahmen der abschließenden Nachhaltigkeitsbewertung. Um das Reduktionspotential der ökologischen Auswirkungen durch den Einsatz von Sekundär-Graphit zu ermitteln, wurde zudem ein Benchmarking der ecoLiga-Prozesskette mit der Primärproduktion von Graphit in Bezug auf das Treibhauspotential durchgeführt (KPI 4). Weiterhin wurden verschiedene Szenarien zur Optimierung des Recyclingprozesses identifiziert.

### Ökobilanzierung zur Quantifizierung der ökologischen Aufwendungen und Benefits der Prozesskette (UAP 6.1)

Identifikation eines Referenzdatensatzes für die primäre Graphitproduktion: Um einen Referenzdatensatz für die Primärproduktion von Graphit zu identifizieren, wurde eine kombinierte Datenqualitätsbewertung und Unsicherheitsanalyse der verfügbaren Datensätze für Naturgraphit und synthetischen Graphit durchgeführt (vgl. Publikation Engels et al 2022 [2], Kadi4Mat Persistent ID 2596). Es wurde festgestellt, dass die verfügbaren Datensätze eine geringe Datenqualität (im englischen Data Quality Rating, DQR) aufweisen und nicht den Datenqualitätsanforderungen zur Nutzung als Referenzdatensatz entsprechen (siehe Abbildung 6).

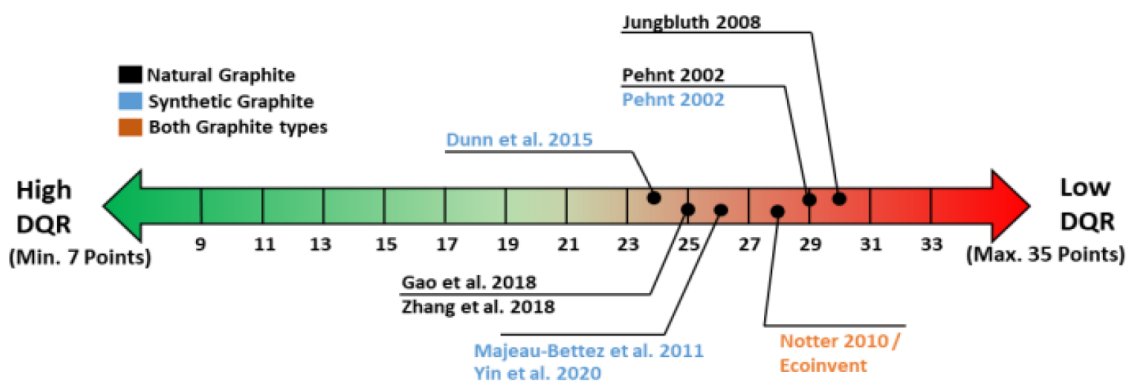


Abbildung 6: Datenqualitätsbewertung der verfügbaren Graphit-Datensätze (vgl. Engels et al. 2022a).

Erstellung eines Datensatzes für die Primärproduktion von Naturgraphit: Aufgrund der Ergebnisse der Datenqualitätsbewertung bestehender Datensätze wurde parallel zum Projekt ecoLiga gemeinsam mit der Volkswagen AG und der ProGraphite GmbH ein LCI-Datensatz für die Herstellung von Naturgraphit entwickelt, welcher eine vergleichsweise höhere Datenqualität (ca. 11 DQR-Punkte, vgl. Abbildung 6) besitzt und als Referenzdatensatz genutzt werden kann (vgl. Publikation Engels et al 2022: Life cycle assessment of natural graphite production for lithium-ion battery anodes based on industrial primary data, Journal of Cleaner Production [3]).

Entsprechend dem neu entwickelten Datensatz besitzt die Herstellung von Naturgraphit in China ein Treibhauspotential in Höhe von 9,6 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg Graphit, welches größtenteils vom Beschichtungsprozess sowie der Flotation und Spheronization des Graphits verursacht wird. Im weiteren Projektverlauf wurde zudem ein weiterer aktueller Datensatz für die Herstellung von synthetischem Graphit identifiziert, welcher ein Treibhauspotential in Höhe von 20,6 kg CO<sub>2</sub>/kg Graphit angibt [4]. Die beiden genannten Datensätze wurden im weiteren Projektverlauf für das Benchmarking der ecoLiga-Prozesskette mit der Primärproduktion herangezogen.

Definition des Ziels und Untersuchungsrahmens: Das Ziel der Ökobilanz ist die Ermittlung der Umweltwirkung der Graphit-Rückgewinnung und die Ermittlung von ökologischen Hotspots in der Prozesskette. Dazu wurde die funktionelle Einheit „Rückgewinnung von 1 kg Graphit“ gewählt, welche zudem den Vergleich mit der Primärproduktion ermöglicht. Es wird die Prozesskette von der genutzten Pouch-Zelle bis hin zum zurückgewonnenen Graphit in Batteriequalität (Systemgrenzen) am Standort Deutschland ausgewertet.

Um den Vergleich mit der Primärproduktion zu ermöglichen, wurden verschiedene bisherige Veröffentlichungen zur Ökobilanz von Batterierecyclingprozessen hinsichtlich deren methodischen Entscheidungen ausgewertet. Es wurden sieben spezifische Herausforderungen für die prospektive Ökobilanz von Recyclingprozessen in der Entwicklung identifiziert und Lösungsvorschläge erarbeitet. Die Ergebnisse wurden im Rahmen eines Konferenzbeitrages auf der „CIRP Life Cycle Engineering“-Konferenz im Mai 2023 (vgl. Publikation Haupt et al. 2023 [5], Kadi4Mat Persistent ID 2595) publiziert. Eine beispielhafte Verdeutlichung der identifizierten Herausforderungen erfolgte am Anwendungsfall der Graphit-Recyclingprozesskette aus ecoLiga in Kombination mit den Recyclingprozessen aus dem weiteren greenBatt-Projekt EVanBatter. Die Ergebnisse zeigen, dass die Recyclingprozesse das Potential zeigen, ökologisch vorteilhafter als die Primärproduktion der Materialien sein zu können. Jedoch sind die Ergebnisse mit einer hohen Unsicherheit behaftet und hängen zudem maßgeblich von methodischen Entscheidungen im Rahmen der Ökobilanz ab.

