

Ökobilanz für das MERCATOR Verfahren zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterie

Darmstadt,
22. Juni 2023

Vorhaben FKZ 16EM4007-5: Material Effizientes
Recycling für die Circular Economy von
Automobilspeichern durch Technologie ohne Reststoffe
– MERCATOR, gefördert mit Mittel des BMWK im
Rahmen des Förderprogramms
„Erneuerbar Mobil“ - Abschlussbericht

Autoren

Dr. Matthias Buchert
Jürgen Sutter
Tobias Wagner
Öko-Institut e.V.

Kontakt

info@oeko.de
www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Zusammenfassung	7
Executive Summary	8
1 Hintergrund	9
2 Ziele und Anwendungen der Studie	9
3 Festlegung des Untersuchungsrahmens	10
3.1 Beschreibung des Produktsystems und Systemgrenzen	10
3.2 Untersuchte Batterien	13
3.3 Funktionelle Einheit und Referenzfluss	14
3.4 Abschneidekriterien	14
3.5 Produkte und Referenzprodukte	14
3.6 Allokation	16
3.7 Wirkungskategorien	16
3.8 Methoden der Auswertung	18
3.9 Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts	18
3.10 Konformität und kritische Prüfung	19
4 Sachbilanz	20
4.1 Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität	20
4.1.1 Datenerhebung: Vordergrundsystem	20
4.1.2 Datenerhebung: Hintergrundsystem	23
4.1.3 Technologische, geographische und zeitliche Repräsentativität	23
4.1.4 Datenqualität	24
5 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	26
5.1 Globale Erwärmung	26
5.2 Kumulierter Energieaufwand	28
5.3 Photochemische Ozonbildung	28
5.4 Versauerung, Eutrophierung und Abiotischer Ressourcenverbrauch	29
6 Auswertung der Ökobilanz	32
6.1 Identifizierung der signifikanten Parameter	32
6.2 Beurteilung	32

6.2.1	Vollständigkeitsprüfung	32
6.2.2	Sensitivitätsprüfung	32
6.2.2.1	Abwärmenutzung Pyrolyse	32
6.2.2.2	Aluminiumgehäuse anstatt Stahlgehäuse	33
6.2.2.3	NMC 811 anstatt NMC 111	34
6.2.2.4	Reduzierte Rückgewinnungsquoten	35
6.2.2.5	Nutzung von Abfallströmen	36
6.2.3	Konsistenzprüfung	38
6.3	Schlussfolgerungen, Einschränkungen, Empfehlungen und Ausblick	38
7	Literaturverzeichnis	41
8	Anhang 1: Verwendete LCI-Datensätze	44
9	Anhang 2: Externes kritisches Gutachten	46

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Untersuchtes Produktsystem	12
Abbildung 5-1: LCA-Ergebnisse Globale Erwärmung	26
Abbildung 5-2: LCA-Ergebnisse Kumulierter Energieaufwand, gesamt	28
Abbildung 5-3: LCA-Ergebnisse Photochemische Ozonbildung	29
Abbildung 5-4: LCA-Ergebnisse Versauerung	30
Abbildung 5-5: LCA-Ergebnisse Eutrophierung	30
Abbildung 5-6: LCA-Ergebnisse Abiotischer Ressourcenverbrauch	31
Abbildung 6-1: Sensitivitätsanalyse: Abwärmenutzung Pyrolyse	33
Abbildung 6-2: Sensitivitätsanalyse: Aluminium- statt Stahlgehäusen	34
Abbildung 6-3: Sensitivitätsanalyse: NMC 811 statt NMC 111	35
Abbildung 6-4: Sensitivitätsanalyse: Reduzierte Rückgewinnungsquoten	36
Abbildung 6-5: Abfallströme mit potenziell zu optimierender stofflicher Nutzung	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Zusammensetzung der angesetzten generischen NMC 111 Batterie	14
Tabelle 3-2: Übersicht über die Produkte und Referenzprodukte der Ökobilanz	15
Tabelle 3-3: Untersuchte Wirkungskategorien	17
Tabelle 4-1: Sachbilanz: Ausgewählte Stoff- und Energieflüsse, jeweils pro Funktioneller Einheit (Recycling von 1000 kg LIB)	20
Tabelle 4-2: Rechnerische Gesamtrückgewinnungsquoten des Mercatorverfahrens	22
Tabelle 4-3: LCIA-Ergebnisse GWP in kg CO ₂ -Äq. pro kg Cobalt-Produkt aus unterschiedlichen Datenquellen	25
Tabelle 8-1: Verwendete LCI-Datensätze	44

Zusammenfassung

Die vorliegende Ökobilanzstudie ist Teil des vom BMWK geförderten Verbundvorhabens „Mercator Material Effizientes Recycling für die Circular Economy von Automobilspeichern durch Technologie Ohne Reststoffe“, in dessen Rahmen ein Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien für Traktionsanwendungen untersucht wurde. Das Gesamtvorhaben wurde in den Jahren 2019 bis 2022 unter der Konsortialführung der Accurec Recycling GmbH mit den Verbundpartnern RWTH Aachen (IME), CTG GmbH, UVR-FIA GmbH und Öko-Institut durchgeführt. Das Öko-Institut war im Rahmen des Projektverbundes für die Konzeption und Realisierung der Ökobilanzarbeiten verantwortlich.

Die Ökobilanzergebnisse zeigen tendenziell eine ökologische Vorteilhaftigkeit des Mercator-Recyclingverfahrens im Vergleich zu einer marktüblichen Bereitstellung der entsprechenden Produkte. Hinsichtlich der Wirkungskategorie Globale Erwärmung werden pro Tonne zu recycelnden Lithium-Ionen-Batterien in der untersuchten Standardvariante bei lastenfreier Anrechnung des Batterieschrottes zusätzliche Emissionen in Höhe von knapp 2,5 t CO₂-Äq. verursacht – hauptsächlich aufgrund des Bedarfs an Chemikalien für die Hydrometallurgie sowie aufgrund des Strombedarfs und der Prozessemissionen der Pyrolyse – während sich durch die Substitution anderweitig erzeugter Produkte Emissionen in Höhe von gut 3 t CO₂-Äq. einsparen lassen, sodass sich im Ergebnis ca. 0,75 t CO₂-Äq. einsparen lassen. Für andere Wirkungskategorien, darunter Versauerung (AP) und Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP), ist das Gesamtergebnis deutlicher vorteilhaft für das Mercator-Recyclingverfahren.

Größere Vorteile für das Mercator-Recyclingverfahren ergeben sich, wenn die bei der Pyrolyse entstehende Abwärme konsequent genutzt wird anstatt ungenutzt zu entweichen, falls das Batteriegehäuse aus Aluminium anstatt aus Stahl besteht, was im Automobilbereich eher den Standard darstellt oder falls cobalt- und manganärmere und dafür nickelreichere Batterien, beispielsweise NMC 622, recycelt werden. Ein deutlich schlechteres Ergebnis ergibt sich, sofern geringere Rückgewinnungsquoten erzielt werden oder falls der Batterieschrott nicht lastenfrei in das Recyclingsystem eingehen. Insgesamt sprechen die Ökobilanzergebnisse nicht gegen eine Weiterverfolgung bzw. Implementierung der hier untersuchten Prozessroute.

Für die Weiterentwicklung des Mercator-Recyclingverfahrens wird empfohlen, die Nutzung von zwei Abfallstoffströmen – dem Calciumfluorid-Calciumcarbonat-Gemisch aus der Pyrolyse sowie dem Graphit-angereicherten Stofffraktion aus der Hydrometallurgie – zu prüfen. Für das Calciumfluorid-Calciumcarbonat-Gemisch sollte eine Verwendung als Rohstoff für die Düngemittelherstellung oder als Ersatz von Flussspat als Rohstoff für die Gewinnung von Fluorprodukten geprüft werden. Hinsichtlich der Graphit-angereicherten Stofffraktion sollte eine Kreislaufführung innerhalb des Mercator-Recyclingverfahrens geprüft werden, beispielsweise als Input der Flotation.

Aus Ökobilanzperspektive werden die Bemühungen der Recyclingunternehmen, hohe Rückgewinnungsquoten, insbesondere in der Hydrometallurgie, sowie geringe Energiebedarfe, insbesondere bei der Pyrolyse durch eine effiziente Nutzung der Abwärme, zu erzielen, ausdrücklich unterstützt und bekräftigt, da sich beide Parameter deutlich auf das Ökobilanzergebnis auswirken.

Die hier vorliegende Ökobilanzstudie basiert wesentlich auf Daten, die im Labormaßstab erfasst wurden, was bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss. Es wird empfohlen, eine etwaige Hochskalierung weiterhin durch eine Umweltanalyse begleiten zu lassen, um frühzeitig darauf aufmerksam zu werden, falls wichtige Parameter deutlich von den hier zugrundeliegenden Parametern abweichen.

Executive Summary

This life cycle assessment study is part of the joint project "Mercator Material Efficient Recycling for the Circular Economy of Automotive Storage by Technology Without Residues" funded by the BMWK, which investigated a recycling process for lithium-ion batteries for traction applications. The overall project was carried out from 2019 to 2022 under the consortium leadership of Accurec Recycling GmbH with the joint partners RWTH Aachen University (IME), CTG GmbH, UVR-FIA GmbH and Oeko-Institut. The Oeko-Institut was responsible for the planning and calculation of the LCA work within the project network.

The LCA results tend to show an environmental advantage of the Mercator recycling process compared to a conventional provision of the corresponding products. With regard to the impact category global warming, per tonne of lithium-ion batteries to be recycled in the standard variant investigated additional emissions of just under 2.5 t CO₂-eq. are caused, if the battery scrap is accounted for without any burdens – mainly due to the need for chemicals for hydrometallurgy and due to the electricity demand and the process emissions of pyrolysis – while emission savings amounting to around 3 t CO₂-eq. are generated by the substitution of products manufactured otherwise, so that in total approx. 0.75 t CO₂ eq. can be saved. For other impact categories, including acidification (AP) and abiotic depletion potential (ADP), the overall result is more clearly advantageous for the Mercator recycling process.

There are greater advantages for the Mercator recycling process if the waste heat generated during pyrolysis is utilised instead of escaping unused, if the battery casing is made of aluminium instead of steel, which tends to be the standard in the automotive sector, or if batteries with a lower cobalt and manganese content but a higher nickel content, such as NMC 622, are recycled. The result is considerably worse if lower recovery rates are achieved or if the battery scrap does not enter the recycling system without environmental burdens. Overall, the LCA results do not argue against pursuing or implementing the process route investigated here.

For the further development of the Mercator recycling process, it is recommended to examine the use of two waste material streams - the calcium fluoride-calcium carbonate mixture from pyrolysis and the graphite-enriched material fraction from hydrometallurgy. For the calcium fluoride-calcium carbonate mixture, a use as raw material for fertiliser production or as a substitute for fluorspar as raw material for the extraction of fluorine products should be examined. Regarding the graphite-enriched material fraction, a recycling within the Mercator recycling process should be examined, for example as an input of the flotation.

From an LCA perspective, the efforts of the recycling companies to achieve high recovery rates, especially in hydrometallurgy, and low energy requirements, especially in pyrolysis through efficient use of waste heat, are supported and confirmed, as both parameters have a significant influence on the LCA result.

The LCA study presented here is essentially based on data collected on a laboratory scale, which must be considered when interpreting the results. It is recommended that any upscaling continue to be accompanied by an environmental analysis to be alerted at an early stage if important parameters deviate significantly from the parameters on which this is based.

1 Hintergrund

Die Elektromobilität und die notwendigen Batterien haben eine Schlüsselrolle im Rahmen der Transformation zur Treibhausgasneutralität [BMWi 2018; BMWK 2022; Tucki et al. 2020]. Für die kommenden Jahre ist der Markthochlauf reiner Elektrofahrzeuge vorgesehen. Vor diesem Hintergrund hat die Frage, wie mit dem Batterieschrott verfahren wird, eine große umweltpolitische und strategische Relevanz.

Die vorliegende Ökobilanzstudie ist Teil des vom BMWK geförderten Verbundvorhabens „Mercator Material Effizientes Recycling für die Circular Economy von Automobilspeichern durch Technologie Ohne Reststoffe“, in dessen Rahmen ein Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien für Traktionsanwendungen untersucht wurde. Das Gesamtvorhaben wurde in den Jahren 2019 bis 2022 unter der Konsortialführung der Accurec Recycling GmbH mit den Verbundpartnern RWTH Aachen (IME), CTG GmbH, UVR-FIA GmbH und Öko-Institut durchgeführt. Das Öko-Institut war im Rahmen des Projektverbundes für die Konzeption und Realisierung der Ökobilanzarbeiten verantwortlich, die begleitend zu den Forschungsarbeiten der Partner*innen durchgeführt wurden und im vorliegenden Bericht dokumentiert sind.

2 Ziele und Anwendungen der Studie

Diese Ökobilanz nach der EN DIN ISO Norm 14040/14044 repräsentiert ein Element in der Bewertung der im Rahmen des Mercator-Projektes entwickelten und untersuchten Prozessroute zum Recycling von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien. Den beteiligten Partner*innen des Verbundvorhabens Mercator sollen damit detaillierte Informationen bzgl. der ökologischen Vorteile und ggf. Schwachstellen der einzelnen Prozessschritte zur Verfügung gestellt werden. Weiterhin dienen die Arbeiten zur Ökobilanz dazu, frühzeitig mögliche Optimierungspotenziale für die Verbesserung der Umweltperformance des Recyclingprozesses bzw. einzelner Prozessstufen aufzuzeigen. Damit soll die Vorraussetzung für spätere Optimierungen des Recyclingprozesses in der industriellen Praxis sichergestellt werden.

Es ist ausdrücklich nicht Ziel der Studie die im Rahmen des Mercator-Projekts entwickelte Recyclingroute für Lithium-Ionen-Traktionsbatterien mit anderen Recyclingrouten zu vergleichen. Die vorliegende Studie stellt in diesem Sinne keine vergleichende Ökobilanz dar. Entsprechend sind die Ergebnisse der Studie nur auf das Recyclingverfahren, welches im Rahmen von Mercator entwickelt wurde, anzuwenden. Die Ergebnisse dieser Studie sind nicht für die Verwendung in zur Veröffentlichung vorgesehenen vergleichenden Aussagen bestimmt. Ein Vergleich wird stattdessen angestellt zwischen den Umweltlasten, die aus dem Recycling bzw. der marktüblichen Bereitstellung der potenziell zu ersetzenden Materialien entstehen.

Die wichtigste Zielgruppe für die Ökobilanzstudie sind die Verbundpartner des Mercator-Projektes selbst. Für die Mercator-Verbundpartner sind die Teilergebnisse für die einzelnen Module des Recyclingverfahrens ebenso interessant wie die Gesamtergebnisse. Weiterhin ist die Identifizierung möglicher ökologischer Optimierungspotenziale bzgl. des Recyclingprozesses von elementarer Bedeutung. Eine weitere Zielgruppe der Studie ist neben dem fördernden BMWK die interessierte Fachöffentlichkeit.

3 Festlegung des Untersuchungsrahmens

3.1 Beschreibung des Produktsystems und Systemgrenzen

Bei der hier untersuchten Prozesskette handelt es sich um ein Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Traktionsbatterien aus dem Automobilbereich. Der zugrunde gelegte Batterietyp und dessen stoffliche Zusammensetzung werden in Abschnitt 3.2 erläutert. Die Hauptfunktion des Recyclingverfahrens besteht darin, die in den Batterien enthaltenen Wertstoffe zurückzugewinnen. Dazu zählen einerseits Massenmetalle wie Stahl, Aluminium und Kupfer, die sich zu einem Großteil durch das Recycling des Batteriegehäuses zurückgewinnen lassen, und andererseits Nickel, Cobalt, Mangan, Lithium und Graphit, die in den Batteriezellen enthalten sind. Das Ziel besteht darin, die Wertstoffe erneut in hochwertigen Nutzungen wie beispielsweise in Lithium-Ionen-Batterien einzusetzen. Dadurch wird eine Substitution der marktüblichen Materialbereitstellung ermöglicht. Ein besonderes Merkmal des hier untersuchten Recyclingverfahrens besteht darin, dass zusätzlich Graphit zurückgewonnen wird.

