

Ökobilanz für das LIBERATION Verfahren zum Recycling von Folienausschüssen bei der Produktion von Lithium-Ionen Batterien

Abschlussbericht

Vorhaben FKZ 16BZF348D: LIBERATION –
Lösungsbasierte Liberalisierung und Reintegration
funktionaler Batteriematerialien aus Produktions-
ausschüssen der Zellfertigung,

gefördert durch das
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
im Rahmen des Förderaufrufs „Forschung in der
Schwerpunktförderung Batteriezellfertigung“

Darmstadt,
16. September 2026

Überarbeitete Fassung
V1.3

Studie des Öko-Instituts e.V.

Autoren

Dr. Matthias Buchert
Dr. Johannes Klinge
Hannah Bachmann
Tobias Wagner
Öko-Institut e.V.

Öko-Institut e.V.

info@oeko.de
oeko.de

Büro Freiburg

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

1	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	5
1.1	Festlegung des Ziels	5
1.2	Festlegung des Untersuchungsrahmens	5
1.2.1	Beschreibung des Produktsystems und der Systemgrenzen	5
1.2.2	Untersuchte Folienausschüsse	8
1.2.3	Funktionelle Einheit und Referenzfluss	9
1.2.4	Abschneidekriterien	9
1.2.5	Produkte und Referenzprodukte	10
1.2.6	Allokation und End-of-Life Modellierung	12
1.2.7	Anforderungen an die Datenqualität	13
1.2.8	Wirkungskategorien	13
1.2.9	Methoden der Auswertung	15
1.2.10	Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts	15
1.2.11	ISO-Konformität und kritische Prüfung	15
2	Sachbilanz	16
2.1	Datenerhebung: Vordergrundsystem	16
2.2	Datenerhebung: Hintergrundsystem	18
2.3	Technologische, geographische und zeitliche Repräsentativität	18
2.4	Datenqualität	19
3	Wirkungsabschätzung	21
3.1	Kathodenfolienausschuss	21
3.1.1	Globale Erwärmung	21
3.1.2	Abiotischer Ressourcenverbrauch	23
3.1.3	Versauerung (terrestrisch)	25
3.1.4	Eutrophierung (terrestrisch)	27
3.1.5	Photochemische Ozonbildung	28
3.1.6	Weitere Wirkungskategorien	29
3.2	Anodenfolienausschuss	30
3.2.1	Globale Erwärmung	30
3.2.2	Abiotischer Ressourcenverbrauch	31
3.2.3	Versauerung (terrestrisch)	33
3.2.4	Eutrophierung (terrestrisch)	35

3.2.5	Photochemische Ozonbildung	36
3.2.6	Weitere Wirkungskategorien	37
4	Auswertung	38
4.1	Identifizierung der signifikanten Parameter	38
4.2	Beurteilung	39
4.2.1	Vollständigkeitsprüfung	39
4.2.2	Sensitivitätsprüfung	39
4.2.2.1	„Perspektivische“ stoffliche Zusammensetzung der Folienausschüsse	39
4.2.2.2	Keine Anpassung auf industriellen Maßstab	43
4.2.2.3	Datensatz Graphit	45
4.2.3	Konsistenzprüfung	46
4.3	Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen	47
4.3.1	Schlussfolgerungen	47
4.3.2	Einschränkungen	49
4.3.3	Empfehlungen	49
5	Literaturverzeichnis	51
	Anhang	53
	Anhang I. Verwendete Sachbilanzdatensätze	53
	Anhang II. Ökobilanzergebnisse für alle berechneten Wirkungskategorien	55
	Anhang III. Externes kritisches Gutachten	58

1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

1.1 Festlegung des Ziels

Bei der Produktion von Lithium-Ionen-Batteriezellen fällt in der Regel auch Kathodenfolien- bzw. Anodenfolienausschuss an. Es wird davon ausgegangen, dass die Zellproduktion für Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland in den nächsten Jahren stark ansteigen wird. Dadurch gewinnt auch der Umgang mit den Folienausschüssen an Relevanz.

Die vorliegende Ökobilanzstudie ist Teil des vom BMWF geförderten Verbundvorhabens „LIBERATION – Lösungsbasierte Liberalisierung und Reintegration funktionaler Batteriematerialien aus Produktionsausschüssen der Zellfertigung“. Das Gesamtvorhaben wurde in den Jahren 2023 bis 2026 unter der Konsortialführung der Accurec Recycling GmbH mit den Verbundpartnern Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV), CTG GmbH und Öko-Institut e. V. durchgeführt. Das Öko-Institut war im Rahmen des Projektverbundes für die Konzeption und Realisierung der Ökobilanzarbeiten verantwortlich, die begleitend zu den Forschungsarbeiten der Partner durchgeführt wurden und im vorliegenden Bericht dokumentiert sind.