Erstellung der Sachbilanz: Die Zusammenstellung der Sachbilanz für die gesamte Prozesskette erfolgte basieren auf den Material- und Energieflussanalysen der einzelnen Prozessschritte. Die Modellierung erfolgte im LCA-Software-Framework „brightway2“ unter Nutzung der Ökobilanz-Datenbank „ecoinvent“. Bei Kopplung der Prozessschritte im Labormaßstab (unterschiedliche Batches von 100 g bis mehrere kg) kann aggregiert 1 kg Graphit aus ca. 9 kg NCM111-Pouch-Zellen unter Nutzung von ca. 123 kWh Elektrizität, ca. 38 kg Wasser sowie weiteren In- und Outputs zurückgewonnen werden. Eine Übersicht der Prozesskette befindet sich in Abbildung 7. Weiterhin wurde ein erstes Upscaling der Modellierung vorgenommen, bei welchem der Energiebedarf und die Ausschussraten basierend auf Literaturdaten für einen Durchsatz von 100 kg Graphit pro Batch angepasst wurden.

Die erhobene Sachbilanz wurde erstmalig im September 2023 an das Begleitprojekt des greenBatt-Clusters übergeben und anschließend kontinuierlich aktualisiert.

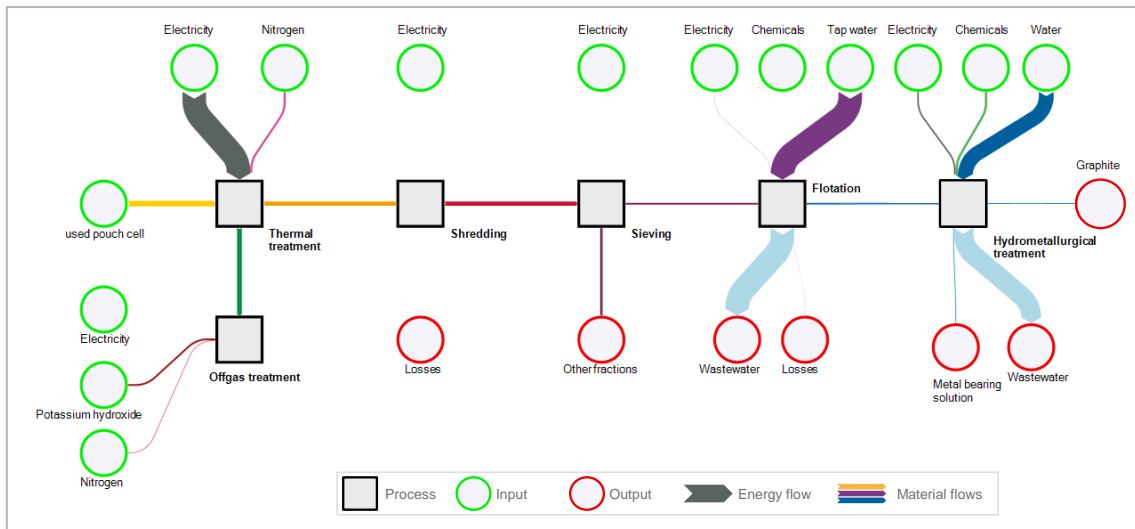


Abbildung 7: Übersicht der Material- und Energieflüsse zur Rückgewinnung von 1 kg Graphit.

**Wirkungsabschätzung:** Im Rahmen der Wirkungsabschätzung wurde zunächst das Treibhauspotential der Rückgewinnung von 1 kg Graphit für das Produktsystem auf Laborniveau und für die hochskalierte Modellierung ausgewertet (siehe Abbildung 8). Die Auswertung zeigt, dass das Treibhauspotential maßgeblich durch den Energiebedarf der thermischen Vorbehandlung sowie der hydrometallurgischen Aufreinigung aufgrund des intensiven Einsatzes von elektrischer und thermischer Energie sowie Chemikalien bestimmt wird. Diese Prozessschritte stellen somit Ansatzpunkte für die weitere Prozessoptimierung dar. Zudem kann sich durch eine Hochskalierung des Prozesses auf Pilotniveau und somit einer Steigerung der Prozessketten-effizienz und Reduktion von Verlusten das Treibhauspotential des Graphits weiter stark reduzieren.

Weiterhin zeigt sich, dass die Wahl der Allokationsmethode (massenbasiert oder ökonomisch 2021/2025) nur einen geringen Einfluss auf das Treibhauspotential des Sekundärgraphits besitzt. Die gewählten Allokationsmethoden setzen jedoch voraus, dass auch die metallreiche Fraktion der Schwarzmasse weiter verwertet wird. Daher sollte die im Projekt ecoLiga entwickelte Prozesskette zukünftig mit Prozessschritten zur Rückgewinnung der Metalle erweitert werden.

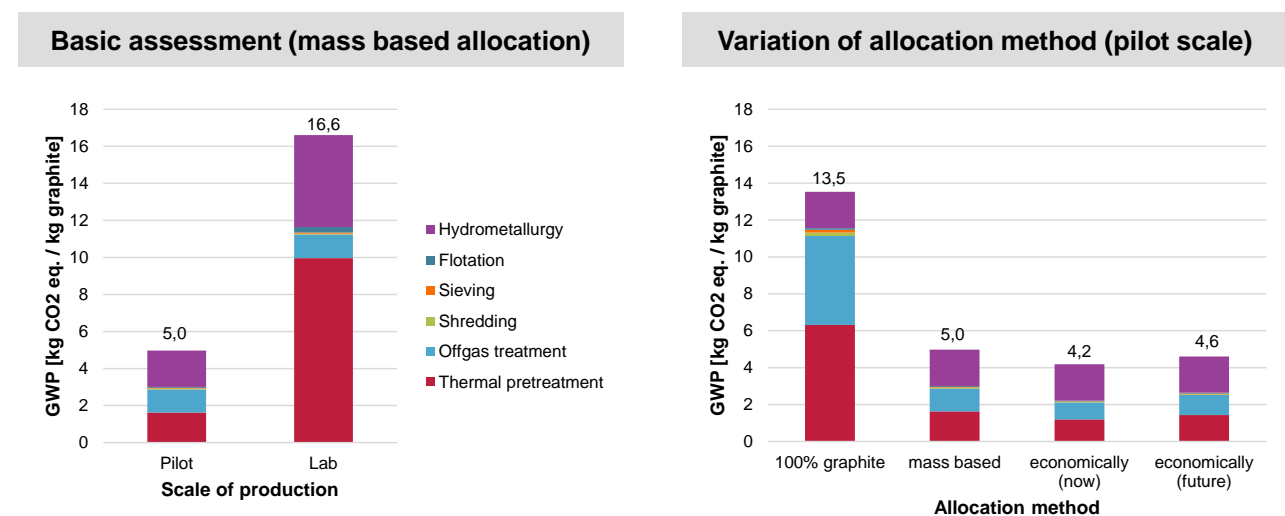


Abbildung 8: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die Rückgewinnung von 1 kg Graphit, a) Treibhauspotential für das Produktsystem auf Laborniveau (Batch < 5 kg) und hochskaliert (Batch 100 kg), b) Treibhauspotential für das hochskalierte Produktsystem unter Nutzung verschiedener Allokationsmethoden.