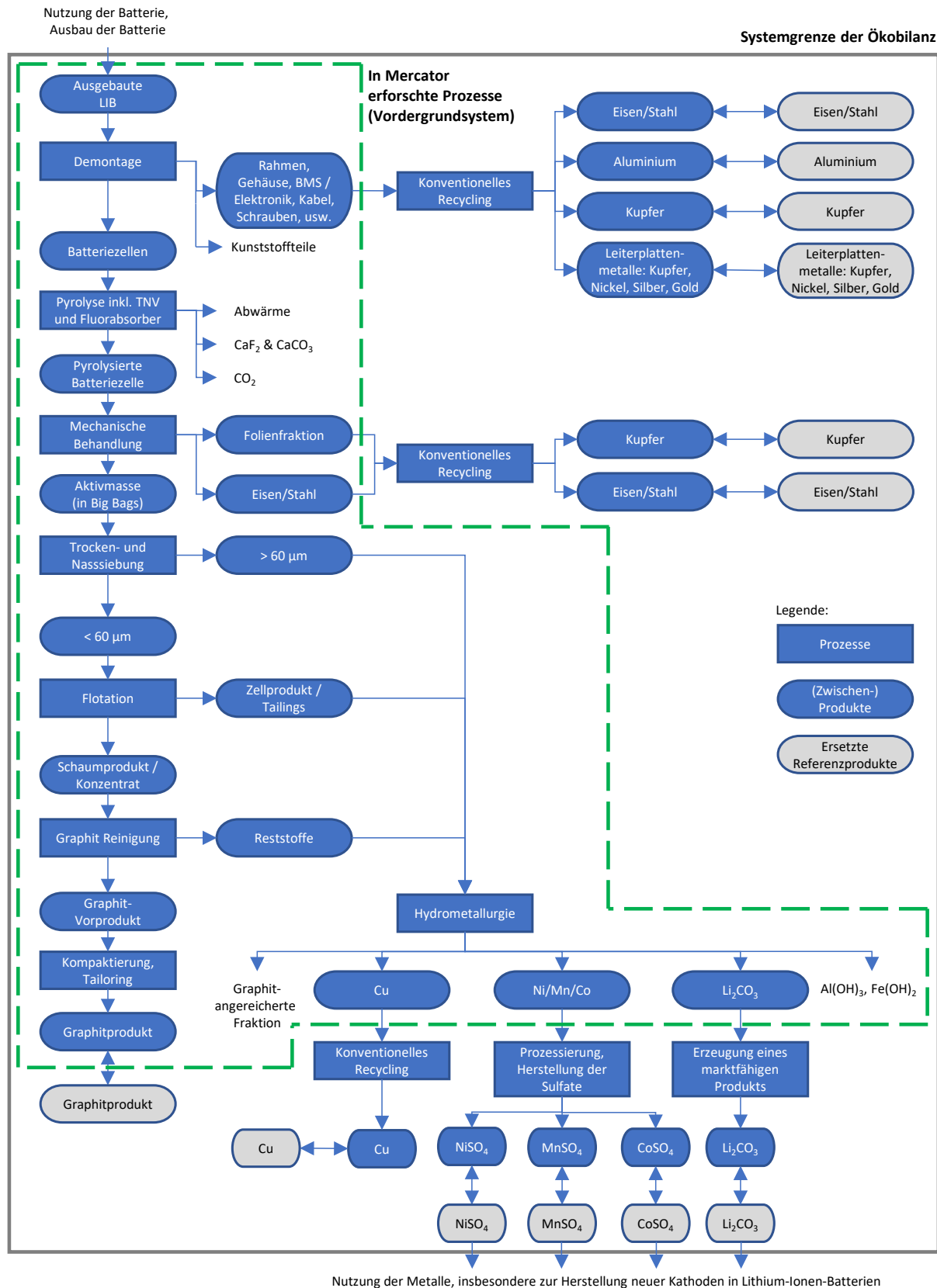
Eine detaillierte Darstellung der Prozesskette und der zugrundeliegenden Systemgrenzen liegt in Abbildung 3-1 vor: Ausgangspunkt sind die aus Fahrzeugen bereits ausgebauten kompletten Lithium-Ionen-Batterien. Diese werden anschließend mithilfe eines Gefahrguttransports zur Recyclinganlage gebracht. Dort findet zunächst die Demontage statt, in deren Zuge die Batterien mithilfe von Handwerkzeugen (Akkuschraubern usw.) in Einzelkomponenten zerlegt werden. Hierbei werden zunächst die sogenannten Peripheriekomponenten (Batteriegehäuse, Kabel, Elektronikkomponenten usw.) separiert. Die Batteriezellen werden vor Ort weiter prozessiert, wohingegen die anderen Wertkomponenten (Batterie- und Modulgehäuse, Rahmen, Kabel, Elektronik) in jeweilige bestehende Recyclinganlagen, die auf Stahl, Aluminium, Kupfer bzw. Elektronikschrott spezialisiert sind, gebracht werden. Der Prozessschritt „Demontage“ ist lediglich mit geringen Energieaufwendungen (Gabelstapler, Handwerkzeuge, usw.) verbunden. Das Recycling von Stahl, Aluminium, Kupfer bzw. Elektronikschrott sowie die dadurch ersetzten Produktionsprozesse sind Bestandteil des untersuchten Produktsystems.

Die Batteriezellen werden anschließend in einen Pyrolyseofen gegeben. Unter anderem entstehen dabei relevante Mengen an Kohlendioxid-Prozessemissionen. Die Abgasreinigung fokussiert zur Minimierung von Fluorwasserstoffemissionen durch Einsatz eines alkalischen Absorbers auf Kalkbasis. Im Rahmen der Mechanischen Behandlung werden die pyrolysierten Batteriezellen zerkleinert. Als Outputs dieses Prozessschritts liegen neben der Aktivmasse auch Stahl und eine überwiegend kupfer- und aluminiumhaltige Folienfraktion vor, die analog zu den im Rahmen der Demontage erhaltenen Stofffraktionen in ein konventionelles Recycling gebracht werden und auch entsprechend anderweitig produzierte Materialien ersetzen. Die im Batterieschrott vorhandene Restladung wird nicht ins Stromnetz eingespeist, sondern thermisch im Rahmen der Pyrolyse genutzt.

Die Aktivmasse wird im Weiteren einer Trocken- und anschließend einer Nasssiebung unterzogen, wobei die feinere Stofffraktion anschließend mithilfe einer Schaumflotation weiter prozessiert wird. Das Ziel dabei ist, das Graphit in einer Stofffraktion (dem Schaumprodukt bzw. Konzentrat der Flotation) anzureichern. Diese Stofffraktion wird anschließend hydrometallurgisch unter Einsatz von Säuren und Wasserstoffperoxid weiter prozessiert, sodass ein Graphit-Vorprodukt gewonnen werden kann. Diesen Prozessarm abschließend wird das Graphit-Vorprodukt unter anderem unter Beimischung von Polypropylen zu einem marktfähigen Graphitprodukt aufbereitet.

Sowohl aus der Siebung als auch aus der Flotation sowie der Graphit Reinigung werden Stofffraktionen erhalten, die gemeinsam hydrometallurgisch prozessiert werden. Unter Einsatz von Säuren, Wasserstoffperoxid, Natriumhydroxid und weiteren Chemikalien werden einzelne Stofffraktionen separat gewonnen. Dazu zählen Kupfer, das Mischsalz mit Nickel-, Mangan- und Cobalhydroxid sowie Lithiumcarbonat, die sich jeweils zu marktfähigen Produkten (bis zur Batteriequalität) weiter aufbereiten lassen und entsprechend anderweitig produzierte Materialien ersetzen können. Die anderen im Rahmen der Hydrometallurgie separierten Stofffraktionen sind als Abfälle einzustufen und zu bewerten, darunter auch die Graphit-reiche Stofffraktion aus der Hydrometallurgie. Eine Übersicht über die erzeugten Produkte liegt in Abschnitt 3.5 vor. Weder die Herstellungs- und Nutzungsphase der zu recycelnden Batterien noch die mögliche Herstellung neuer Kathoden für Batterien sind Gegenstand dieser Ökobilanz.

Abbildung 3-1: Untersuchtes Produktsystem



Nur für stofflich genutzte Produkten werden die ersetzten Referenzprodukte dargestellt.
TNV: Thermische Nachverbrennung; BMS: Batteriemanagementsystem

3.2 Untersuchte Batterien

Der vorliegenden Ökobilanz liegt eine generische NMC 111 Batterie¹ aus dem Automobilbereich zugrunde, deren stoffliche Zusammensetzung in Tabelle 3-1 dokumentiert ist. Die Versuche von der Accurec Recycling GmbH, dem Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling (IME) der RWTH Aachen bzw. der UVR-FIA Verfahrensentwicklung-Umweltschutztechnik-Recycling-GmbH wurden mit unterschiedlichen Batterien durchgeführt, die sich hinsichtlich des Einsatzgebiets und der Zellchemie unterschieden haben. Die Entscheidung, die Ökobilanz anhand einer generischen NMC 111 Batterie durchzuführen, wurde aus den folgenden Gründen getroffen:

- Im Automobilbereich stellen Lithium-Ionen-Batterien des Typs NMC sowohl rückblickend als auch gegenwärtig und gemäß aktuellen Prognosen und Expert*inneneinschätzungen auch zukünftig einen der am häufigsten verwendeten Batterietypen dar.
- Bei NMC-Batterien geht der Trend zu höheren Nickelanteilen, beispielsweise bei NMC 622 oder NMC 811 Batterien. Diese Batterien werden allerdings frühestens 2030 in relevanten Mengen zu recyceln sein. Die Veränderung der Ökobilanzergebnisse bei Zugrundelegung einer NMC 811 Batterie wurde außerdem als Sensitivitätsrechnung untersucht (siehe Abschnitt 6.2.2.3).

Die unten dokumentierte Batteriezusammensetzung repräsentiert keine bestimmte Batterie eines speziellen Herstellers, sondern stellt eine generische durchschnittliche Batteriezusammensetzung einer NMC 111-Batterie für Traktionsanwendungen dar.

An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass das Mercator-Recyclingverfahren nicht ausschließlich auf spezielle Lithium-Ionen-Batterien ausgelegt ist, sondern – in gewissen Grenzen – Mischungen von diversen Lithium-Ionen-Zelltypen toleriert.

¹ Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid in verschiedenen Zusammensetzungen des Kathodenmaterials ($\text{Li-Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$, mit $x+y+z=1$, z. B. NMC 111, NMC 622 oder NMC 811)

Tabelle 3-1: Zusammensetzung der angesetzten generischen NMC 111 Batterie

Komponente	kg/t
Batteriezellen	558
Aktivmasse, Cathode Active Material (CAM)	167
Lithium	12
Nickel	32
Mangan	30
Cobalt	32
Sauerstoff	61
Elektrolyt	65
Separator	26
Anoden-C	116
Kath-Alu-Folie	34
Anode-Cu	49
Zellgehäuse (Stahl)	102
Peripheriekomponenten	442
Stahl	310
Elektronik	75
Aluminium	26
Kabel	16
Kunststoff	15

Quelle: im Mercator Projektkonsortium abgestimmte Zusammensetzung

3.3 Funktionelle Einheit und Referenzfluss

Die funktionelle Einheit und der Referenzfluss für die Ökobilanz des Mercator-Verfahrens sind das Recycling von 1000 kg Lithium-Ionen-Batterien aus dem Automobilbereich des Typs NMC 111.

3.4 Abschneidekriterien

Es wurden keine Abschneidekriterien im Vordergrundsystem angewandt. In der Datenbank ecoinvent 3.8 sind die Abschneidekriterien in [Wernet et al. 2016] dargestellt.

3.5 Produkte und Referenzprodukte

Insgesamt werden durch das untersuchte Produktsystem die in Tabelle 3-2 aufgelisteten 11 unterschiedlichen stofflich nutzbaren Produkte erzeugt, die jeweils zu einem produktspezifischen Minderbedarf an anderweitig erzeugten Referenzprodukten führen. Die Tabelle führt außerdem Informationen dazu auf, in welcher Gesamtmasse und an welcher Stelle im Gesamtprozess die Produkte erzeugt werden, welche Referenzprodukte angesetzt werden (siehe auch die LCI-

Datensätze in Tabelle 8-1 im Anhang) und welche Schritte ggf. ergänzend modelliert werden, um das Ersetzen eines üblicherweise marktfähigen Referenzprodukts zu rechtfertigen.

Tabelle 3-2: Übersicht über die Produkte und Referenzprodukte der Ökobilanz

Produkt	kg / FE	Erläuterung
Eisen / Stahl	404	Eine Eisen- bzw. Stahlfraction wird jeweils in den Prozessschritten Demontage bzw. Mechanischen Behandlung abgetrennt. Durch konventionelles Recycling wird ein marktfähiges Stahlprodukt erzeugt.
Kupfer	91	Eine Kupferfraction wird jeweils in den Prozessschritten Demontage, Mechanische Behandlung bzw. Hydrometallurgie abgetrennt. Kupfer wird auch im Zuge des Recyclings der Elektronikfraction gewonnen. Durch konventionelles Recycling wird ein marktfähiges Kupferprodukt erzeugt.
Aluminium	25	Eine Aluminiumfraction wird im Prozessschritt Demontage abgetrennt. Durch konventionelles Recycling wird ein marktfähiges Aluminiumprodukt erzeugt.
Nickel	< 1	Nickelmetall wird im Zuge des Recyclings des Elektronikschrotts gewonnen. Als Referenzprodukt wird entsprechend Nickelmetall (Class I) angesetzt.
Silber	< 0,5	Silber wird im Zuge des Recyclings des Elektronikschrotts gewonnen.
Gold	< 0,01	Gold wird im Zuge des Recyclings des Elektronikschrotts gewonnen.
Nickelsulfat	80	Bei der Hydrometallurgie wird ein Mischsalz abgetrennt, das die Zielmetalle Nickel, Mangan und Cobalt enthält. Als Referenzprodukte werden die jeweiligen marktfähigen Sulfate angesetzt, die auch als Ausgangsstoff für die Kathodenproduktion genutzt werden. Um diese Referenzprodukt-Gutschriften zu rechtfertigen, wird noch ein ergänzender Schritt zur Erzeugung der jeweiligen Sulfate aus dem Mischsalz modelliert. Dazu wird die stöchiometrisch benötigte Menge an Schwefelsäure sowie ein geringer pauschaler Energiebedarf angesetzt.
Mangansulfat	79	Die hinsichtlich Repräsentativität, Aktualität und Aussagekraft als am geeignetsten eingeschätzten Datensätze für Nickelsulfat bzw. Cobaltsulfat stammen vom Nickel Institute bzw. vom Cobalt Institute. Sie beziehen sich auf Nickelsulfat-Hexahydrat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) bzw. auf Cobaltsulfat-Heptahydrat ($\text{CoSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$). Entsprechend stehen 1 kg Nickel bzw. Cobalt im Mischsalz 4,48 kg an ersetzttem Nickelsulfat-Hexahydrat bzw. 4,77 kg an ersetzttem Cobaltsulfat-Heptahydrat gegenüber.
Cobaltsulfat	84	
Lithiumcarbonat	49	In der prozess-technischen Abfolge der Hydrometallurgie ist Lithiumcarbonat das zuletzt abgetrennte Produkt. In der Stofffraction sind noch geringe Verunreinigungen enthalten. Der Aufwand zur Erzeugung eines marktfähigen Lithiumprodukts wird als gering eingeschätzt. Entsprechend wird ein pauschaler 5 %-iger Abschlag auf die Gutschrift des ersetzten Referenzprodukts angesetzt. Als Referenzprodukt wird marktgängiges Lithiumcarbonat (Batteriequalität) angesetzt.
Graphit	48	Das Graphitvorprodukt, das als Output der hydrometallurgischen Graphit Reinigung abgetrennt wird, weist einen Kohlenstoffgehalt von 96 % auf. Im anschließenden Prozessschritt „Kompaktierung, Tailoring“, der vom Projektpartner CTG bearbeitet wurde, wird ein marktfähiges Produkt („Graphitcompound“) erzeugt. Die angestrebte erneute Verwendung zur Produktion von neuen Lithium-Ionen-Batterien wird nicht als realistisch eingeschätzt. Dennoch wird marktgängiges Graphit (für diverse Anwendungen) als Referenzprodukt angesetzt.

Quelle: eigene Darstellung

FE: Funktionelle Einheit, d.h. Recycling von 1 000 kg Lithium-Ionen-Batterien des Typs NMC 111

Darüber hinaus werden an unterschiedlichen Stellen des Produktsystems (Ab-)wärme bzw. Strom als energetisch nutzbare Produkte erzeugt, die eine herkömmliche Erzeugung von Energie ersetzen können und mit entsprechenden Gutschriften verbucht werden.

3.6 Allokation

Als funktionelle Einheit ist das Recycling von 1 000 kg Lithium-Ionen-Batterien definiert, d. h. die Ergebnisse werden nicht für Einzelprodukte ausgewiesen, sondern als Gesamtergebnis des Recyclingverfahrens. Aus diesem Grund ist eine Allokation der Umweltlasten unter den Produkten des Mercator-Verfahrens (siehe Abschnitt 3.5) nicht erforderlich.

Den verwendeten LCI-Datensätzen aus den Datenbanken liegen teilweise Allokationen zugrunde, die den entsprechenden Quellen / Dokumentationen entnommen werden können.