Diese Ökobilanz nach der DIN EN ISO Norm 14040/14044 repräsentiert ein Element in der Bewertung der im Rahmen des Liberation-Projektes entwickelten und untersuchten Prozessrouten zum Recycling von Kathoden- bzw. Anodenfolienausschüssen. Den beteiligten Partnern des Verbundvorhabens Liberation sollen damit detaillierte Informationen bzgl. den ökologischen Vorteilen 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 der Recyclingprozesse bzw. einzelner Prozessmodule aufzuzeigen. Damit soll die Voraussetzung für spätere Optimierungen der Recyclingprozesse in der industriellen Praxis sichergestellt werden.

Es ist ausdrücklich nicht Ziel der Studie, die im Rahmen des Liberation-Projekts entwickelten Recyclingrouten für Kathoden- bzw. Anodenfolienausschüsse mit anderen Recyclingrouten zu vergleichen. Die vorliegende Studie stellt in diesem Sinne keine vergleichende Ökobilanz dar. Entsprechend sind die Ergebnisse der Studie nur auf die Recyclingverfahren, welche im Rahmen von Liberation entwickelt wurden, anzuwenden. Die Umweltlasten, die mit dem Recycling verbunden sind, werden im Zusammenhang mit einer marktüblichen Bereitstellung der potenziell zu ersetzenden Materialien betrachtet.

Die wichtigste Zielgruppe für die Ökobilanzstudie sind die Verbundpartner des Liberation-Projektes selbst. Für die Liberation-Verbundpartner sind die Teilergebnisse für die einzelnen Module der Recyclingverfahren ebenso interessant wie die Gesamtergebnisse. Weiterhin ist die Identifizierung möglicher ökologischer Optimierungspotenziale bzgl. der Recyclingprozesse von elementarer Bedeutung. Eine weitere Zielgruppe der Studie ist neben dem fördernden BMWF die interessierte Fachöffentlichkeit. Dieser Ökobilanzbericht wird nach der kritischen Prüfung veröffentlicht.

1.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens

1.2.1 Beschreibung des Produktsystems und der Systemgrenzen

Kathoden- bzw. Anodenfolien sind zentrale Bestandteile von Lithium-Ionen-Batterien. Sowohl Kathoden- als auch Anodenfolien bestehen im Wesentlichen aus vier Komponenten: einer

Trägerfolie (Aluminium bzw. Kupfer), dem Aktivmaterial (z. B. $\text{LiNi}_{0,6}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{0,2}\text{O}_2$ bzw. Graphit), Leitruf (Carbon Black) sowie einem Binder (die genaue angesetzte stoffliche Zusammensetzung des Kathoden- bzw. Anodenfolienausschusses ist in Kapitel 1.2.2 aufgeführt). Der Binder erschwert beim Recycling die Trennung der Folienausschüsse in ihre Hauptkomponenten – Aluminium und Kathodenaktivmaterial bzw. Kupfer und Graphit – und damit deren hochwertige stoffliche Rückgewinnung. Der Kernansatz des Liberation-Projekts besteht darin, die Aktivmaterialien vom Binder und den Trägerfolien zu „liberalisieren“, um so ein höherwertiges Recycling der Folienausschüsse zu ermöglichen. Ziel ist, die Wertstoffe erneut in hochwertigen Nutzungen wie beispielsweise in Lithium-Ionen-Batterien einzusetzen. Dadurch soll eine Substitution der marktüblichen Materialbereitstellung ermöglicht werden.

Es wird davon ausgegangen, dass der Kathodenfolienausschuss und der Anodenfolienausschuss separat voneinander anfallen und separat voneinander prozessiert werden. Die Erkenntnisse zu den ökologischen Vor- und Nachteilen der Recyclingverfahren für den Kathoden- bzw. Anodenfolienausschuss lassen sich am besten nachvollziehen, indem sie ebenfalls separat voneinander berechnet und dargestellt werden. Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen dieser Ökobilanz zwei Produktsysteme untersucht: eins für das Recycling von Kathodenfolienausschuss und eins für das Recycling von Anodenfolienausschuss. Im Rahmen der Erstellung dieser Ökobilanz wurde in Erwägung gezogen, das Recycling beider Ströme in typischen Mengenverhältnissen abzubilden und in einem Produktsystem zu kombinieren. Dieser Ansatz wurde allerdings als nicht zielführend verworfen.