Neben dem Treibhauspotential wurden zudem weitere Wirkungskategorien ausgewertet und deren Haupttreiber identifiziert (siehe Abbildung 9). Dominiert wird die Umweltwirkung in den meisten Wirkungskategorien durch den Einsatz von Chemikalien in der hydrometallurgischen Aufreinigung, wie zum Beispiel Schwefelsäure oder Wasserstoffperoxid. Besonders aufgrund des hohen Anteils im Versauerungs- und photochemischen Ozonbildungspotentials sollte der Einsatz der Schwefelsäure in der weiteren Prozessentwicklung möglichst reduziert werden.

Darüber hinaus besitzt auch der Einsatz von Kaliumhydroxid zur Abgasbehandlung im Anschluss an die thermische Vorbehandlung einen signifikanten Anteil in den meisten Wirkungskategorien. Daher sollte eine auf den Prozess zugeschnittene Abgasbehandlung entwickelt werden, sodass der Einsatz von Kaliumhydroxid minimiert wird. Zur Reduktion des Anteils der thermischen Vorbehandlung aufgrund deren Energiebedarfs sollte der Einsatz alternativer, erneuerbarer Energiequellen sowie eine Reduktion der Pyrolysetemperatur geprüft werden. Der Anteil der Phasen der Zerkleinerung, Siebung und Flotation ist in allen ausgewerteten Wirkungskategorien vergleichsweise gering, sodass zunächst Optimierungen in genannten anderen Bereichen erfolgen sollten.

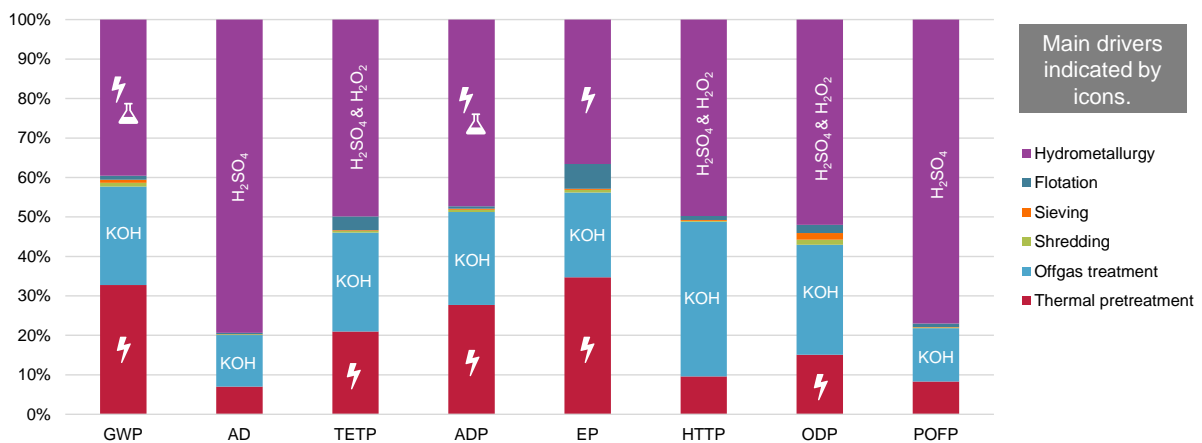


Abbildung 9: Beitragsanalyse der Umweltwirkung in ausgewählten Wirkungskategorien für die Rückgewinnung von 1 kg Graphit mittels der ecoLiga-Prozesskette (für Pilotskala und massenbasierte Allokation). Blitz: eingesetzte Elektrizität; Kolben: Chemikalien bei Hydrometallurgie. GWP: Treibhauspotential; AD: Versauerung; TETP: Terrestrische Ökotoxizität; ADP: Fossiler Ressourcenabbau; EP: Eutrophierung; HTTP: Menschliche Toxizität; ODP: Abbau der Ozonschicht; POFP: Photochemische Ozonbildung.

**Benchmarking mit Primärproduktion:** Entsprechen der KPI 4 des Projektes ecoLiga erfolgte zudem der Vergleich des Treibhauspotentials des rückgewonnenen Graphits mit dem der Primärproduktion. Ziel des Projektes ecoLiga war es, dass das Treibhauspotential des recycelten Graphits um 50% geringer als das der Primärproduktion ist. Basierend auf den Untersuchungen zur Qualität von Datensätzen für die Primärproduktion von Graphit wurden die Datensätze von Surovtseva et al. [4] für synthetisches Graphit und von Engels et al. [3] für Naturgraphit für den Vergleich herangezogen (siehe Abbildung 10). Im Vergleich mit dem Treibhauspotential von synthetischem Graphit fällt das Treibhauspotential des ecoLiga-Prozesses sowohl für den Laborprozess als auch für die Prognose für Pilotlevel deutlich (ca. 20% bzw. 75%) geringer aus. Im Vergleich mit Naturgraphit muss für das Erreichen der Reduktion des Treibhauspotentials um 50% jedoch zwingend die Skalierung des Prozesses auf Pilotlevel erfolgen sowie ggf. noch weitere Optimierungsmaßnahmen des Prozesses umgesetzt werden. Zu beachten ist, dass dieser Vergleich der Annahme zugrunde liegt, dass das rezyklierte Graphit dieselbe Qualität wie das Primärmaterial besitzt. Dies gilt in Bezug auf die Reinheit des rezyklierten Graphits (>99%), jedoch konnten in der Morphologie in bildgebenden Verfahren Unterschiede festgestellt werden, welche sich auf die Kapazitätseigenschaften auswirken.