Die Herstellung von Batterien ist nicht Teil des untersuchten Systems (siehe Abschnitt 3.1): Weder ist die Produktion der Batterien, die nach der Nutzungsphase als Batterieschrott den Hauptinput in das hier untersuchte Recyclingsystem darstellen, Teil der Systemgrenze, noch die Nutzungen der mithilfe des Mercatorverfahrens erzeugten unterschiedlichen Sekundärmaterialien, insbesondere eine etwaige Herstellung neuer Batterien. Ökobilanziell geht der Batterieschrott lastenfrei ins Recycling ein, abgesehen vom Antransport des Batterieschrotts. Alle Ergebnisse dieser Studie gelten nur für diesen End-of-Life-Allokationsansatz.

Grundsätzlich kann diese methodische Randbedingung auch variiert werden. Insbesondere könnten Teile der Umweltlasten aus der Batterieproduktion dem aufnehmenden Mercator-Recyclingsystem angelastet werden. Hierzu existieren zahlreiche unterschiedliche End-of-Life-Allokationsansätze [Ekvall et al. 2020], beispielsweise die 50:50-Methode oder die im Rahmen des Product Environmental Footprint (PEF) entwickelte Circular Footprint Formula (CFF) [European Commission 2021]. Die Circular Footprint Formula, bei der unter anderem der Rezyklateinsatz, die Recyclingquote, die Qualität der Rezyklate und das Verhältnis aus Angebot und Nachfrage der jeweiligen Rezyklate berücksichtigt wird, soll auch verwendet werden, sofern gemäß der zeitnah in Kraft tretenden EU Battery Regulation der Carbon Footprint einer Batterie ausgewiesen wird [JRC 2023; RECHARGE 2021].² Da im Rahmen des Mercator-Projekts keine Untersuchungen zur Batterieproduktion stattfanden, wird von einer quantitativen Darstellung, beispielsweise in Form einer Sensitivitätsrechnung, abgesehen. Hinzu kommt, dass in dieser Ökobilanzstudie im Kern eine bestimmte Recyclingroute untersucht wird und nicht ein in Zukunft potenziell in Deutschland zu etablierendes Recyclingsystem für Batterien – analog zu beispielsweise dem Glasflaschenrecycling – auf dessen Basis durchschnittliche Umweltlasten pro Batterie bzw. Batteriedurchlauf zu berechnen wären. Auf die methodische Randbedingung des lastenfreien Eingangs des Batterieschrotts und auf die Relevanz wird an entscheidenden Stellen der Studie hingewiesen.

3.7 Wirkungskategorien

Von den einzelnen Produktionsschritten können unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt ausgehen. Diese möglichen Auswirkungen sind bei der Schadstoffbewertung in der Wirkungsabschätzung zu berücksichtigen. Die Aufgabe der Wirkungsabschätzung ist es, die in der Sachbilanz erhobenen Daten in Hinblick auf bestimmte Umweltauswirkungen, sogenannte Wirkungskategorien, zu untersuchen und damit zusätzliche Informationen zu liefern, die in die Bewertung einfließen.

² Im Zuge der Ausgestaltung des Batteriepasses hat die Global Battery Alliance allerdings im Frühsommer 2023 die Empfehlung veröffentlicht, die Cut-Off Methode zu verwenden [GBA 2023; Systemic et al. 2023a; Systemic et al. 2023b].

Der Guide zum Product Environmental Footprint (PEF) [EC 2013] führt folgende Standardwirkungskategorien auf: Klimaänderung, Abbau der Ozonschicht, Ökotoxizität – Süßwasser, Humantoxizität - kanzerogene Folgen, Humantoxizität - nichtkanzerogene Folgen, Feinstaub/anorganische Emissionen, Ionisierende Strahlung - Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, Fotochemische Bildung von Ozon, Versauerung, Eutrophierung – Land, Eutrophierung – Wasser, Ressourcenerschöpfung – Wasser, Ressourcenerschöpfung – mineralisch, fossil, Landnutzungsänderungen

Das International Reference Life Cycle Data-Handbuch [ILCD 2010] empfiehlt nachfolgende Wirkungskategorien: Climate change, (Stratospheric) Ozone depletion, Human toxicity, Respiratory inorganics, ionizing radiation, (Ground-level) Photochemical ozone formation, Acidification (land and water), Eutrophication (land and water), Ecotoxicity, Land use, Resource depletion (minerals, fossil and renewable energy resources, water).

Weitere Wirkungskategorien sind z. B. Geruchsbelästigung, Lärm, Belastung am Arbeitsplatz, Abwärme und Abfallaufkommen, Bedrohung von Naturschönheit und -vielfalt [UBA 1995].

Bezüglich der zu betrachtenden Wirkungskategorien führt die Fachliteratur aus: „Da ISO 14044 keine feste Liste von Wirkungskategorien vorgibt, nicht einmal eine Empfehlungsliste, obliegt die Auswahl der Kategorien den Erstellern der Ökobilanz.“ [Klöppfer 2009].

In dieser Ökobilanz werden die in Tabelle 3-3 aufgeführten Wirkungskategorien detailliert ausgewertet und in Ergebnisgrafiken dargestellt. Diese Wirkungskategorien geben einen umfassenden Überblick über die Umweltauswirkungen des untersuchten Systems. Für weitere Wirkungskategorien – darunter der Verbrauch abiotischer fossiler Ressourcen, Öko- bzw. Humantoxizität, Feinstaub, Wasserbedarf und Flächenbelegung – wurde geprüft, ob sich deutlich andere Ergebnisse im Vergleich zu den in Tabelle 3-3 aufgelisteten Wirkungskategorien ergeben (siehe Abschnitt 5.4). Klassifizierung und Charakterisierung erfolgen nach CML 2016 bzw. ReCiPe 2016 Midpoint (H). Bei der ReCiPe 2016 Midpoint Methode erfolgt die Wirkungsabschätzung auf Midpoint-Ebene, d. h. in der Mitte der Wirkungskette. Die problemorientierten Midpoint-Wirkungsindikatorenergebnisse haben den Vorteil einer höheren Datensicherheit und enthalten keine Normierung bzw. Gewichtung. Da sich bei den anderen Wirkungskategorien keine deutlich anderen Ergebnisse zeigen, wird auf eine Ausweisung der entsprechenden Ergebnisse verzichtet.

Tabelle 3-3: Untersuchte Wirkungskategorien

Abk.	Wirkungskategorie	Einheit	Wirkungsabschätzungsmethode
GWP	Globale Erwärmung	kg CO ₂ -Äquiv.	ReCiPe 2016 (H) v1.1
ADP_{elem}	Abiotischer Ressourcenverbrauch	kg Sb-Äquiv.	CML 2016
AP	Versauerungspotenzial	kg SO ₂ -Äquiv.	CML 2016
EP	Eutrophierungspotenzial	kg PO ₄ -Äquiv.	CML 2016
POCP	Sommersmog	kg NO _x -Äquiv.	ReCiPe 2016 (H) v1.1
KEA, ges	Kumulierter Energieaufwand	MJ	

Quelle: Eigene Darstellung

Die Berechnung der **Globalen Erwärmung** (global warming potential - GWP) in Form von CO₂-Äquivalenten wird allgemein anerkannt. Mit dem Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)

besteht zudem ein internationales Fachgremium, das sowohl die Methode als auch die entsprechenden Kennzahlen für klimawirksame Substanzen errechnet und fortschreibt. Bei der Berechnung von CO₂-Äquivalenten muss die Verweilzeit der Gase in der Troposphäre berücksichtigt werden. ISO 14067 legt den Bezugszeitraum auf der 100-Jahre-Basis fest und dieser Empfehlung folgen wir. Die in ReCiPe 2016 Midpoint (H) hinterlegten Charakterisierungsfaktoren stammen aus [IPCC 2013].

Der **Verbrauch abiotischer Ressourcen** ist ein Maß für die Entnahme abiotischer Ressourcen aus der Erde bzw. die Erschöpfung der nicht lebenden natürlichen Ressourcen. Es folgt dem vom CML entwickelten Ansatz [CML 2016].

Eine **Versauerung** kann sowohl bei terrestrischen als auch bei aquatischen Systemen eintreten. Verantwortlich sind die Emissionen säurebildender Gase. Die Berechnung des Versauerungspotentials (acidification potential - AP) erfolgt in Form von SO₂-Äquivalenten.

Die **Eutrophierung** steht für eine Nährstoffzufuhr im Übermaß, sowohl für Gewässer als auch für Böden. Das Eutrophierungspotential (EP, Eutrophication potential) von Nährstoffemissionen wird hierbei durch die Aggregation von Phosphat-Äquivalenten ermittelt.

Mithilfe der **photochemischen Ozonbildung** (POCP, photochemical ozone creation potential), auch **Sommersmog**, wird die Veränderung der Ozonkonzentration auf Bodenhöhe (Troposphäre) abgebildet. Eine relevante Rolle nehmen u. a. flüchtige organische Verbindungen (VOC) ein.

Der **Kumulierte Energieaufwand, gesamt** fasst als Inputindikator sämtliche Primärenergieaufwendungen zusammen, die durch das untersuchte System verursacht werden. Hier werden sowohl erneuerbare als auch nicht-erneuerbare Quellen betrachtet.

Eine Normierung mit durchschnittlichen Jahresemissions- bzw. Verbrauchswerten als optionaler Bestandteil der Wirkungsabschätzung wird in dieser Studie nicht durchgeführt. Ebenso werden keine Ordnungs- und Gewichtungsverfahren verwendet. Die Wirkungsabschätzungsergebnisse sind relative Aussagen und können keine Voraussagen über Auswirkungen auf die Wirkungsendpunkte, Schwellenwert-überschreitungen, Sicherheitsspannen oder Risiken machen.

3.8 Methoden der Auswertung

Die Auswertung wird entsprechend der in ISO 14040/44 geforderten Bestandteilen durchgeführt. Sie umfasst:

- Identifizierung der signifikanten Parameter auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzungsphasen der Ökobilanz;
- eine Beurteilung, die die Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen berücksichtigt;
- Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen.

3.9 Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts

Die Art und der Aufbau des Berichts orientieren sich an den vier Phasen einer Ökobilanz (Zieldefinition, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung, Auswertung).

Nach Abschluss des Projekts soll dieser Bericht als Ganzes publiziert werden.

3.10 Konformität und kritische Prüfung

Die vorliegende Ökobilanz wurde entsprechend den einschlägigen Vorgaben der ISO 14040/14044 durchgeführt. Wie in Abschnitt 2 ausgeführt, entfallen die spezifischen Anforderungen an vergleichende Ökobilanzen, da Vergleiche unterschiedlicher Recyclingverfahren nicht intendiertes Ziel der vorliegenden Ökobilanzstudie ist. Die Arbeiten zur Ökobilanz wurden durch einen unabhängigen, externen Critical Reviewer (Prof. Dr. Finkbeiner), der auf einschlägige und umfassende Kenntnisse und Erfahrungen der methodischen Anforderungen an Ökobilanzen und deren Weiterentwicklung verweisen kann, begleitet und mit Empfehlungen unterstützt. Eine Validierung des LCI-Modells oder die Verifizierung der verwendeten Daten war nicht Gegenstand der Prüfung. Das Gutachten des Critical-Review-Experten Prof. Dr. Finkbeiner ist in den Anhang dieses Berichtes aufgenommen.

4 Sachbilanz

4.1 Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität

4.1.1 Datenerhebung: Vordergrundsystem

Die Material- und Energieflüsse zu den Prozessen des Vordergrundsystems (siehe Abbildung 3-1) wurden von den folgenden jeweils dafür zuständigen Projektpartner*innen zur Verfügung gestellt:

- Demontage, Pyrolyse, Mechanische Behandlung: Accurec Recycling GmbH, unterstützt durch das Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling (IME) der RWTH Aachen
- Siebung, Flotation: UVR-FIA Verfahrensentwicklung-Umweltschutztechnik-Recycling-GmbH
- Hydrometallurgie, Graphit Reinigung: Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling (IME) der RWTH Aachen
- Kompaktierung, Tailoring: CTG GmbH & Co KG

Die übermittelten Daten wurden vom Öko-Institut auf Plausibilität geprüft. Die wichtigsten Stoff- und Energieflüsse der jeweiligen Prozessschritte sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Unter anderem ergeben sich aus den zugrundeliegenden Stoffflüssen die in Tabelle 4-2 aufgeführten rechnerischen Gesamtückgewinnungsquoten des Mercatorverfahrens.

Tabelle 4-1: Sachbilanz: Ausgewählte Stoff- und Energieflüsse, jeweils pro Funktioneller Einheit (Recycling von 1000 kg LIB)

Parameter	Wert	Einheit
DEMONTAGE		
<i>Inputs</i>		
Elektrische Energie	2	kWh
<i>Outputs</i>		
Eisen- / Stahlfraction	310	kg
Aluminiumfraction	26	kg
Kabelfraction	16	kg
Kunststofffraction	15	kg
Elektronikfraction	75	kg
PYROLYSE		
<i>Inputs</i>		
Kalksplit	50	kg
Stickstoff	112	Nm3
Wasser	67	L

Parameter	Wert	Einheit
Luft	1.285	Nm3
Elektrische Energie	326	kWh
<i>Outputs</i>		
Abwärme	481	kWh
Calciumfluorid / Calciumcarbonat-Mix	42	kg
CO ₂	199	kg
N ₂	1.394	kg
H ₂ O	142	kg
MECHANISCHE BEHANDLUNG		
<i>Inputs</i>		
Elektrische Energie	5	kWh
Big Bags	0,3	Stk.
<i>Outputs</i>		
Folienfraktion	87	kg
Stahlfraktion	103	kg
TROCKEN- UND NASSSIEBUNG		
<i>Inputs</i>		
Elektrische Energie	3	kWh
Frischwasser	38	L
FLOTATION		
<i>Inputs</i>		
Spezifische organische Chemikalien	73	g
Elektrische Energie	7	kWh
GRAPHIT REINIGUNG		
<i>Inputs</i>		
HCl	584	kg
H ₂ O ₂	69	kg
Elektrische Energie	15	kWh

Parameter	Wert	Einheit
HYDROMETALLURGIE		
<i>Inputs</i>		
HCl	2.108	kg
H ₂ O ₂	395	kg
Fe	12	kg
NaOH	1.186	kg
Na ₂ CO ₃	12	kg
Elektrische Energie	108	kWh
<i>Outputs</i>		
Graphit-angereicherte Stofffraktion	71	kg
Kupfer	5,7	kg
Cobalt im Mischsalz	30,5	kg
Nickel im Mischsalz	30,2	kg
Mangan im Mischsalz	28,7	kg
Lithiumcarbonat	9,3	Kg
KOMPAKTIERUNG / TAILORING		
<i>Inputs</i>		
Polypropylen	5	kg
Elektrische Energie	227	kWh
<i>Outputs</i>		
Graphitcompound	48	kg

Zwischenprodukte, die in vollem Umfang einen Input in den Folgeprozess darstellen, sind nicht aufgeführt.

Quelle: Angaben der Konsortialpartner*innen, siehe Abschnitt 4.1

Tabelle 4-2: Rechnerische Gesamtrückgewinnungsquoten des Mercatorverfahrens

Stoff	Rechnerische Rückgewinnungsquote
Graphit	36 %
Nickel	93 %
Mangan	96 %
Cobalt	94 %
Lithium	80 %

Quelle: eigene Darstellung auf Basis der im Konsortium abgestimmten Stoff- und Energieflüsse

4.1.2 Datenerhebung: Hintergrundsystem

Die Ökobilanzsoftware GaBi in der Version 10.6 wurde für diese Ökobilanz verwendet.