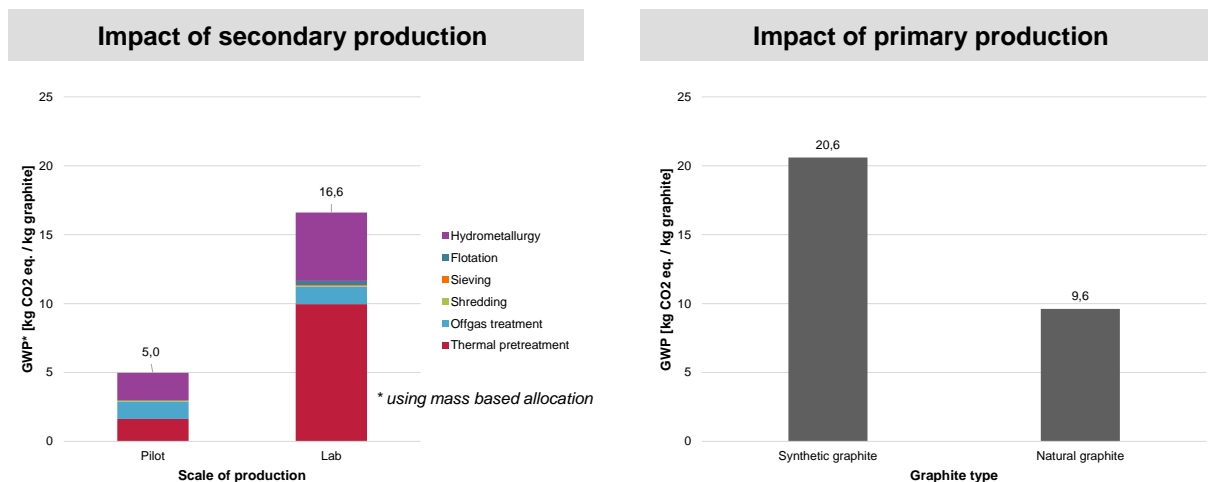


Abbildung 10: Vergleich des Treibhauspotentials für die Herstellung von 1 kg Graphit mit der ecoLiga-Prozesskette und durch Primärproduktion.

**Einbezug der Kapazitätseigenschaften:** Um die Qualitätsunterschiede zwischen primären und sekundären Graphit trotz gleicher Reinheit in die ökologische Bewertung aufzunehmen, wurden die angepassten Masseströme (höhere Flächenbelastung bei Einsatz von sekundärem Graphit notwendig) zur Erreichung der gleichen Kapazität entsprechend Versuchen des Fraunhofer IWS (vgl. Abbildung 4) ausgewertet. Es wurde das Treibhauspotential pro Quadratzentimeter der Anode unter Nutzung der vorherigen Bilanzierungsergebnisse für das sekundäre Graphit aus der ecoLiga-Prozesskette auf Pilotebene berechnet. Trotz der höheren benötigten Masse an sekundärem Graphit zur Erreichung der 2,2 mAh/cm<sup>2</sup> ist das Treibhauspotential pro Quadratzentimeter geringer, je höher der Anteil an sekundärem Graphit ist (siehe Abbildung 11). Dies resultiert aus dem geringeren Treibhauspotential des mittels der ecoLiga-Prozesskette rückgewonnenen Graphits im Vergleich zum primären Graphit und gilt sowohl für Naturgraphit als auch synthetisches Graphit. Daraus kann abgeleitet werden, dass sich trotz Qualitätsunterschieden in der Kapazität und somit einem höheren Massebedarf der Einsatz von sekundärem Graphit aus der ecoLiga-Prozesskette als ökologisch vorteilhafter in der Herstellungsphase darstellt. Im Vergleich des Einsatzes von 100% sekundären Graphit zu 100% primären Graphit ergibt sich ein um 41 bzw. 72% niedrigeres Treibhauspotential pro Fläche.

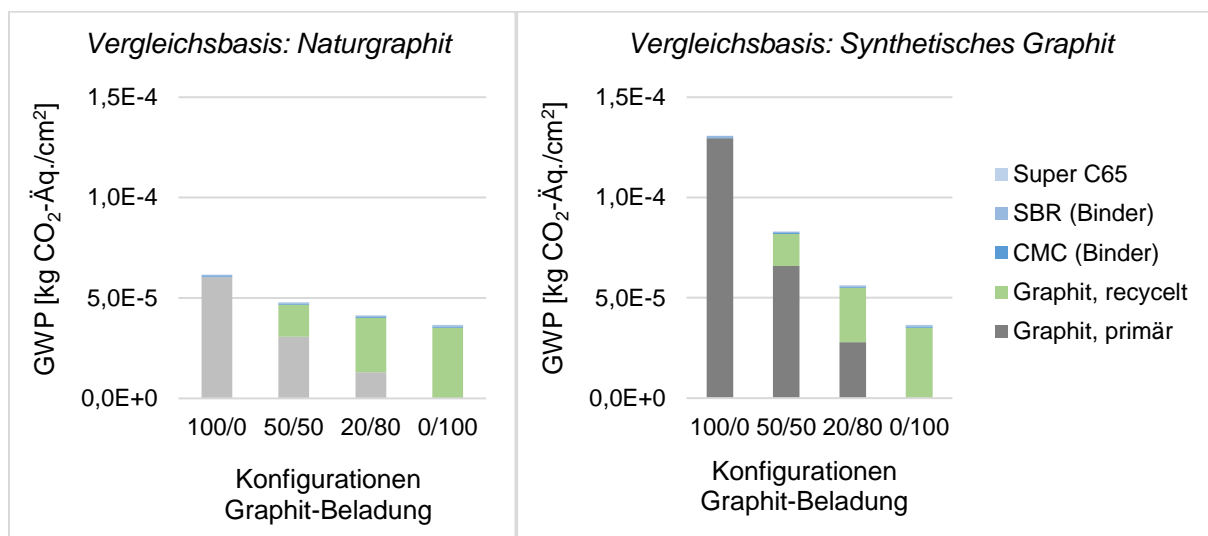


Abbildung 11: Treibhauspotential der benötigten Massenströme der Anode für eine theoretische Kapazität von 2,2 mAh/cm<sup>2</sup> bei variierendem Anteil von primärem und sekundärem Graphit (Referenz Naturgraphit links, synthetisches Graphit rechts).

Auch sich ergebene Unterschiede in der Masse der Gesamtbatterie und somit höheren Verbrauchswerten bei Einsatz in elektrischen Fahrzeugen können das geringere Treibhauspotential nicht ausgleichen (siehe Abbildung 12). Dies resultiert aus der Berechnung der zusätzlichen Emissionen durch höheres Batteriegewicht mittels Multiplikation mit Well-to-wheel-Emissionswerten entsprechend dem WLTP-Messverfahren für die Regionen Norwegen, Deutschland und Australien (Daten aus [6]), welche als Best-Case-, Durchschnitts- und Worst-Case-Szenario fungieren. Auch nach einer Laufleistung des Fahrzeugs von 300.000 km liegen in allen drei Szenarien die Treibhausmissionen der Elektrodenkonfigurationen mit sekundärem Graphit unter denen der Referenz aus 100% primärem Graphit. Lediglich bei Betrieb des Fahrzeugs in Australien (hoher Anteil fossiler Brennstoffe in Stromerzeugung) nähern sich die drei Variationen des Sekundärmaterialanteils im Treibhauspotential an, liegen jedoch weiterhin unter dem der Primärmaterial-Referenz. Somit konnte gezeigt werden, dass auch in der Nutzungsphase der Massenunterschied durch die unterschiedliche Flächenbelastung der ökologischen Vorteilhaftigkeit des Einsatzes von sekundärem Graphit nicht widerspricht.

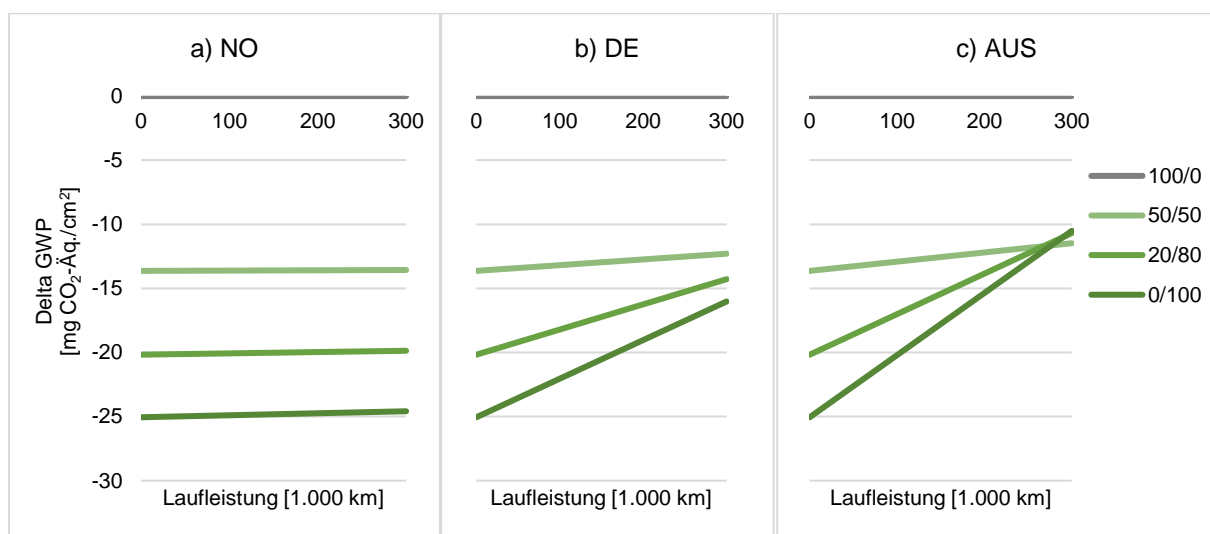


Abbildung 12: Differenz im Treibhauspotential pro Quadratzentimeter Elektrode für verschiedene Mischverhältnisse von primärem / sekundärem Graphit über die Laufleistung bei Einsatz im elektrischen Fahrzeug in a) Norwegen, b) Deutschland, c) Australien.

### Verifizierung des Best-Case Szenarios und Empfehlung eines Design for Recyclings (UAP6.2)

Im Rahmen des UAP 6.2 wurden sowohl auf Basis der Ökobilanz die optimalen Prozessparameter aus ökologischer Perspektive identifiziert sowie Empfehlungen für ein Design for Recycling abgeleitet, als auch eine erste Bewertung der Übertragung der Prozesskette auf das Recycling von Lithium-Schwefel-Zellen durchgeführt.

Szenario-Studie zur Schutzgasnutzung: Zur Ermittlung eines Best-Case-Szenarios für den Graphit-Recyclingprozess wurde eine Szenario-Studie für die Schutzgasnutzung während der Pyrolyse durchgeführt. Die Projektpartner seitens des IME der RWTH Aachen haben die Gase Stickstoff, Argon und Kohlenstoffdioxid als mögliche Schutzgase identifiziert. Basierend auf der Ökobilanzdatenbank ecoinvent wurde die Umweltwirkung der Gase pro Masseinheit in verschiedenen Wirkungskategorien ausgewertet (siehe Abbildung 13). Es zeigt sich, dass die Umweltwirkung pro Masseinheit für das Gas Stickstoff über alle acht ausgewählten Wirkungskategorien am vergleichsweise geringsten ist. Daher wurden den Projektpartnern aus ökologischer Perspektive empfohlen, bei gleichem Masseinsatz Stickstoff als Schutzgas für die Pyrolyse zu verwenden.

Wirkungskategorie / Schutzgas	Klimawandel	Fossile Ressourcen	Ökotoxizität (Süßwasser)	Eutrophierung (Süßwasser)	Ozonabbau	Feinstaub	Versauerung (Boden)	Wassernutzung
Stickstoff	16%	16%	17%	16%	17%	16%	16%	16%
Argon	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Kohlenstoffdioxid	50%	41%	79%	17%	55%	30%	29%	7%

Abbildung 13: Relative Umweltwirkung pro 1 kg Gas (Stickstoff, Argon, Kohlenstoffdioxid).

**Parameter-Studie zur hydrometallurgischen Aufreinigung:** Zur Ermittlung des Best-Case-Szenarios für den Graphit-Recyclingprozess wurde eine ökologische Bewertung der Parameterstudie des IME der RWTH Aachen für die hydrometallurgische Aufreinigung durchgeführt. Dafür wurde das Prozessmodell wie in UAP 4.2 beschrieben verwendet. Eine Auswertung des Treibhauspotentials für jede der 16 Parameterkombinationen (vgl. Abbildung 5) befindet sich in Abbildung 14. Es zeigt sich, dass eine Reduktion des Einsatzes von Wasserstoffperoxid das Treibhauspotential massiv reduzieren kann. Dies ist zudem ohne Einbußen der Qualität des Graphits möglich, wie die Reinheitsanalysen des IME zeigen (siehe Schlussbericht RWTH IME).

Die Wahl der eingesetzten Säure (Schwefel- oder Salzsäure) hat dagegen nur einen geringfügigen Einfluss auf das Treibhauspotential. Dennoch sollte soweit technisch möglich die Konzentration der Säuren gesenkt werden, um auch das Treibhauspotential weiter zu reduzieren. Ein Screening weiterer Wirkungskategorien bestätigt den Bedarf, den Einsatz von Wasserstoffperoxid und den Säuren zu reduzieren. Es kann jedoch auch hier keine Säure als ökologisch vorteilhafter identifiziert werden. Weiterhin kann kein signifikanter Einfluss der Temperatur auf den Energiebedarf und damit das Treibhauspotential beobachtet werden.