Bzgl. den Daten des Hintergrundsystems wurde wie folgt vorgegangen:

- Die Umweltauswirkungen wurden mithilfe von LCI-Datensätzen aus ecoinvent v3.8 abgebildet. Der geographische Bezug der Datensätze ist nach Möglichkeit landesspezifisch, ansonsten europäisch oder global gewählt. Insofern ist der primäre räumliche Bezug der Ökobilanz Deutschland. Eine Liste der verwendeten Datensätze ist im Anhang in Tabelle 8-1 dokumentiert.
- Für die Zusammensetzung der Elektronikbestandteile, vor allem des Batteriemanagementsystems (BMS), wurden Analysen aus einem früheren Lithium-Ionen-Batterie-Recyclingprojekt [Buchert et al. 2011b] verwendet, insbesondere zu den Gehalten an Kupfer, Nickel, Silber und Gold. Es ist anzunehmen, dass sich mittlerweile Veränderungen bei der Materialzusammensetzung ergeben haben. Die Relevanz für das Ökobilanzergebnis ist gering.
- Für Salzsäure, Wasserstoffperoxid und Natronlauge existieren in den gängigen Ökobilanzdatenbanken Einträge, die sich auf definierte Konzentrationen beziehen, die nicht mit den Konzentrationen übereinstimmen, die in den hydrometallurgischen Versuchen der verantwortlichen Konsortialpartner*innen verwendet wurden. Daher wurden die benötigten Chemikalienmengen linear auf die Konzentration der Ökobilanzdatenbank skaliert.
- Transporte: wo möglich, wurden Market-LCI-Datensätze verwendet, die die im Rahmen der Prozesskette anfallenden Transporte bis zum Werkstor des Herstellers beinhalten. Die Transporte
 - der ausgebauten Batterien zum Werk des Recyclers mithilfe eines Gefahrguttransports,
 - der stofflichen Inputs in das Vordergrundsystem (Chemikalien, Verpackungsmaterialien, usw.),
 - der Zwischenprodukte zu einer Anlage für das konventionelle Recycling von Stahl, Aluminium, Kupfer, Nickel, Silber, Gold,
 - der Aktivmasse zu einem anderen Standort, an dem die weitere Prozessierung stattfindet,
 - der Abfälle zu den jeweiligen Entsorgungsanlagen,

wurden ergänzend modelliert. Es wurde für alle genannten Transporte angesetzt, dass diese mit einem dieselbetriebenen LKW durchgeführt werden. Es wurden je nach Anwendungsfall einfache Distanzen von 30 bis 500 km in LKWs mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 12 - 14 bzw. 34 - 40 t angesetzt. Es wurden in allen Fällen LKWs der Abgasnorm EURO 5 angesetzt.

4.1.3 Technologische, geographische und zeitliche Repräsentativität

Die Daten wurden nicht auf einen großtechnischen Betrieb im Jahr 2030 angepasst oder skaliert, sondern repräsentieren den aktuellen Stand der Arbeiten der Projektpartner*innen, d. h. Pilot- bzw.

Demonstrationsmaßstab im Jahr 2022 in Deutschland. Im Vergleich zu einem potenziellen zukünftigen großtechnischen Betrieb sind die eingehenden Parameter erfahrungsgemäß teilweise über- bzw. unterschätzt. Diese Randbedingung muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

4.1.4 Datenqualität

Die Datenqualität wird insgesamt als gut eingeschätzt:

- Vordergrundsystm: Die von den Projektpartner*innen erhobenen Daten sind gewissenhaft erhoben, gelten spezifisch für das hier untersuchte Recyclingverfahren und wurden durch das Öko-Institut auf Plausibilität geprüft. Es gilt lediglich die weiter oben in diesem Abschnitt angeführte Einschränkung, dass die Daten auf noch in Entwicklung befindlichen Prozessen basieren, sodass sich im Fall einer großtechnischen Realisierung eine in Teilen andere Datenlage ergeben könnte.
- Hintergrundsystm: Bei den mengenmäßig dominanten Prozessinputs handelt es sich überwiegend um Standardprodukte (Basischemikalien, Kalksplitt, usw.), sodass diesbezüglich weitgehend aktuelle LCI-Datensätze mit guter Datenqualität vorliegen. Hinsichtlich den gutgeschriebenen Referenzprodukten gilt dies in vielen Fällen ebenso. Der Datensatz zu Nickel wird durch das Nickel Institute für das Referenzjahr 2017 bereitgestellt. Der Datensatz zu Lithium berücksichtigt sowohl die Produktion auf Basis von Spodumenen in Australien als auch auf Basis von Salzsole in Chile und basiert laut Dokumentation auf Primärdaten von großen produzierenden Unternehmen, darunter SQM in Chile. Zu Graphit existieren ausschließlich Datensätze, die batteriefähiges Graphit bzw. eine Graphit-basierte Anode zur Anwendung in Lithium-Ionen-Batterien repräsentieren. Vor dem Hintergrund der technischen Eigenschaften des im Rahmen des Mercatorprojekts produzierten Sekundärgraphits handelt es sich bei diesem Datensatz um eine Überschätzung der ökobilanziellen Gutschriften, siehe auch die Diskussion in den Abschnitten 5.1 und 6.3.
- Cobalt: Während in Vorgängerprojekten die Gutschrift für ersetztes Primärcobalt noch mithilfe eines Näherungsdatensatzes („Proxy“) abgebildet werden musste, liegt mittlerweile ein auf Initiative des Cobalt Institute erstellter validierter Datensatz für das Referenzjahr 2019 vor. In die in dieser Studie verwendete Ökobilanzdatenbank ecoinvent hatte dieser Datensatz zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie noch nicht Eingang gefunden. Aufgrund der Relevanz der Cobaltgutschrift und der hohen Repräsentativität und Aktualität der vom Cobalt Institute in Auftrag gegebenen Studie wurden daher die auf der Homepage des Cobalt Institutes öffentlich einsehbaren Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (LCIA, Life cycle impact assessment) manuell als Cobalt-Datensatz in die verwendete LCA-Software eingepflegt. Dieses Vorgehen ließ sich lediglich für eine der sechs untersuchten Wirkungskategorien, für den Abiotischen Ressourcenverbrauch, nicht realisieren, da das Ergebnis für diese Wirkungskategorie nicht durch das Cobalt Institute veröffentlicht ist. Stattdessen wird für diese Wirkungskategorie das LCIA-Ergebnis des ecoinvent-Datensatzes „Market for cobalt sulfate, RoW“ verwendet³. Diese methodische Inkonsistenz wird aufgrund der hohen Relevanz der Cobaltgutschrift in Kauf genommen, damit die vorliegende LCA-Studie von der hohen Datenqualität des Datensatzes vom Cobalt Institute profitieren kann.

³ Eine sehr konservative Alternative dazu könnte darin bestehen, lediglich die im Produkt enthaltenen Materialmengen im Abiotischen Ressourcenverbrauch anzurechnen.

Mithilfe einer Literatur- und Datenrecherche konnte gezeigt werden, dass die aktuellen LCI-Datensätze zu Cobalt hinsichtlich der LCIA-Ergebnisse stark variieren, siehe Tabelle 4-3. In aktuellen Ökobilanzstudien zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien werden die ecoinvent-Datensätze verwendet [Kallitsis et al. 2022; Mohr et al. 2020; Rajaeifar et al. 2021].

Tabelle 4-3: LCIA-Ergebnisse GWP in kg CO₂-Äq. pro kg Cobalt-Produkt aus unterschiedlichen Datenquellen

Cobalt- produkt	Cobalt- gehalt	Ecoinvent v3.8		Ecoinvent v3.9		GaBi v10.6		Cobalt Institute 2023	
		Ergebnis	Quelle	Ergebnis	Quelle	Ergebnis	Quelle	Ergebnis	Quelle
Cobaltsulfat Heptahydrat	21 %							4	CI 2023
Cobaltsulfat	38 %	24	Argonne 2018	30	Argonne 2018				
Cobalt Metall	100 %	40	CDI 2016	46	CDI 2016	38	CDI 2016	28	CI 2023

Quelle: eigene Darstellung

CDI: Cobalt Development Institute (mittlerweile umbenannt in Cobalt Institute)

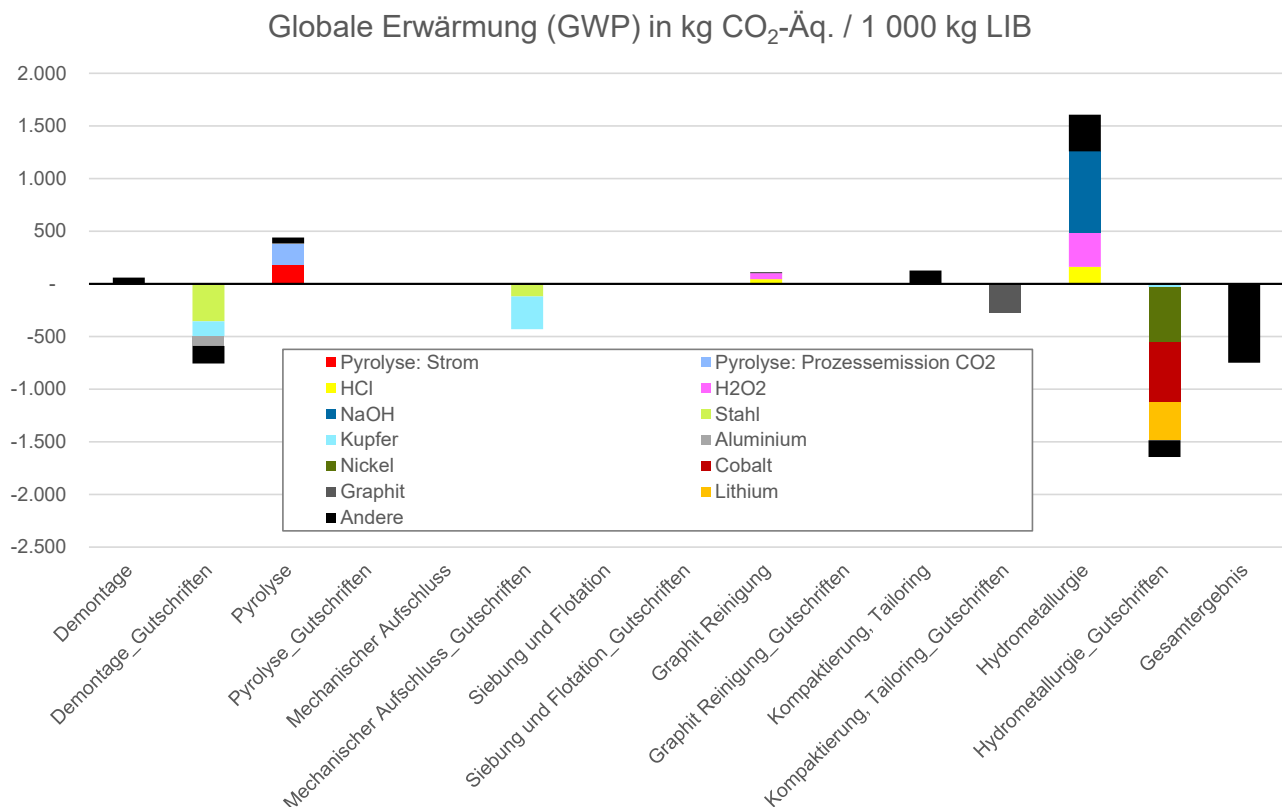
CI: Cobalt Institute

5 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

5.1 Globale Erwärmung

Die Ökobilanzergebnisse für die Wirkungskategorie Globale Erwärmung (Global Warming Potential, GWP) sind in Abbildung 5-1 dargestellt.

Abbildung 5-1: LCA-Ergebnisse Globale Erwärmung



Quelle: eigene Darstellung

Ergebnisse und Diskussion:

- Das Mercator-Recyclingverfahren führt unter den getroffenen Annahmen und bei den verwendeten Daten zu Treibhausgaseinsparungen. Pro metrischer Tonne Lithium-Ionen-Batterien, die recycelt werden, können ca. 750 kg CO₂-Äq. eingespart werden, sofern marktübliche Materialmixe ersetzt werden.
- Mit 68 % entsteht der größte Teil der Emissionen durch die hydrometallurgische Bearbeitung, insbesondere durch die eingesetzten Chemikalien: HCl trägt mit 7 % zu den Emissionen bei, H₂O₂ mit 14 % und NaOH mit 33 %. Auch die Pyrolyse ist mit nennenswerten Emissionen (19 % der Gesamtemissionen) verbunden, insbesondere aufgrund des hohen Strombedarfs und den direkten Prozessemissionen. Von geringerer Relevanz sind die Graphit Reinigung, die Kompaktierung / das Tailoring und die Demontage, die in der Summe lediglich 13 % der

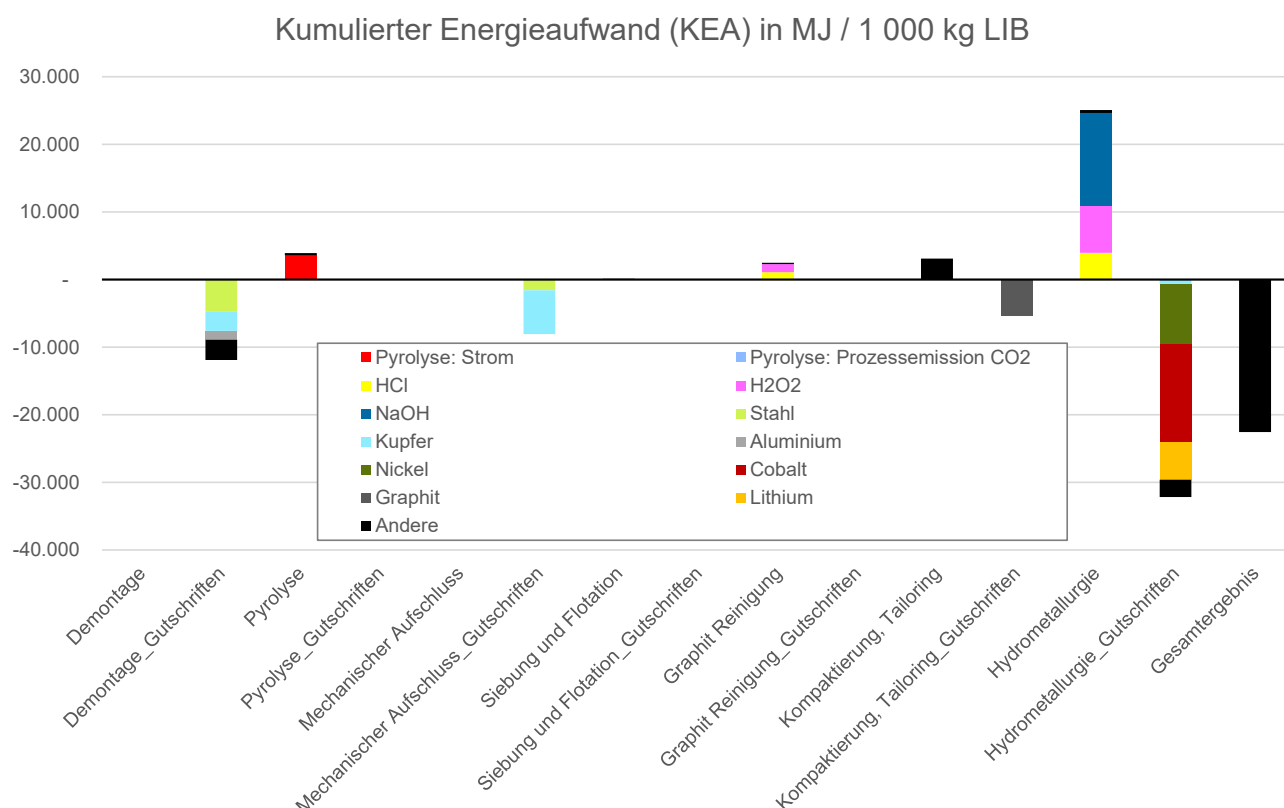
Gesamtemissionen ausmachen. Mit der Mechanischen Behandlung und der Siebung / Flotation sind nur untergeordnete Emissionen verbunden (in Summe < 0,5 % der Gesamtemissionen).

- Der größte Teil der Gutschriften resultiert mit 62 % aus den Produkten der Hydrometallurgie und dem Kompaktierung / Tailoring. Die Cobaltgutschrift ist mit ca. 580 kg CO₂-Äq. pro funktionelle Einheit am größten, aber nur geringfügig größer als die Nickelgutschrift mit ca. 520 kg CO₂-Äq. Auch die Einsparung von Lithium und Graphit führt mit ca. 360 kg CO₂-Äq. bzw. ca. 270 kg CO₂-Äq. pro funktionelle Einheit zu nennenswerten Einsparungen. Das Recycling des Batteriegehäuses usw. und die damit verbundenen Gutschriften von Stahl (ca. 450 kg CO₂-Äq.), Kupfer (ebenfalls ca. 450 kg CO₂-Äq.) und Aluminium (ca. 100 kg CO₂-Äq.) sind ebenfalls nennenswert aber in der Summe niedriger als die Gutschriften aus der Hydrometallurgie. Das stellt eine Veränderung im Vergleich zu früheren LCA-Studien zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien dar, in denen die Gutschriften, die aus dem etablierten Recycling von Aluminium, Edelstahl und Kupfer resultieren, den dominierenden Teil der Gesamtgutschriften ausmachten [Buchert et al. 2011a; Buchert et al. 2015; Buchert et al. 2016]. Die folgenden drei Hauptgründe für diese Veränderung lassen sich ausmachen: Erstens war bis vor wenigen Jahren lediglich ein „Proxy“-Datensatz für Primärcobalt verfügbar, wohingegen in der vorliegenden Studie auf einen aktuellen, vom Cobalt Institute beauftragten LCI-Datensatz zugegriffen werden kann. Zweitens werden hohe Rückgewinnungsquoten für die in der Hydrometallurgie gewonnenen Produkte erzielt. Drittens wird in dieser Studie auf Basis der vorgenommenen Materialuntersuchungen der verwendeten Batterien Stahl, d. h. nicht Edelstahl und nicht Aluminium, als primäres Material von Batterie- und Modulgehäuse angesetzt.
- Werden die Emissionen aus den Prozessschritten Graphit Reinigung und Kompaktierung / Tailoring aufsummiert und der Gutschrift für das ersetzte Graphit gegenübergestellt, sind die Vor- und die Nachteile der Prozessschritte zur Gewinnung von Graphit ungefähr ausgeglichen. Es muss berücksichtigt werden, dass der angesetzte LCI-Datensatz laut Dokumentation solches Graphit repräsentiert, das sich für den Einsatz in Lithium-Ionen-Batterien eignet, was für das Sekundärgraphit des Mercator-Recyclingverfahrens nicht gilt. Wie in Kapitel 3.5 und Tabelle 8-1 beschrieben, ist kein besser geeigneter LCI-Datensatz verfügbar. Dies bedingt jedoch keine relevanten Auswirkungen auf die Gesamtergebnisse der Ökobilanz.