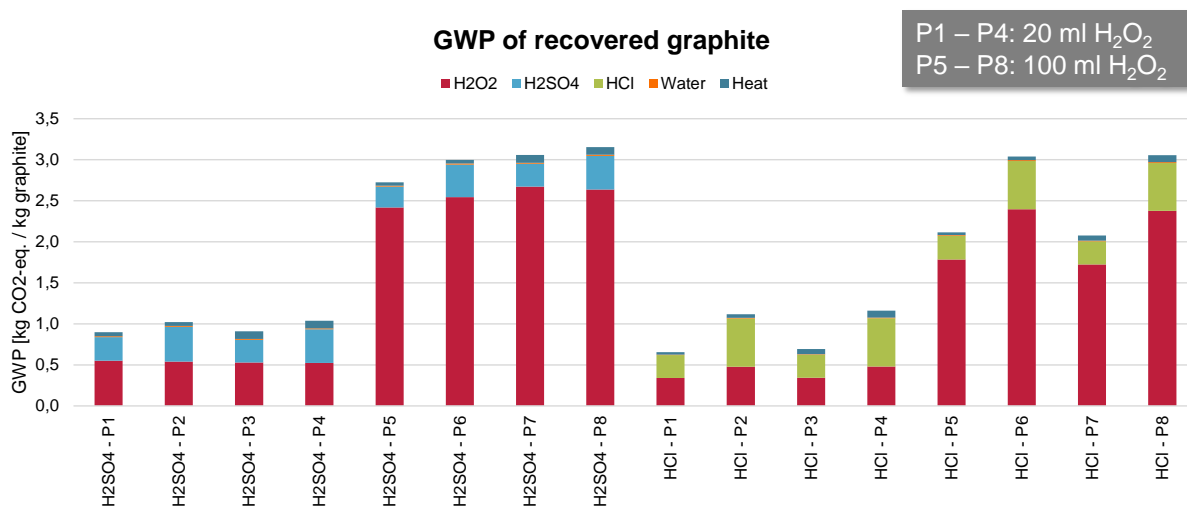


Abbildung 14: Treibhauspotential der hydrometallurgischen Aufreinigung pro resultierendem kg Graphit für verschiedene Säuren und Parameterkombinationen (für P1-P8 vgl. Abbildung 5).

Empfehlungen für ein Design for Recycling: Obwohl der Fokus der Forschungsarbeiten im Projekt ecoLiga auf der optimalen Auslegung des Recyclingverfahrens lag, konnten aus den Erkenntnissen der verschiedenen Versuche und Analysen ebenso Empfehlungen für eine recyclingfreundliche Gestaltung der Batteriezellen abgeleitet werden. Entscheidend für die sortenreine Rückgewinnung des Graphits und die gleichzeitige Minimierung der ökologischen Aufwendungen im Rückgewinnungsprozess ist die Trennbarkeit der einzelnen Bestandteile der Batteriezellen. Untersuchungen des HZDR zeigten dabei eine gute Separabilität der Graphitpartikel von der Kupferfolie bei Einsatz eines wasserlöslichen Binders. Die Metalloxide, bei welchen ein wasserunlöslicher Binder wie PVDF eingesetzt wurde, konnten erst durch weitere Behandlungsschritte von der Kathode gelöst werden. [7] Daher konnte die Löslichkeit des eingesetzten Binders als eine wichtige Größe für die Rückgewinnung der Batteriematerialien identifiziert werden.

In weiteren Versuchen des HZDR konnten zudem gezeigt werden, dass eine frühe Trennung des Graphits und der Metalloxide die Qualität der Flotationsprodukte verbessert. Weiterhin beeinflusst auch die Entfernbarekeit der Kupfer- und Aluminium-Folien die weitere Prozessführung. Je nach Vorbehandlungsverfahren können Rückstände der Aluminium-Folie in der Schwarzmasse zu Herausforderungen bei der hydrometallurgischen Behandlung führen. [7] Um eine für die jeweilige Batteriezelle passende Prozessführung anzuwenden, muss jedoch für das optimale Recycling zunächst bekannt sein, welche Materialien (z.B. Binder) in der Zelle eingesetzt wurden. Daher wird die standardisierte und transparente Bereitstellung dieser Informationen, wie sich im digitalen Batteriepass in der Europäischen Union erfolgen soll, ebenso zu einer verbesserten Recyclebarkeit der Batteriezellen beitragen.

Übertragung auf Lithium-Schwefel-Zellen: Abschließend sollte die Übertragung der ecoLiga-Prozesskette auf andere Zellsysteme am Beispiel von Lithium-Schwefel-Zellen (LiS-Zellen) untersucht werden. Dazu wurden in Vorbereitung Literatur zu weiteren Recyclingprozesse für LiS-Zellen und deren ökologische Bewertung recherchiert. Dabei konnten fünf Veröffentlichung identifiziert werden, welche eine ökologische Bewertung des Recyclings von LiS-Zellen durchführen [8–12]. Die Sachbilanz des Recyclingprozesses ist jedoch nur in zwei dieser Literaturquellen öffentlich zugänglich: Deng et al. [10] haben ihre Sachbilanz auf der Veröffentlichung von Hawkins et al. [13] aufgebaut, welche wiederum auf einem Datensatz für Lithium-Ionen-Zellen aus der Ecoinvent 2.2 Datenbank basiert und somit keine aktuelle und passende Referenz darstellt. Dagegen stellen Wickerts et al. [11] einen umfassenden Einblick in den modellierten Recyclingprozess für LiS-Zellen zur Verfügung. Nach der Deaktivierung und manuellen Trennung sowie Zerkleinerung der Zellen werden diese einer mehrstufigen hydrometallurgischen Behandlung unterzogen. Als Haupttreiber des Treibhauspotentials konnten hierbei die Input-Materialien wie beispielweise Natriumhydroxid und die folgende Behandlung von Prozessabfällen identifiziert werden. Im Gegensatz zur ecoLiga-Prozesskette liegt jedoch kein Fokus auf der Rückgewinnung von Graphit – der kohlenstoffreiche Filtrerrückstand ist als Abfallstrom modelliert. [11]

Um das ökologische Potential der ecoLiga-Prozesskette für das Recycling von LiS-Zellen zu ermitteln und diese mit den bestehenden Verfahren zu vergleichen, wurde zunächst qualitativ ein angepasstes Prozessmodell entsprechend der Versuchsdurchführung durch die Projektpartner aufgestellt (siehe Abbildung 15). Im Projekt ecoLiga werden die LiS-Zellen zunächst bei einer Temperatur von 620°C und in inerter Atmosphäre thermisch vorbehandelt, um die organischen Komponenten zu entfernen. Die Deaktivierung der Zellen erfolgt durch Zugabe von deionisiertem Wasser. Anschließend werden die Zellen aufgrund von Sicherheitsaspekten manuell aufgetrennt und zerkleinert. Danach erfolgt die Flotation und hydrometallurgische Behandlung wie in ecoLiga ursprünglich für die Lithium-Ionen-Zellen entwickelt.



Abbildung 15: Prozessroute für die Rückgewinnung von Graphit aus verwendeten Lithium-Schwefel-Zellen.

Aufgrund der geringen Massen und Schwierigkeiten bei der Versuchsdurchführung durch die Projektpartner sind die aufgenommenen Prozessdaten unzureichend für eine quantitative ökologische Bewertung der Prozesskette für Lithium-Schwefel-Batterien. Daher wurde eine qualitative Analyse und Vergleich der Prozesskette mit Literaturdaten durchgeführt, um so Optimierungspotentiale und Weiterentwicklungsmöglichkeiten zu identifizieren.

Die thermische Vorbehandlung der Zellen erfolgte in ecoLiga bei 620°C über zwei Stunden. Sollten sowohl die Temperatur als auch die Haltedauer entsprechend Angaben in der Literatur (500°C über eine Stunde [14]) reduziert werden können, würde diese Maßnahmen zur einer starken Reduzierung des Energiebedarfs und damit der Umweltwirkung beitragen. Bei erprobter Prozessführung könnten zudem Sicherheitsmaßnahmen wie die Zugabe von Stickstoff und Kühlung reduziert werden und so ebenfalls zur Reduzierung der Umweltwirkung beitragen. Die sich bei der Pyrolyse bildenden Abgase sollten weiterhin aufgefangen und einer zugeschnittenen Behandlung zugeführt werden. Dies gilt ebenso für die sich bei der Zugabe des deionisierten Wassers bildenden Schwefelgase. Beispielsweise besitzt Schwefeldioxid ein vergleichsweise hohes Versauerungspotential und wie auch Schwefelsulfide Auswirkungen im Bereich der Humantoxizität, weshalb ein Austritt der Gase zudem kritisch in Bezug auf die Arbeitssicherheit wäre.

Für die weiteren Prozessschritte kann eine Reduzierung der Umweltwirkung durch eine Steigerung der Effizienz erzielt werden. Beispielsweise kann anstelle einer manuellen Separation eine Automatisierung des Verfahrens zu einem geringen Zeit- und Energieeinsatz sowie einer höheren Ergebnisqualität führen. Für eine weitere Optimierung der ecoLiga-Prozesskette für die Rückgewinnung von Graphit aus Lithium-Schwefel-Batterien müssten weitere Versuchsreihen durchgeführt werden, sodass die aus ökologischer Perspektive optimalen Prozessparameter ermittelt werden können. Das Alleinstellungsmerkmal der ecoLiga-Prozesskette, welche es ermöglicht Graphit zurückzugewinnen, stellt jedoch einen signifikanten ökologischen Vorteil gegenüber bisherigen Recyclingverfahren der Lithium-Schwefel-Zellen dar. In ersten Auswertungen des IME der RWTH Aachen konnten dabei bis zu 96% Reinheit des rückgewonnenen Graphits erreicht werden. Hier bedarf es weiterer Forschungsarbeiten, bis das Graphit den spezifischen Qualitätsanforderungen der Batterieherstellung entspricht.

## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig wurde die in ecoLiga entwickelte Prozesskette ökologisch bewertet. Dementsprechend fiel der größte Mittelbedarf auf das Personal (16,5 PM über die Projektlaufzeit), welcher aufgrund von Tarifierhöhungen und tariflichen Sonderzahlungen leicht die geplanten Ausgaben überschritt. Die Reisemittel wurden eingesetzt, um an den Clusterveranstaltungen sowie mehreren Konferenzen teilzunehmen. Bei den Verwaltungsausgaben (wie auch bei den Reisemitteln) gab es einen Minderbedarf, da viele Veranstaltungen online durchgeführt und daher weniger Printmaterialien benötigt wurden. Zudem mussten aufgrund der Unterstützung durch die Projektpartner in der Datenaufnahme keine Messgeräte beschafft werden. Durch die Kompensation der Minder- und Mehrbedarfe zwischen den Positionen entstanden insgesamt (nahezu) die geplanten Kosten.

### 3. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

#### Wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse

Die ökologische Bewertung der ecoLiga-Prozesskette zur Rückgewinnung von Graphit unterstützte die Prozessentwicklung durch die Identifikation von ökologisch optimalen Prozessparametern und Abgabe von Handlungsempfehlungen, welche die Grundlage für die Skalierung der Prozesskette bilden. Zudem wurde durch die gleichzeitige Analyse der Primärproduktion von Graphit die Bedeutung der Rückgewinnung von Graphit insbesondere am Standort Deutschland verstärkt. Die Ergebnisse der Projektarbeiten wurden im Rahmen von Clusterveranstaltungen, Projekttreffen und Konferenzen Vertreter\*innen aus der Industrie zugänglich gemacht und gemeinsam diskutiert. Aus industrieller Perspektive ist aufgrund der im August 2023 in Kraft getretenen EU-Batterieverordnung und den darin festgelegten Quoten zur Rückgewinnung von Materialien und zum Rezyklateinsatz in Batterien das Interesse an innovativen und nachhaltigeren Recyclingtechnologien noch einmal gestiegen. Zudem wurden die Prozessdaten aus ecoLiga zur weiteren Verwertung an das Begleitprojekt des greenBatt-Clusters übergeben.

#### Wissenschaftlich und technische Verwertung der Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes sind seitens der TU Braunschweig zwei Veröffentlichungen entstanden: Zunächst wurden für das Benchmarking mit der Primärproduktion eine Methodik zur kombinierten Datenqualitätsbewertung und Unsicherheitsanalyse entwickelt (Engels et al. 2022). Anschließend wurden die Herausforderungen der prospektiven ökologischen Bewertung von Recyclingprozessen anhand der ecoLiga-Prozesskette analysiert (Haupt et al. 2022). Beide Forschungsarbeiten wurden auf der renommierten CIRP Life Cycle Engineering-Konferenz vorgestellt und dort mit dem Fachpublikum diskutiert. Die Projektergebnisse können zudem über die beiden Veröffentlichungen hinaus zur Erweiterung bestehender Lehrveranstaltungen genutzt werden und in zukünftigen studentischen Arbeiten sowie Promotionsvorhaben aufgegriffen und erweitert werden.

### 4. Während der Laufzeit bekannt gewordene, relevante Ergebnisse Dritter

Im Rahmen der Literaturrecherche zu vergleichbaren Prozessen wurde eine im Oktober 2021 veröffentlichte LCA-Studie zum Recycling von Graphit mit dem Titel „Environmental Impacts of Graphite Recycling from Spent Lithium-Ion Batteries Based on Life Cycle Assessment“ von Rey et al. [1] identifiziert. In dieser Studie wird das Treibhauspotential verschiedener Recyclingpfade von Graphit ausgewertet. Es wird die Behandlung des bereits von anderen Batteriekomponenten getrennten Graphits mittels Pyrolyse, Flotation, Auslaugung und weiterer Verfahrenskombinationen untersucht. Dabei werden Sekundärdaten aus Laborstudien sowie stöchiometrische Berechnung für die Erstellung der Sachbilanz verwendet. Die Studie weicht somit vom Untersuchungsrahmen sowie in der Art der Datengrundlage von der abschließenden Nachhaltigkeitsbewertung im Projekt ecoLiga ab, konnte jedoch als Referenz herangezogen werden.