5.2 Kumulierter Energieaufwand

In Abbildung 5-2 sind die Ergebnisse für die Wirkungskategorie Kumulierter Energieaufwand dargestellt.

Abbildung 5-2: LCA-Ergebnisse Kumulierter Energieaufwand, gesamt

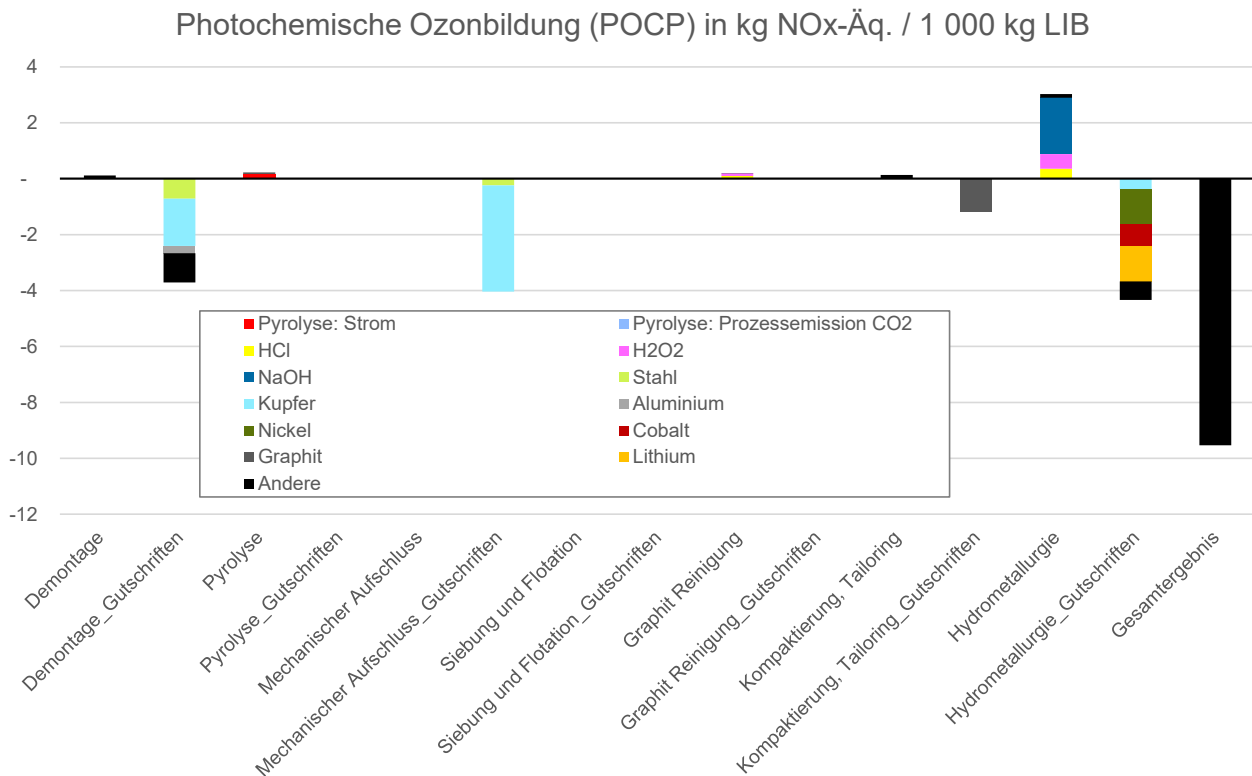


Quelle: eigene Darstellung

Das Grundmuster ist wie in vielen Fällen ähnlich zum Ergebnis für die Wirkungskategorie Globale Erwärmung. Insgesamt ist das Verhältnis aus Aufwendungen zu Einsparungen deutlicher vorteilhaft: die zusätzlichen Energieaufwendungen betragen lediglich ca. 60 % der Einsparungen.

5.3 Photochemische Ozonbildung

In Abbildung 5-3 sind die Ergebnisse für die Wirkungskategorie Photochemische Ozonbildung dargestellt.

Abbildung 5-3: LCA-Ergebnisse Photochemische Ozonbildung

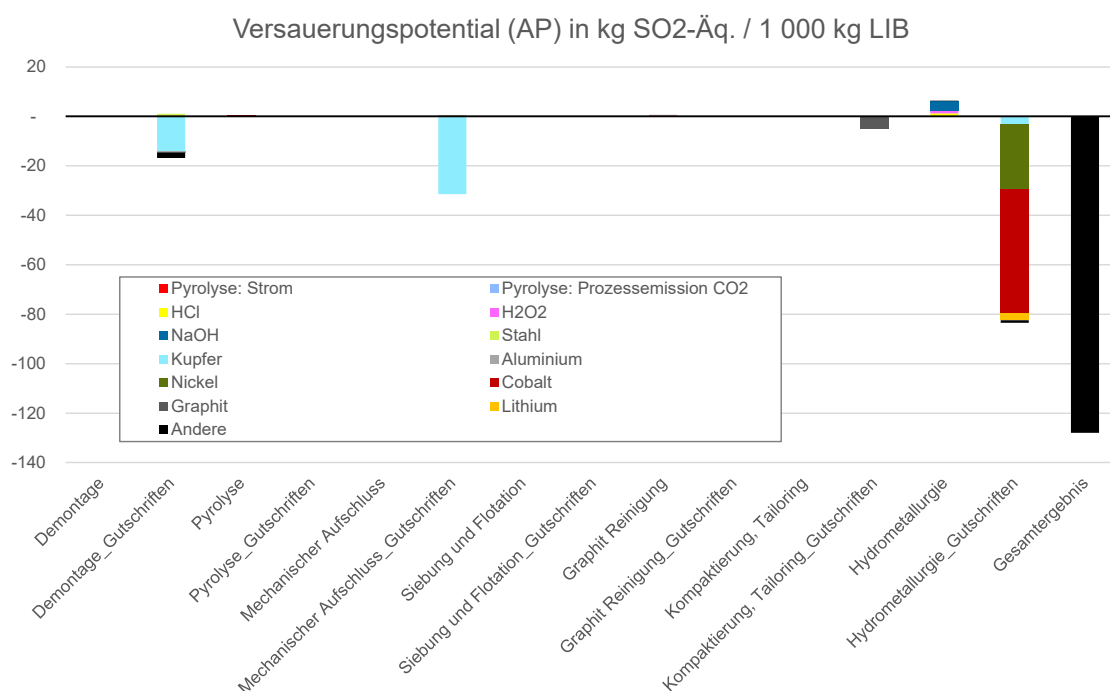
Quelle: eigene Darstellung

Im Vergleich zu den LCA-Ergebnissen für Globale Erwärmung und Kumulierter Energieaufwand verändert sich das Verhältnis aus Emissionen zu Einsparungen zugunsten des Mercator-Recyclingverfahrens, da mit der Produktion der Metalle größere spezifische Umweltauswirkungen verbunden sind als mit der Produktion der benötigten Chemikalien und des Prozessstroms: Die Emissionen betragen insgesamt lediglich noch knapp 30 % der Gutschriften. Außerdem sind in dieser Wirkungskategorie die Gutschriften aus den der Hydrometallurgie vorgelagerten Prozessschritten größer als aus der Hydrometallurgie: 66 % der Gutschriften resultieren aus der Demontage und der Mechanischen Behandlung, während 33 % der Gutschriften aus der Hydrometallurgie inkl. der Graphit Reinigung und dem Kompaktierung / Tailoring resultieren.

5.4 Versauerung, Eutrophierung und Abiotischer Ressourcenverbrauch

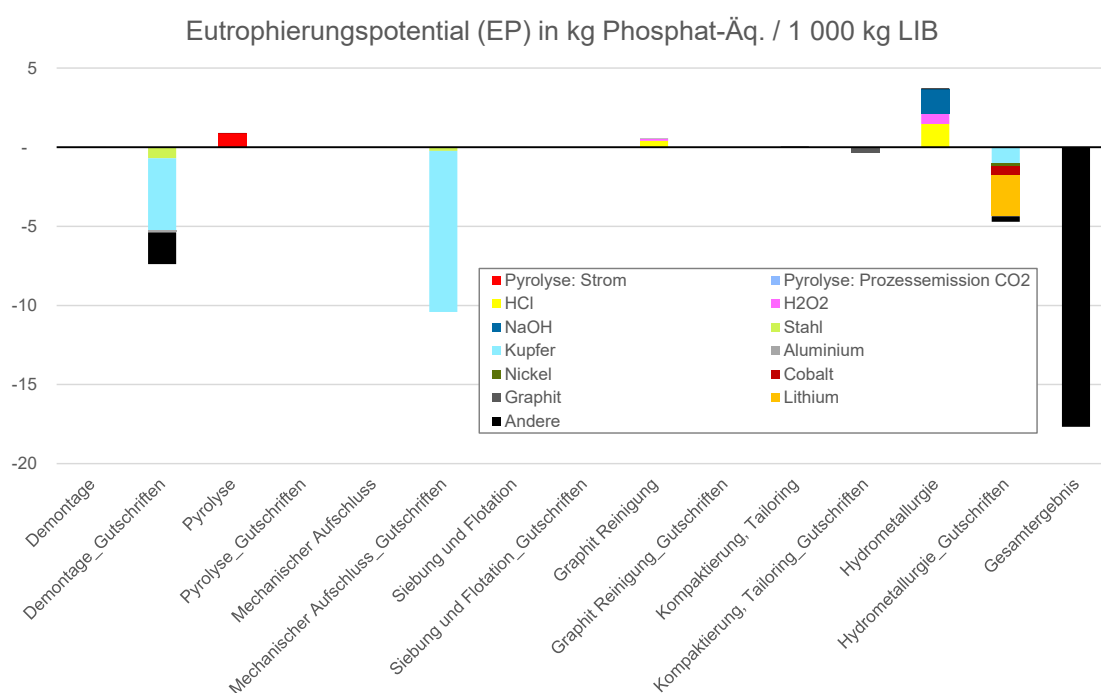
In Abbildung 5-4, Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 sind die LCA-Ergebnisse für die Wirkungskategorien Versauerung, Eutrophierung und Abiotischer Ressourcenverbrauch dargestellt.

Abbildung 5-4: LCA-Ergebnisse Versauerung

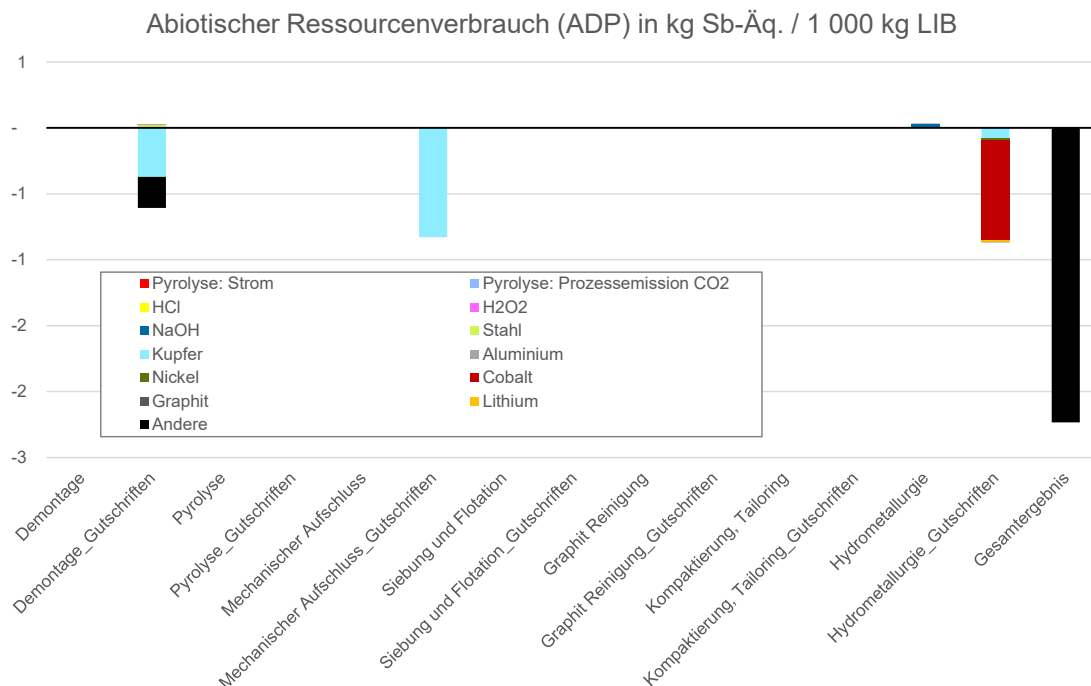


Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 5-5: LCA-Ergebnisse Eutrophierung



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 5-6: LCA-Ergebnisse Abiotischer Ressourcenverbrauch

Quelle: eigene Darstellung

Für die drei Wirkungskategorien Versauerung, Eutrophierung und Abiotischer Ressourcenverbrauch ergeben sich eindeutige und klare Umweltvorteile. Im Vergleich zu den hohen erzielbaren Gutschriften sind die Emissionen bzw. Ressourcenbedarfe des Mercator-Verfahrens klein.

Über die hier dargestellten 6 Wirkungskategorien hinausgehend wurde auch für über 20 weitere Wirkungskategorien – darunter Öko- bzw. Humantoxizität, Feinstaub, Wasserbedarf und Flächenbelegung – geprüft, dass sich keine Ergebnisumkehr ergibt. Daher wurde auf eine Darstellung der Ergebnisse zu diesen weiteren Wirkungskategorien in diesem Bericht verzichtet.

6 Auswertung der Ökobilanz

6.1 Identifizierung der signifikanten Parameter

Die Identifizierung der signifikanten Parameter ergibt sich aus der Ergebnisbeschreibung in Kapitel 5. Die wesentlichen Umweltlasten und -gutschriften resultieren aus der Hydrometallurgie, der Demontage und der Mechanischen Behandlung. Signifikante Prozessinputs sind insbesondere die Materialzusammensetzung der zu recycelnden Batterien, die Rückgewinnungsquoten, die benötigten Chemikalienmengen im Zuge der Hydrometallurgie, insbesondere Natriumhydroxid, Wasserstoffperoxid und Salzsäure, sowie der Strombedarf im Zuge der Pyrolyse.

6.2 Beurteilung

6.2.1 Vollständigkeitsprüfung

Alle Prozesse, die im Zuge der Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens als Bestandteil des untersuchten Produktsystems festgelegt wurden, wurden hinsichtlich der In- und Outputs abgebildet. Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben wurden im Vordergrund keine Abschneidekriterien angewendet, d. h. es sind alle von den Projektpartnern erhobenen Daten in die Sachbilanz eingegangen.