Bei der Literaturrecherche zu Recyclingprozessen für Lithium-Schwefel-Zellen wurde eine im Juni 2023 veröffentlichte, prospektive LCA-Studie mit dem Titel „Prospective Life Cycle Assessment of Lithium-Sulfur Batteries for Stationary Energy Storage“ von Wickerts et al. [11] identifiziert. In der Studie werden die Umweltwirkungen von Lithium-Schwefel-Batterien als stationäre Energiespeicher über deren gesamten Lebenszyklus evaluiert. Dabei werden verschiedene Szenarien ausgewertet, wie zukünftige Entwicklungen (u.a. das Recycling der Zellen)

zur Reduktion derer Umweltwirkungen beitragen kann. Der untersuchte hydrometallurgische Recyclingprozess zeigt zwar das Potential, den Abbau von Mineralien zu reduzieren, jedoch nicht zwingend die Umweltwirkungen in anderen Kategorien. Die Auswertung und die detailliert bereitgestellte Sachbilanz der Veröffentlichung bieten eine geeignete Referenz für die Übertragung der ecoLiga-Prozesskette auf Lithium-Schwefel-Zellen und Weiterentwicklung. Die Prozessschritte und berücksichtigten Produkte (z.B. kohlenstoffreiche Rückstände als Abfallprodukte) unterscheiden sich jedoch wesentlich zwischen der Veröffentlichung und dem Projekt ecoLiga, wodurch sich eine ökologische Vorteilhaftigkeit der ecoLiga-Prozesskette ergibt.

## 5. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Die erfolgten Veröffentlichungen wurden zusätzlich im Kadi4Mat der Cluster greenBatt und BattNutzung in der Collection „ecoLiga“ (P-ID 190) geteilt.

### Fachartikel

Lfd. Nr.	Autoren	Titel	Journal, Volume, Issue, Page	DOI / Persistent ID	Datum
1	Philipp Engels, Nelli Kononova, Usama Khalid, Felipe Cerdas, Christoph Herrmann	Methodology for a combined uncertainty analysis and data quality rating of existing graphite datasets in context of battery LCAs	Procedia CIRP, Volume 105, 2022, Pages 577-582	<a href="https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.096">https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.096</a> Persistent ID: 2596	2022
2	Johanna Haupt, Nelli Kononova, Felipe Cerdas, Sabrina Zellmer, Christoph Herrmann	Challenges of prospective life cycle assessment of emerging recycling processes: case study of battery materials recover	Procedia CIRP, Volume 116, 2023, Pages 23–28	<a href="https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.005">https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.005</a> Persistent ID: 2595	2023

### Konferenzbeitrag

Lfd. Nr.	Autoren	Titel	Typ (Poster, Präsentation)	Konferenz/Tagung	Persistent ID	Datum
1	Philipp Engels	Bedeutung des Graphitrecyclings aus ökobilanzieller Sicht	Präsentation	Freiberger Tagung Aufbereitung und Recycling	2597	12.11.2021
2	Nelli Kononova, Felipe Cerdas	Methodology for a combined uncertainty analysis and data quality rating of existing graphite datasets in context of battery LCAs	Präsentation	CIRP Life Cycle Engineering 2022	2596	04. – 06.04.2022
3	Johanna Haupt	Ökologisches Potential von Graphit-Recycling	Präsentation	REWIMET e.V. Workshop Goslar 2022	2598	05.12.2022
4	Johanna Haupt	Challenges of prospective life cycle assessment of emerging recycling processes: case study of battery materials recover	Präsentation	CIRP Life Cycle Engineering 2023	2595	15.05.2023

## Quellen

- [1] Rey I, Vallejo C, Santiago G, Iturrondobeitia M, Lizundia E. Environmental Impacts of Graphite Recycling from Spent Lithium-Ion Batteries Based on Life Cycle Assessment 2021; 9: 14488–501.
- [2] Engels P, Kononova N, Khalid U, Cerdas F, Herrmann C. Methodology for a combined uncertainty analysis and data quality rating of existing graphite datasets in context of battery LCAs 2022.
- [3] Engels P, Cerdas F, Dettmer T, Frey C, Hentschel J, Herrmann C, et al. Life cycle assessment of natural graphite production for lithium-ion battery anodes based on industrial primary data 2022; 336: 130474.
- [4] Surovtseva D, Crossin E, Pell R, Stamford L. Toward a life cycle inventory for graphite production 2022; 26: 964–79.
- [5] Haupt J, Kononova N, Cerdas F, Zellmer S, Herrmann C. Challenges of prospective life cycle assessment of emerging recycling processes: case study of battery materials recovery 2023; 116: 23–28.
- [6] Vietor T. Life Cycle Design & Engineering of Lightweight Multi-Material Automotive Body Parts. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2023.
- [7] Vanderbruggen A, Hayagan N, Bachmann K, Ferreira A, Werner D, Horn D, et al. Lithium-Ion Battery Recycling—Influence of Recycling Processes on Component Liberation and Flotation Separation Efficiency 2022.
- [8] Benveniste G, Sánchez A, Rallo H, Corchero C, Amante B. Comparative life cycle assessment of Li-Sulphur and Li-ion batteries for electric vehicles 2022; 15.
- [9] Cerdas F, Titscher P, Bogner N, Schmuck R, Winter M, Kwade A, et al. Exploring the Effect of Increased Energy Density on the Environmental Impacts of Traction Batteries: A Comparison of Energy Optimized Lithium-Ion and Lithium-Sulfur Batteries for Mobility Applications 2018; 11: 150.
- [10] Deng Y, Li J, Li T, Gao X, Yuan C. Life cycle assessment of lithium sulfur battery for electric vehicles 2017; 343: 284–95.
- [11] Wickerts S, Arvidsson R, Nordelöf A, Svanström M, Johansson P. Prospective Life Cycle Assessment of Lithium-Sulfur Batteries for Stationary Energy Storage 2023; 11: 9553–63.
- [12] Wolff D, Canals Casals L, Benveniste G, Corchero C, Trilla L. The Effects of Lithium Sulfur Battery Ageing on Second-Life Possibilities and Environmental Life Cycle Assessment Studies 2019; 12: 2440.
- [13] Hawkins TR, Singh B, Majeau-Bettez G, Strømman AH. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles 2013; 17: 53–64.
- [14] Schwich L, Sabarny P, Friedrich B. Recycling potential of lithium–sulfur batteries— a first concept using thermal and hydrometallurgical methods 2020; 10: 1–19.