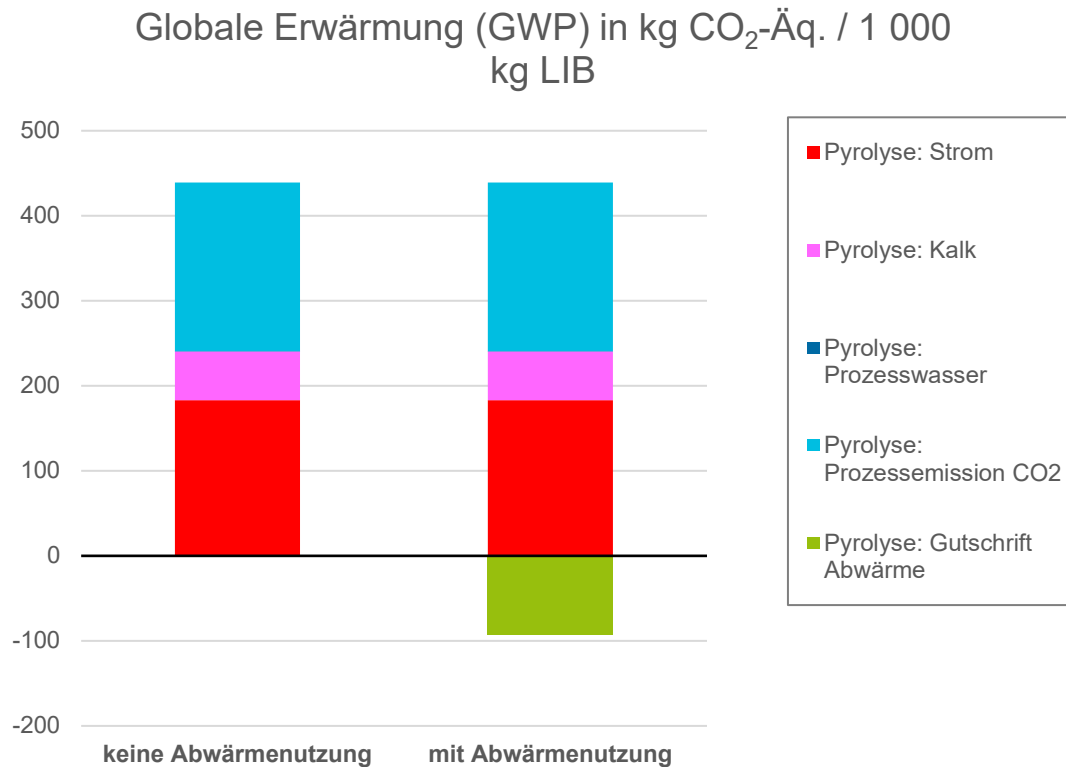
Es wird darauf hingewiesen, dass die Batterieproduktion nicht Bestandteil des untersuchten Systems ist und lastenfrei in das Recycling geht. Auch aus der Systemgrenze ausgeschlossen sind die Nutzungen der unterschiedlichen im Zuge des Mercatorverfahrens produzierten Sekundärmaterialien.

6.2.2 Sensitivitätsprüfung

Im Folgenden werden im Rahmen einiger Sensitivitätsanalysen einzelne Aspekte detaillierter analysiert und die Auswirkungen auf das Ergebnis diskutiert, wenn ausgewählte Parameter bzw. Randbedingungen variiert werden.

6.2.2.1 Abwärmenutzung Pyrolyse

Für das Hauptszenario wurde konservativ angesetzt, dass sich die bei der Pyrolyse entstehende Abwärme nicht nutzen lässt. In Abbildung 6-1 ist dargestellt, wie sich die durch die Pyrolyse verursachten Treibhausgasemissionen verändern, wenn 70 % der Abwärme genutzt werden können und entsprechend weniger Dampf mithilfe eines Erdgas-betriebenen Kessels erzeugt werden muss.

Abbildung 6-1: Sensitivitätsanalyse: Abwärmenutzung Pyrolyse

Quelle: eigene Darstellung

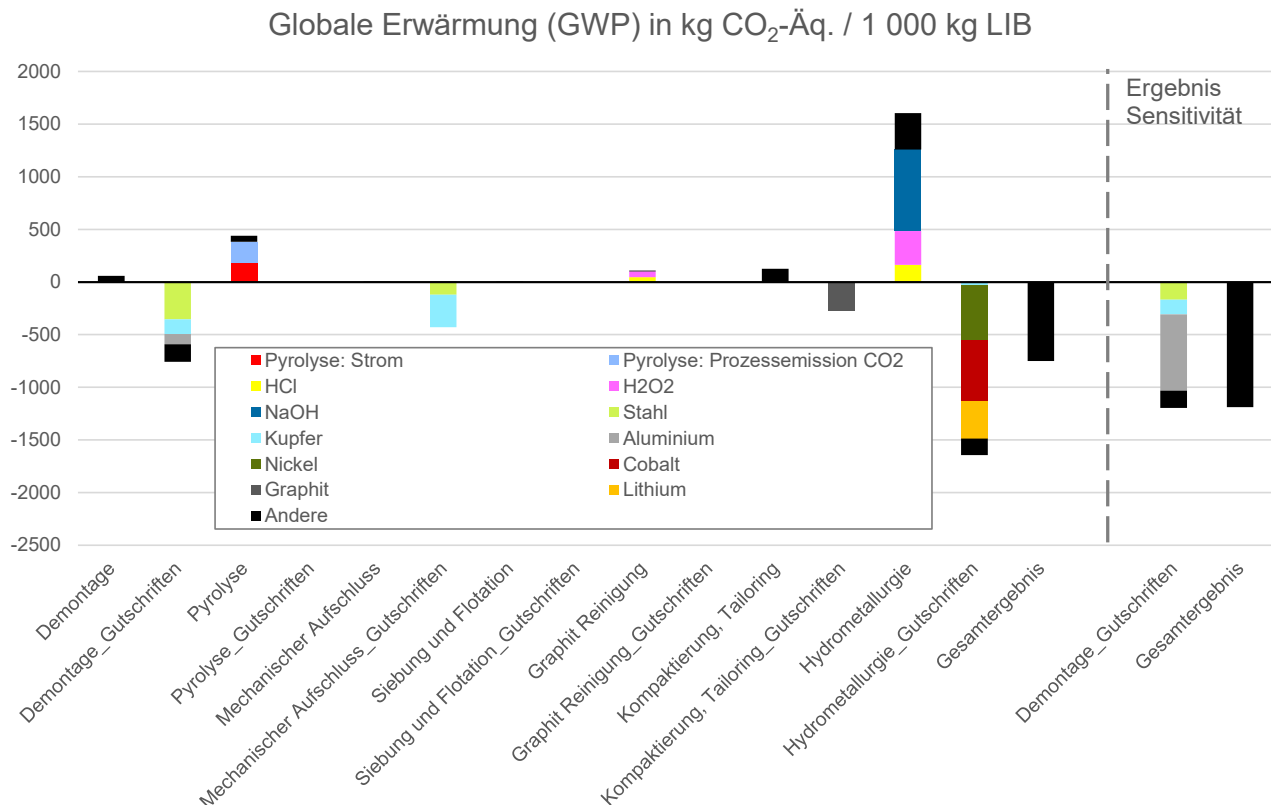
Das Ergebnis veranschaulicht, dass die mit der Pyrolyse verbundenen Emissionen deutlich reduziert werden können, indem die Abwärme genutzt wird. Die Umweltbewertung hängt von der individuellen energetischen Gestaltung der Anlage ab.

6.2.2.2 Aluminiumgehäuse anstatt Stahlgehäuse

Den Ergebnissen der Materialuntersuchungen der Konsortialpartner entsprechend wurde angesetzt, dass die Batterien ein Stahl- und kein Edelstahl- bzw. Aluminiumgehäuse aufweisen. Auf dem Batterienmarkt für Traktionsanwendungen finden sich viele Modelle mit Aluminiumgehäusen. Vor diesem Hintergrund zeigt Abbildung 6-2, wie sich das LCA-Ergebnis für die Wirkungskategorie Globale Erwärmung verändert, wenn 150 kg mehr Aluminium und 150 kg weniger Stahl recycelt werden.⁴

⁴ Bei einer Substitution von Stahl durch Aluminium würde massenmäßig weniger Aluminium benötigt werden, sodass eine Tonne Batterieschrott eine größere Anzahl an Altbatterien umfassen würde. Die Richtung und Relevanz der Ergebnisveränderung lässt sich auch mit diesen vereinfachten Randbedingungen beurteilen.

Abbildung 6-2: Sensitivitätsanalyse: Aluminium- statt Stahlgehäusen

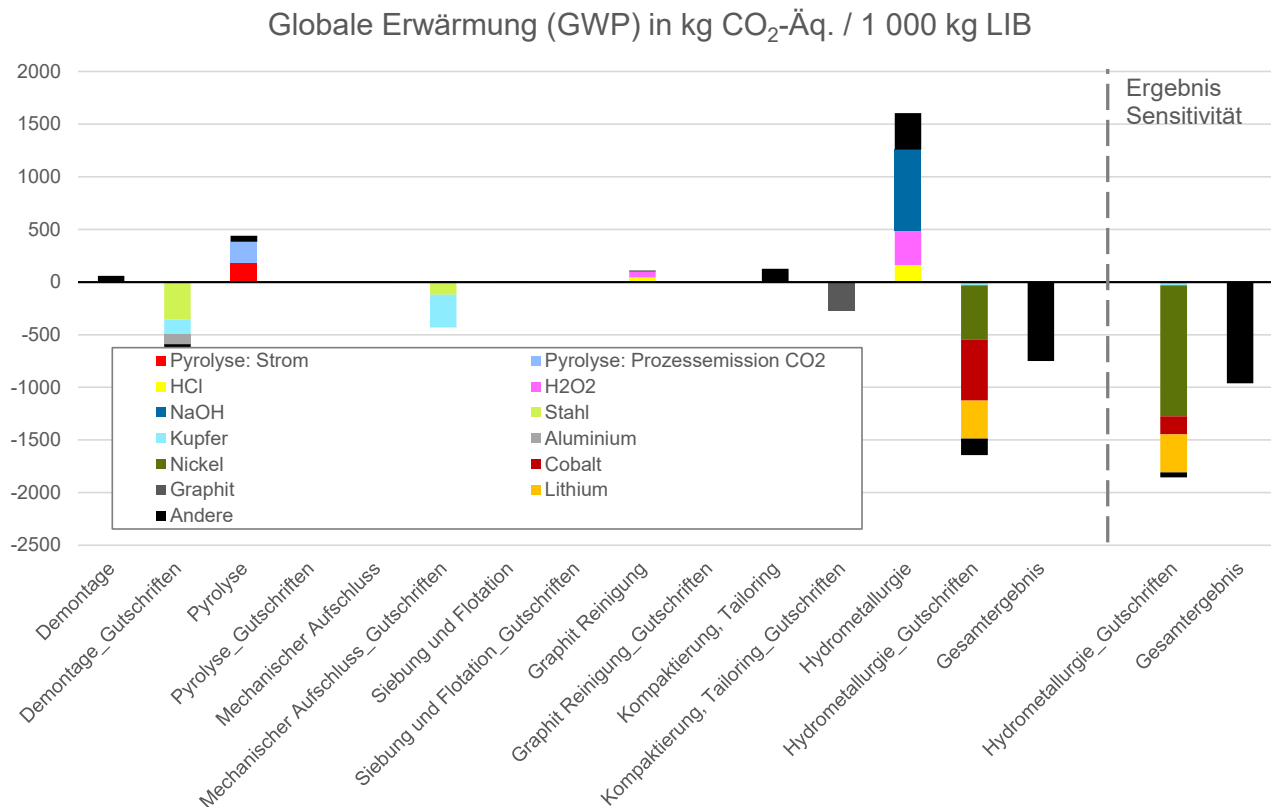


Quelle: eigene Darstellung

Wie auf der rechten Abbildungsseite dargestellt ist, lassen sich bei einer Batterie mit Aluminiumgehäuse im Prozessschritt Demontage deutlich höhere Gutschriften erzielen als bei einer Batterie mit Stahlgehäuse. Im Gesamtergebnis lassen sich in dieser Variante ca. 1.200 kg CO₂-Äq. pro Tonne zu recycelnden Lithium-Ionen-Batterien einsparen.

6.2.2.3 NMC 811 anstatt NMC 111

Aktuelle NMC-Batterien für Traktionsanwendungen enthalten deutlich mehr Nickel als Mangan bzw. als Cobalt. Dieser Ökobilanzstudie wurde eine generische NMC 111 Batterie zugrunde gelegt. Vor diesem Hintergrund zeigt Abbildung 6-3, wie sich die LCA-Ergebnisse für die Wirkungskategorie Globale Erwärmung verändern, wenn eine NMC 811 Batterie recycelt wird. Dabei wird vereinfachend angesetzt, dass lediglich die in der Hydrometallurgie gewonnenen Massen an Nickel, Cobalt und Mangan variieren, während die Prozessroute im Übrigen unverändert bleibt, d. h. dass unter anderem der Chemikalienbedarf der Hydrometallurgie unverändert bleibt, usw.

Abbildung 6-3: Sensitivitätsanalyse: NMC 811 statt NMC 111

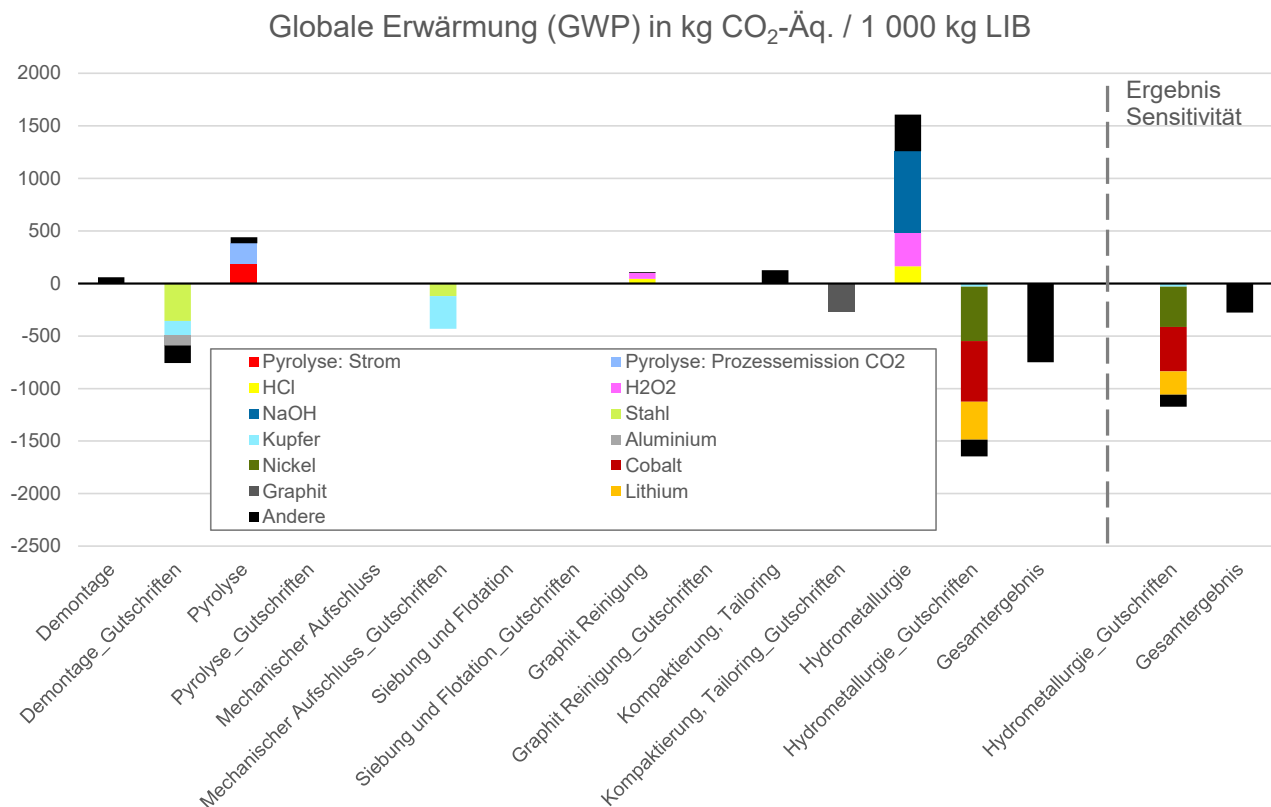
Quelle: eigene Darstellung

Das Ergebnis zeigt, dass eine in diese Richtung veränderte Kathodenchemie mit zusätzlichen Vorteilen für das Mercator-Recyclingverfahren verbunden ist. In dieser Variante werden insgesamt ca. 1.000 kg CO₂-Äq. eingespart. Ursächlich für die Richtung der Ergebnisveränderung ist, dass mit einer Substitution von Mangan deutlich weniger Einsparungen verbunden sind, als mit der Substitution von Nickel.

6.2.2.4 Reduzierte Rückgewinnungsquoten

Auf Basis der Untersuchungen, die im Rahmen der Hydrometallurgie durchgeführt wurden, ließen sich dieser Ökobilanzstudie hohe Rückgewinnungsquoten für wichtige Zielmetalle zugrunde legen, siehe Tabelle 4-2 in Abschnitt 4.1.1. Es ist unklar, ob diese hohen Rückgewinnungsquoten auch bei einer potenziellen zukünftigen großtechnischen Anwendung des Mercator-Recyclingverfahrens zu erzielen sind, u. a. aufgrund einer größeren Varianz der zu recycelnden Batterietypen. Vor diesem Hintergrund zeigt Abbildung 6-4, wie sich die Ergebnisse für die Wirkungskategorie Globale Erwärmung verändern, wenn die hydrometallurgischen Ausbeuten für Nickel, Cobalt bzw. Mangan auf jeweils 70 % und für Lithium auf 50 % reduziert werden.

Abbildung 6-4: Sensitivitätsanalyse: Reduzierte Rückgewinnungsquoten



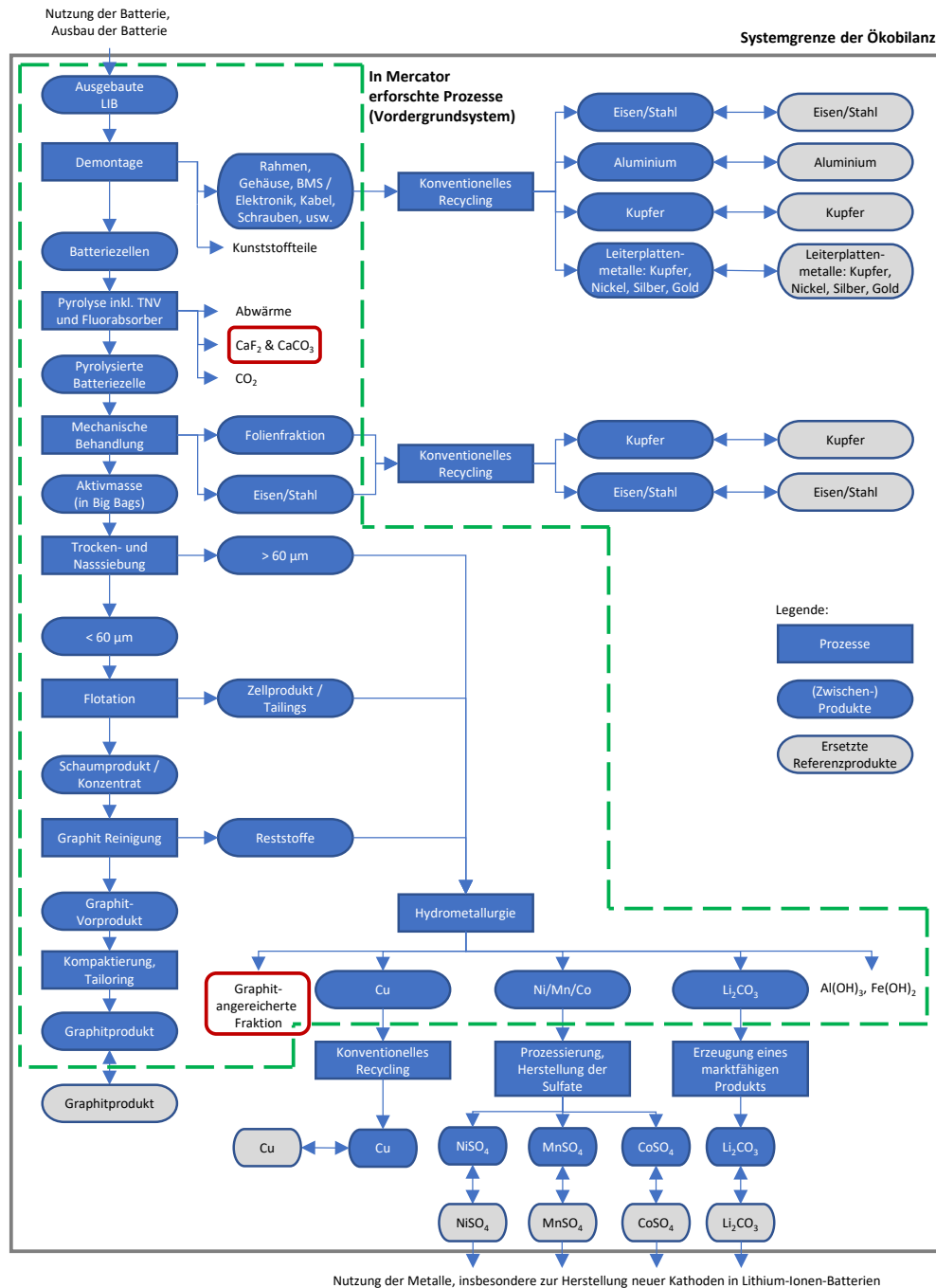
Quelle: eigene Darstellung

Das Ergebnis zeigt, dass sich für den Fall nennenswert reduzierter Rückgewinnungsquoten für Nickel, Cobalt, Mangan bzw. Lithium mit ca. 250 kg CO₂-Äq. nur noch geringe Mengen an Treibhausgasemissionen einsparen lassen. Neben den ökonomischen Anreizen eine möglichst hohe Rückgewinnungsquote zu erzielen, sind entsprechend hohe ökologische Vorteile ebenfalls sehr relevant.

6.2.2.5 Nutzung von Abfallströmen

Es wurden zwei Abfallstoffströme identifiziert, die derzeit ungenutzt bleiben bzw. lediglich in einer Müllverbrennungsanlage thermisch verwertet werden. Erstens die Calcium-haltigen Rückstände der Pyrolyse, d. h. Calciumfluorid und Calciumcarbonat und zweitens die Graphit-angereicherte Stofffraktion, die im Rahmen der Hydrometallurgie abgetrennt wird. Beide Stoffströme sind in Abbildung 6-5 farbig markiert.

Abbildung 6-5: Abfallströme mit potenziell zu optimierender stofflicher Nutzung



Quelle: eigene Darstellung

Pro 1 000 kg zu recycelnde Lithium-Ionen-Batterien fallen als Abfallstrom der Pyrolyse knapp 50 kg des Calciumfluorid-Calciumcarbonat-Gemischs an. Eine potenzielle stoffliche Weiterverwendung dieser Stofffraktion kann darin bestehen, sie als Ausgangsstoff bzw. beizumischenden Rohstoff für die Düngemittelproduktion zu nutzen. Neben den klassischen Düngemittelbestandteilen Stickstoff, Phosphor und Kalium werden auch nennenswerte Mengen an anderen Stoffen, darunter u. a. Magnesium und Calcium, als Düngemittel in der Landwirtschaft eingesetzt. Allein in Deutschland werden jährlich mehrere Hunderttausend Tonnen Calcium in geeigneten Verbindungen in der indus-

triellen Landwirtschaft eingesetzt.⁵ Es wäre ggf. in weiterführenden Analysen zu prüfen, inwiefern eine Nutzung des Calciumfluorid-Calciumcarbonat-Gemischs als Rohstoff für die Düngemittelproduktion erfolgen kann, welche Aufwendungen damit verbunden sind und von welchen Rohstoffen dadurch entsprechend weniger produziert werden muss.

Ein weiterer Ansatzpunkt für die Nutzung des Calciumfluorid-Calciumcarbonat-Gemischs kann darin bestehen, Flussspat zu ersetzen, welches als Rohstoff für die Gewinnung von Fluorwasserstoffsäure sowie verschiedenen Fluoriden eingesetzt wird. In Europa wurden zuletzt Minen zur Gewinnung von Flussspat wiedereröffnet [Lauber 2022]. Auch ist Flussspat laut Europäischer Kommission auch in der aktualisierten Liste der kritischen Rohstoffe aufgeführt [European Commission 2020, European Commission 2023].

Im Rahmen der hydrometallurgische Prozessierung wird eine Graphit-angereicherte Stofffraktion ausgefällt, deren Reinheit mit einem Kohlenstoffgehalt von ca. 40 % deutlich niedriger ist als bei dem Graphit-Vorprodukt, das mit einem Kohlenstoffgehalt von über 95 % im Rahmen der Graphit Reinging gewonnen wird. Aufgrund der geringen Reinheit ist für das Mercator-Recyclingverfahren angesetzt, dass diese Stofffraktion einen Abfallstoffstrom darstellt. Eine potenzielle Nutzung dieser Stofffraktion kann darin bestehen, sie im Kreislauf zu führen und als Input der Flotation zuzuführen, in deren Rahmen ein kohlenstoffreiches Konzentrat abgeschieden wird. Dadurch ließe sich möglicherweise mehr Graphit im Zuge der Kompaktierung / Tailoring als Produkt gewinnen und gleichzeitig würden im Rahmen der abfalltechnischen Behandlung der Graphit-angereicherten Stofffraktion der Hydrometallurgie geringere Kohlenstoffdioxidemissionen verursacht werden. Etwaige Folgeversuche müssten zeigen, inwiefern die Verunreinigungen der Graphit-angereicherten Stofffraktion zu Problemen bei der Prozessierung führen.

6.2.3 Konsistenzprüfung

Dadurch, dass im Vordergrundsystem keine Allokation durchgeführt wird und im Hintergrundsystem überwiegend auf eine dezidierte ecoinvent-Datenbankversion zurückgegriffen wurde, sind die angewendeten Allokationsregeln in sich konsistent.

Die Klassifizierung und Charakterisierung erfolgte für alle untersuchten Prozesse und Produkte einheitlich nach den in Tabelle 3-3 aufgeführten Wirkungsabschätzungsmethoden. Die einzige Abweichung davon stellt der LCI-Datensatz für Cobaltsulfat Heptahydrat dar. Dieser wurde wie in Abschnitt 4.1 dargestellt, mithilfe der auf der Homepage des Cobalt Institutes publizierten LCIA-Ergebnisse abgebildet, deren Wirkungsabschätzungsmethode nicht angegeben ist. Hinzu kommt, dass das LCIA-Ergebnis für die Wirkungskategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch nicht aus dem Datensatz des Cobalt Institutes, sondern aus dem ecoinvent-Datensatz „Market for cobalt sulfate, RoW“ übernommen wurde, da die Wirkungskategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch nicht zu den vom Cobalt Institute ausgewiesenen LCIA-Ergebnissen gehört.

6.3 Schlussfolgerungen, Einschränkungen, Empfehlungen und Ausblick

Schlussfolgerungen

Diese LCA-Studie zum Mercator-Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien für Traktionsanwendungen für Elektrofahrzeuge zeigt bei einem lastenfreien Eingang des Batterieschrotts

⁵ https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/09/PD22_N060_51.html

tendenziell eine ökologische Vorteilhaftigkeit des Recyclingverfahrens im Vergleich zu einer marktüblichen Bereitstellung der entsprechenden Produkte. Pro Tonne zu recycelnden Batterien lassen sich in der untersuchten Standardvariante ca. 750 kg CO₂-Äq. einsparen. Für andere Wirkungskategorien, darunter Versauerung (AP) und Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP), ist das Verhältnis aus zusätzlichen Emissionen bzw. Ressourcenbedarfen aufgrund des Recyclingverfahrens zu den eingesparten Umweltauswirkungen aufgrund vermiedener anderweitiger Produktion deutlicher vorteilhaft.

Größere Vorteile für das Mercator-Recyclingverfahren ergeben sich, wenn die bei der Pyrolyse entstehende Abwärme konsequent genutzt wird anstatt ungenutzt zu entweichen, falls das Batteriegehäuse aus Aluminium anstatt aus Stahl besteht, was im Automobilbereich eher den Standard darstellt oder falls cobalt- und manganärmere und dafür nickelreichere Batterien, beispielsweise NMC 622, recycelt werden. Ein deutlich schlechteres Ergebnis ergibt sich, sofern geringere Rückgewinnungsquoten erzielt werden oder falls der Batterieschrott nicht lastenfrei in das Recyclingsystem eingehen. Insgesamt sprechen die Ökobilanzergebnisse nicht gegen eine Weiterverfolgung bzw. Implementierung der hier untersuchten Prozessroute.

Bei dem Prozessarm zur Gewinnung von Graphit halten sich die ökobilanziellen Vor- und Nachteile ungefähr die Waage. Die Einführung der Prozessschritte Siebung, Flotation, hydrometallurgische Abtrennung von Graphit (Graphit Reinigung) und Kompaktierung / Tailoring bedeutet eine größere Anzahl an Prozessschritten und Komplexität im Vergleich zu einer direkten hydrometallurgischen Behandlung der gesamten Schwarzmasse. Außerdem können durch die steigende Anzahl von Einzelprozessschritten potenziell auch höhere Verluste an den Hauptzielmetallen entstehen. Gleichzeitig wurde gezeigt, dass sich kein Graphit-Produkt erzeugen lässt, das hinsichtlich qualitativer Eigenschaften für die Herstellung neuer Batterien geeignet ist.

Hinsichtlich der Ergebnisse für die Wirkungskategorien Globale Erwärmung (GWP) und Kumulierter Energieaufwand (KEA, gesamt) tragen die Produkte aus der Hydrometallurgie stärker zu den Gutschriften bei als die Produkte aus der Demontage und der Mechanischen Behandlung, was eine Veränderung im Vergleich zu früheren LCA-Studien darstellt. Einerseits lässt sich schlussfolgern, dass aktuelle LCI-Datensätze für eine fundierte Bewertung der Umweltauswirkungen essenziell sind. Andererseits sind auch aus diesem Blickwinkel maximale Rückgewinnungsquoten in der Hydrometallurgie wichtig für ein gutes Ökobilanzergebnis. Nichtsdestotrotz ist der Stellenwert des Recyclings von Stahl, Aluminium und Kupfer über die etablierten Recyclingrouten weiterhin hoch.

Einschränkungen

Es wird darauf hingewiesen, dass die hier vorliegende Ökobilanzstudie wesentlich auf Daten basiert, die im Labormaßstab erfasst wurden. Dies muss bei der Interpretation der Ergebnisse stets angemessen berücksichtigt werden. Es wird empfohlen, eine etwaige Hochskalierung des Recyclingverfahrens auch zukünftig durch eine Umweltanalyse begleiten zu lassen, um frühzeitig Rückschlüsse zu erhalten, falls wichtige Parameter deutlich von den hier zugrundeliegenden Parametern abweichen.

Weiterhin ist eine maßgebliche Randbedingung dieser Studie, dass der Batterieschrott lastenfrei in das untersuchte System eingeht.

Empfehlungen

Insgesamt sprechen die Ökobilanzergebnisse nicht gegen eine Weiterverfolgung bzw. Implementierung der hier untersuchten Prozessroute. Insbesondere die hohen Gesamtrückgewinnungsquoten für Nickel, Cobalt, Mangan und mit Abstrichen Lithium sind ein vielversprechendes Zwischenergebnis. Vor allem die Rückgewinnung von möglichst hochwertigen Graphitprodukten muss in weiteren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten noch weiter optimiert werden.

Für die Weiterentwicklung des Mercator-Recyclingverfahrens wird als Schlussfolgerung aus der Ökobilanz weiterhin empfohlen, die Nutzung von zwei Abfallstoffströmen – dem Calciumfluorid-Calciumcarbonat-Gemisch aus der Pyrolyse sowie dem Graphit-angereicherten Stofffraktion aus der Hydrometallurgie – zu prüfen. Für das Calciumfluorid-Calciumcarbonat-Gemisch sollte eine Verwendung als Rohstoff für die Düngemittelherstellung oder als Ersatz von Flussspat als Rohstoff für die Gewinnung von Fluorprodukten geprüft werden. Hinsichtlich der Graphit-angereicherten Stofffraktion sollte eine Kreislaufführung innerhalb des Mercator-Recyclingverfahrens geprüft werden (beispielsweise als Input der Flotation), um die Gesamtausbeute an Graphitprodukt deutlich zu erhöhen.

Aus Ökobilanzperspektive werden die Bemühungen der Recyclingunternehmen, hohe Rückgewinnungsquoten, insbesondere in der Hydrometallurgie, sowie geringe Energiebedarfe, insbesondere bei der Pyrolyse durch eine effiziente Nutzung der Abwärme, zu erzielen, ausdrücklich unterstützt und bekräftigt, da sich beide Parameter deutlich auf das Ökobilanzergebnis auswirken.

Ausblick

Es existieren mittlerweile zahlreiche Verfahrensvarianten für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Während zu den Zielen dieser Studie ausdrücklich nicht der Vergleich zu anderen Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien gehört, kann sich in den kommenden Jahren eine Situation ergeben, in denen verstärkt nach der ökologisch vorteilhaftesten Verfahrensvariante gefragt wird. Dabei stellt die Ökobilanz grundsätzlich eine adäquate Methode dar, um die Entscheidungsfindung zu unterstützen. Es sollte unter anderem auf funktionale Äquivalenz der unterschiedlichen Verfahren geachtet werden, beispielsweise dass alle Verfahren einen gleichen Produktwarenkorb ermöglichen und auch dass die Behandlung einer gleichen Bandbreite an Batterietypen möglich ist.

Mehrere Unternehmen haben zuletzt öffentlich angekündigt, in Recyclinganlagen für Lithium-Ionen-Batterien zu investieren oder bestimmte Kapazitäten bzw. Routen anzustreben. Dabei wird unter anderem angekündigt, dass Teile der Schwarzmasse in andere Länder (evt. außerhalb Europas) exportiert werden. In etwaigen Folgestudien sollte diese Option berücksichtigt und ggf. in Form eines Szenarios untersucht werden.

In dieser Ökobilanzstudie werden solche Umweltindikatoren untersucht, die sich mithilfe der Ökobilanzmethodik abbilden lassen. Lokale Umweltauswirkungen wie beispielsweise Veränderungen am lokalen Wasserhaushalt lassen sich nicht mit der Ökobilanzmethodik abbilden. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, auch den Umweltverträglichkeitsprüfungen für große konkrete Anlagenplanungen den entsprechenden Stellenwert einzuräumen. Ebenso bleiben im Rahmen dieser Ökobilanzstudie über die Umweltdimension hinausgehende Nachhaltigkeitsaspekte unberücksichtigt.

7 Literaturverzeichnis

- Argonne 2018 Dai et al.: Cobalt Life Cycle Analysis Update for the GREET Model, Argonne National Laboratory, September 2018.
- BMW 2018 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Elektromobilität Baustein einer nachhaltigen klima- und umweltverträglichen Mobilität. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/flyer-elektromobilitaet.pdf?__blob=publicationFile&v=35
- BMWK 2022 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): Elektromobilität in Deutschland. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/elektromobilitaet.html>
- Buchert et al. 2011a Buchert, M.; Jenseit, W.; Merz, C.; Schüler, D. Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LiBRI. Teilprojekt: LCA der Recyclingverfahren. Öko-Institut, Darmstadt, 2011
- Buchert et al. 2011b Buchert, M.; Jenseit, W.; Merz, C.; Schüler, D.: Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec). Öko-Institut, Darmstadt, 2011
- Buchert et al. 2015 Buchert, M.; Sutter, J.: Ökobilanzen zum Recyclingverfahren EcoBatRec für Lithium-Ionen-Batterien. Öko-Institut, Darmstadt, 2015
- Buchert et al. 2016 Buchert, M.; Sutter, J.: Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien (Stand 09/2016). Öko-Institut, Darmstadt, 2016
- CDI 2016 Cobalt Development Institute (CDI) & ERM: The Environmental Performance of Refined Cobalt - Life Cycle Inventory and Life Cycle Assessment of Refined Cobalt - Summary Report, November 2016.
- CI 2023 Cobalt Institute (CI): Life Cycle Assessment. <https://www.cobaltinstitute.org/sustainability/life-cycle-assessment/>, 2023
- CML 2016 Database CML-IA v3.7, Institute of Environmental Sciences, Leiden University, Leiden, January 2016; <http://www.cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>
- ecoinvent v3.8 Ökobilanz-Datenbank ecoinvent v3.8; <http://www.ecoinvent.org>
- Ekvall et al. 2020 Ekvall, Thomas et al.: Modeling recycling in life cycle assessment, Report number: 2020:05, May 2020 — Gothenburg, Sweden, Swedish Life Cycle Center, 2020.
- European Commission 2013 Commission Recommendation on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of the product and organizations. Annex II: Product Environmental Footprint (PEF) Guide to Commission Recommendation on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of the products and organizations. Official Journal of the European Union Volume 56, L 124, 4.5.2013.
- European Commission 2020 European Commission: Study on the EU's list of Critical Raw Materials – Final Report. Gian Andrea Blengini, Cynthia EL Latunussa, Umberto Eynard, Cristina Torres de Matos, Dominic Wittmer, Konstantinos Georgitzikis, Claudiu Pavel, Samuel Carrara, Lucia Mancini, Manuela Unguru, Darina Blagoeva, Fabrice Mathieux, David Pennington, [https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42883/attachments/1/translations/en/renditions/native, 2020](https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42883/attachments/1/translations/en/renditions/native,2020)
- European Commission 2021 European Commission: EMPFEHLUNG (EU) 2021/2279 DER KOMMISSION vom 15. Dezember 2021 zur Anwendung der Methoden für die Berechnung des Umweltfußabdrucks zur Messung und Offenlegung der Umweltleistung von Produkten und Organisationen entlang ihres Lebenswegs, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021H2279>, 2021.

European Commission 2023	European Commission: Study on the Critical Raw Materials for the EU– Final Report. Milan Grohol, Constanze Veeh, https://single-market-economy.ec.europa.eu/system/files/2023-03/Study%202023%20CRM%20Assessment.pdf
GBA 2023	Global Battery Alliance: Greenhouse Gas Rulebook. Generic Rules – Version 1.5. https://www.globalbattery.org/media/publications/gba-rulebook-v1.5.pdf , 2023.
ILCD 2010	ILCD-Handbook: General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance; European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability; 1st Edition.
IPCC 2013	Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, pp. 659–740.
ISO 14040	DIN EN ISO 14040:2009-11. Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006
ISO 14044	DIN EN ISO 14044:2018-05. Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018
JRC 2023	JRC: Harmonised rules for the calculation of the Carbon Footprint of Electric Vehicle Batteries (CFB-EV), https://eplca.jrc.ec.europa.eu/GRB-CBF_CarbonFootprintRules-EV.pdf , 2023
Kallitsis et al. 2022	Kallitsis et al.: Life cycle assessment of recycling options for automotive Li-ion battery packs, Journal of Cleaner Production, Volume 371, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133636 , 2022
Klöpffer 2009	Klöpffer, W.; Grahl, B.: Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf; Wiley-VCH, Weinheim, 2009
Lauber 2022	Lauber, P.: Pforzheims "neues Gold"? Riesige Mengen Flussspat im Würmtal vermutet, https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/karlsruhe/pforzheims-neues-gold-riesige-mengen-flussspat-im-wuertal-vermutet-100.html
Mohr et al. 2020	Mohr et al.: Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes, Journal of Industrial Ecology, Vol. 24, https://doi.org/10.1111/jiec.13021 , 2020
Rajaeifar et al. 2021	Rajaeifar et al.: Life cycle assessment of lithium-ion battery recycling using pyrometallurgical technologies, Journal of Industrial Ecology, Vol. 25, https://doi.org/10.1111/jiec.13157 , 2021
RECHARGE 2021	RECHARGE: PEFCR - Product Environmental Footprint Category Rules for High Specific Energy Rechargeable Batteries for Mobile Applications, published: February 2020 (initially published February 2018), Version: 1.116, Time of validity: 31 December 2021, https://wayback.archive-it.org/org-1495/20221006222329mp/https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgrp/pdf/PEFCR_Batteries_Feb%202020-2.pdf , 2021
ReCiPe 2016	ReCiPe: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization. RIVM Report 2016-0104. National Institute for Human Health and the Environment, Bilthoven, 2016
Systemic et al. 2023a	Systemic et al.: Battery Carbon Footprint: Rules for calculating the Carbon Footprint of the 'Distribution' and 'End-of-life and recycling' life cycle stage. Version 1.0. April 2023. https://thebatteryass.eu/assets/images/content-guidance/pdf/2023_Battery_Passport_Carbon_Footprint_Rules.pdf , 2023

- Systemic et al. 2023b Systemic et al.: Comparison of end-of-life allocation approaches: An analysis complementing the Battery Pass Rules for calculating the Carbon Footprint of the 'End-of-life and recycling' life cycle stage Version 1.0. April 2023. https://thebatterypass.eu/assets/images/content-guidance/pdf/2023_Battery_Passport_EOL_Analysis.pdf, 2023
- Tucki et al. 2020 Tucki, K.; Orynycz, O.; Mitoraj-Wojtanek, M.: Perspectives for Mitigation of CO₂ Emission due to Development of Electromobility in Several Countries. *Energies* 2020, 13, 4127. <https://doi.org/10.3390/en13164127>
- UBA 1995 *Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen – Wirkungsbilanz und Bewertung*. Umweltbundesamt; Gesellschaft für Consulting und Analytik im Umweltbereich (C.A.U.); ifeu. Umweltbundesamt Texte, 23/95.
- UBA 2002 Ökobilanzen für Getränkeverpackungen II/Phase 2, ifeu. Umweltbundesamt Texte 51/02. Berlin 2002
- Wernet 2016 Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B.: The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* volume 21, pages 1218–1230.

8 Anhang 1: Verwendete LCI-Datensätze

Tabelle 8-1: Verwendete LCI-Datensätze

Datensatz	Quelle	Erläuterung / Verwendung
Treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at remelter	ecoinvent v3.8	Recycling der abgetrennten Aluminiumfraktion zur Erzeugung eines marktfähigen Aluminium-Sekundärprodukts
Market for aluminium, cast alloy, GLO	ecoinvent v3.8	Referenzprodukt für Aluminium, Mix aus Primär- und Sekundäraluminium
Treatment of copper scrap by electrolytic refining, RoW	ecoinvent v3.8	Recycling der abgetrennten Kupferfraktionen zur Erzeugung von marktfähigen Kupfer-Sekundärprodukten
Market for copper, cathode, GLO	ecoinvent v3.8	Referenzprodukt für Kupfer, Mix aus Primär- und Sekundärkupfer
Steel production, electric, low-alloyed, CA-QC	ecoinvent v3.8	Recycling der abgetrennten Stahlfractionen zur Erzeugung von marktfähigen Stahl-Sekundärprodukten
Steel production, low-alloyed, hot rolled, RER	ecoinvent v3.8	Referenzprodukt für Stahl, Mix aus Primär- und Sekundärstahl
Nickel (Class 1, >99.8% Nickel), GLO	Nickel Institute	Referenzprodukt für Nickel, das durch das Recycling der Elektronikschrottfraction erhalten wird.
Market for silver, GLO	ecoinvent v 3.8	Referenzprodukt für Silber, das durch das Recycling der Elektronikschrottfraction erhalten wird.
Market for gold, GLO	ecoinvent v 3.8	Referenzprodukt für Gold, das durch das Recycling der Elektronikschrottfraction erhalten wird.
Market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state, RER	ecoinvent v 3.8	Betriebsmittel des Mercatorverfahrens
Market for hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state, RER	ecoinvent v 3.8	Betriebsmittel des Mercatorverfahrens
Market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state, GLO	ecoinvent v 3.8	Betriebsmittel des Mercatorverfahrens
Tap water production, conventional treatment, Europe without Switzerland	ecoinvent v 3.8	Betriebsmittel des Mercatorverfahrens
Market for quicklime, milled, RER	ecoinvent v 3.8	Betriebsmittel des Mercatorverfahrens
Market for iron sulfate, RER	ecoinvent v 3.8	Betriebsmittel des Mercatorverfahrens
Market for sulfuric acid, RER	ecoinvent v 3.8	Betriebsmittel des Mercatorverfahrens bzw. benötigte Chemikalie zur Erzeugung von marktfähigen Metallsulfaten
Polyethylene, LDPE, granulate, EU-28	PlasticsEurope	Betriebsmittel des Mercatorverfahrens

Datensatz	Quelle	Erläuterung / Verwendung
Polypropylene, PP, granulate, EU-28	PlasticsEurope	Betriebsmittel des Mercatorverfahrens
Market for electricity, medium voltage, DE	ecoinvent v 3.8	
Market for heat, from steam, in chemical industry, RER	ecoinvent v 3.8	Referenzprodukt für nutzbare Hochtemperaturabwärme, siehe Abschnitt 6.2.2.1
Market for diesel, Europe without Switzerland	ecoinvent v 3.8	
Transport, freight, lorry, 7.5 – 16 metric ton, EURO 5, RER	ecoinvent v 3.8	
Transport, freight, lorry, > 32 metric ton, EURO 5, RER	ecoinvent v 3.8	
Nickel sulphate hexahydrate ($\text{NiSO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$), GLO	Nickel Institute	Referenzprodukt für Nickelsulfat bzw. für Nickelsulfat-Hexahydrat
Market for manganese, GLO	ecoinvent v 3.8	Referenzprodukt für Mangan
Cobalt Sulphate Heptahydrate ($\text{CoSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$)	Cobalt Institute	Referenzprodukt für Cobaltsulfat
Market for lithium carbonate, GLO	ecoinvent v 3.8	Referenzprodukt für Lithiumcarbonat
Market for synthetic graphite, battery grade, CN	ecoinvent v 3.8	Referenzprodukt für Graphitprodukt. Aktuelle Datensätze für Nicht-Batterie-Anwendungen sind nicht verfügbar.

Quelle: eigene Darstellung

CA-QC: Canada Québec; CN: China; DE: Deutschland; EFTA: European Free Trade Association; GLO: Global; RER: Europa; RoW: Rest of World

9 Anhang 2: Externes kritisches Gutachten

Kritische Prüfung der Studie

ÖKOBILANZ FÜR DAS MERCATOR VERFAHREN ZUM RECYCLING VON LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

Auftraggeber: Öko-Institut e.V., Darmstadt
mit Förderung durch das
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz,
Berlin

Prüfer: Prof. Dr. Matthias Finkbeiner, Berlin

Normbezug: DIN EN SO 14040 (2006): Umweltmanagement –
Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen
DIN EN ISO 14044 (2006): Umweltmanagement –
Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen
ISO TS 14071 (2014):
Environmental management - Life cycle
assessment - Critical review processes and
reviewer competencies: Additional requirements
and guidelines to ISO 14044:2006

Inhalt und Umfang der Kritischen Prüfung

Der Prüfer und das Prüfungsverfahren sollen feststellen, ob:

- die bei der Durchführung der Ökobilanz angewendeten Methoden mit den internationalen Normen ISO 14040 und ISO 14044 übereinstimmen;
- die bei der Durchführung der Ökobilanz angewendeten Methoden wissenschaftlich begründet und technisch gültig sind;
- die verwendeten Daten in Bezug auf das Ziel der Studie hinreichend und zweckmäßig sind;
- die Auswertungen die erkannten Einschränkungen und das Ziel der Studie berücksichtigen und
- der Bericht transparent und in sich stimmig ist.

Die Kritische Prüfung wurde gemäß Abschnitt 6.2 der ISO 14044 als Prüfung durch einen externen, unabhängigen Sachverständigen vorgenommen, da diese Ökobilanz-Studie nicht als Grundlage für zur Veröffentlichung vorgesehene vergleichende Aussagen bestimmt ist.

Dieser Prüfungsbericht gilt ausschließlich für den Abschlußbericht der Studie in der am 07.06.2023 vorgelegten Fassung.

Die Prüfung und Verifizierung einzelner Daten und Datensätze sowie des Ökobilanzmodells war nicht Teil des Prüfungsumfanges.

Prüfungsverfahren

Das Prüfungsverfahren wurde zwischen dem Öko-Institut als Ersteller der Ökobilanz und dem externen Sachverständigen koordiniert. Das Prüfungsverfahren fand nach Abschluss der Durchführung der Ökobilanz statt. Der erste Schritt der Prüfung auf Normkonformität war die Vorlage des ersten Entwurfes des Abschlußberichtes der Studie am 17. Mai 2023.

Der Sachverständige hat den Bericht umfassend analysiert und auf Normkonformität geprüft. Die Prüfung ergab insgesamt 49 Hinweise genereller, technischer und redaktioneller Art, die dem Auftraggeber am 26. Mai 2023 übermittelt wurden. Der zweite, überarbeitete Entwurf des Berichtes wurde dem Prüfer am 07. Juni 2023 übermittelt. Am 14. Juni 2023 wurde ein Webmeeting durchgeführt, bei dem die Implementierung der Kommentare besprochen wurde.

Die Prüfung des zweiten Entwurfes ergab, dass die Prüfhinweise konstruktiv und umfassend berücksichtigt wurden. Es war lediglich ein weiterer Hinweis mit redaktionellem Charakter notwendig.

Der Sachverständige bedankt sich für den uneingeschränkten Zugang zu allen nachgefragten Informationen sowie die offene und konstruktive Haltung während des gesamten Prüfungsverfahrens.

Bewertung

Die Ökobilanz dient zur projektbegleitenden Bewertung des im Vorhaben „Material Effizientes Recycling für die Circular Economy von Automobilspeichern durch Technologie ohne Reststoffe – MERCATOR“ entwickelten Recyclingverfahrens von Hochvoltbatterien.

Die funktionelle Einheit und der Referenzfluss sind das Recycling von 1000 kg Lithium-Ionen-Batterien des Typs NMC 111 für die Anwendung in Automobilen. Weitere Varianten, wie z.B. NMC 811, wurden in Form einer Sensitivitätsanalyse untersucht.

Die vorgelegten Ergebnisse gelten nur unter der Annahme, dass die Batterien ökologisch lastenfrei in die Bilanz eingehen. Alternative End-of-Life-Allokationsansätze wurden nicht untersucht.

Es wird transparent darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse unter dem Vorbehalt bewertet werden müssen, dass die Sachbilanzdaten teilweise aus Laboruntersuchungen der Projektpartner stammen.

Die verwendeten Methoden und die Modellierung des Produktsystems sind geeignet, die in der Studie formulierten Ziele zu erfüllen. Der Bericht ist umfassend und beschreibt den Untersuchungsrahmen der Studie in transparenter Weise.

Ergebnis

Die Ökobilanz wurde in Übereinstimmung mit ISO 14040 and ISO 14044 erstellt.



Matthias Finkbeiner

19. Juni 2023