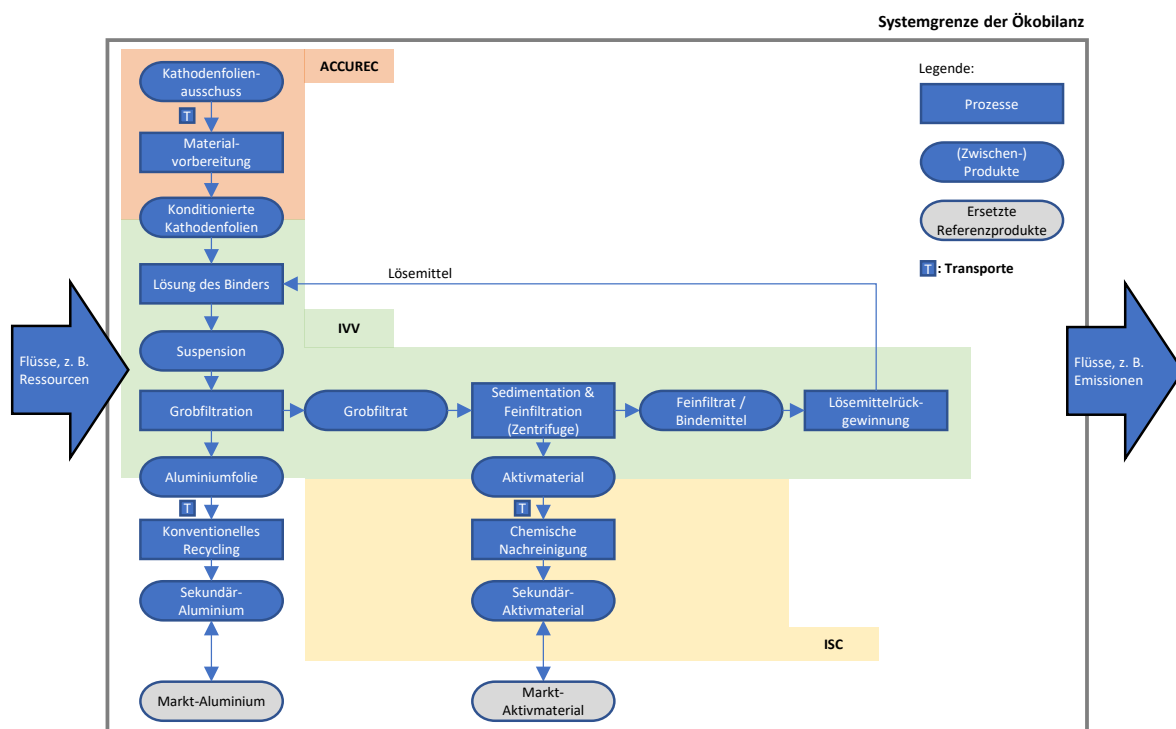
Vor diesem Hintergrund stellen Abbildung 1-1 und Abbildung 1-2 die untersuchten Produktsysteme und die festgelegten Systemgrenzen dar. Die Prozessschritte, an denen die jeweiligen Projektpartner in Liberation geforscht haben und zu denen primäre Daten vorliegen, sind in den Produktsystemen in unterschiedlichen Farben markiert. Zusammengenommen bilden die farblich hinterlegten Prozesse das jeweilige Vordergrundsystem. Beide Folienausschüsse fallen in einer Zelfabrik an und der erste Schritt besteht jeweils darin, dass sie zum Recyclingstandort transportiert werden.

Kathodenfolienausschuss

Am Recyclingstandort wird der Kathodenfolienausschuss (Abbildung 1-1) zunächst vorbereitet. Anschließend wird der Binder mithilfe eines innovativen Lösemittels des Fraunhofer IVV gelöst. Dadurch können die Aluminiumfolie und das Kathodenaktivmaterial inklusive Leitruf voneinander getrennt werden. Der Binder wird abgeschieden. Eine Rückgewinnung des Binders als Wertmaterial wurde vom Fraunhofer IVV erwogen, allerdings verworfen, insbesondere da eine Rückgewinnung mit nennenswertem Energieaufwand verbunden wäre (siehe Kapitel 1.2.5, unterhalb von Tabelle 1-4). Der Binder wird im Standardfall stattdessen als Abfall behandelt. Eine Kreislaufführung des Lösemittels war auf der Multi-Purpose-Anlage des Fraunhofer IVV nicht möglich, wird im größeren Maßstab allerdings als problemlos umsetzbar eingeschätzt. Dabei ließe sich die Menge des einzusetzenden Lösemittels laut Schätzungen des Fraunhofer IVV im Vergleich zu den auf der Multi-Purpose-Anlage gemessenen Verbräuchen etwa um einen Faktor 10 reduzieren (siehe Kapitel 2.1 und Tabelle 2-1). Das abgetrennte Aluminium kann über konventionelles Aluminiumrecycling in ein marktfähiges Produkt aufbereitet werden. Das Kathodenaktivmaterial soll grundsätzlich für einen Einsatz in neuen Batterien geeignet sein, ohne dass es in die chemischen Elemente (Li, Ni, Co, Mn) aufgetrennt wird. Im Rahmen des Liberation-Projekts konnte lediglich eine Probe des Kathodenaktivmaterials hinsichtlich der Qualität bzw. Eignung für den Einsatz in einer neuen Batterie getestet werden. Das Ergebnis blieb hinter den Erwartungen zurück, da unter anderem die

Entladekapazität im Vergleich zu einer neuen Batterie desselben Typs deutlich geringer war. Die Repräsentativität und Aussagekraft des Ergebnisses zu dieser Einzelprobe werden allerdings als gering eingeschätzt, unter anderem da nachträgliche Untersuchungen drauf hindeuten, dass bereits das eingesetzte Ausgangsmaterial nicht der Qualität entsprach, welche das für den direkten Vergleich herangezogene Referenzmaterial aufwies. Insbesondere zeigte das eingesetzte Aktivmasse-Rezyklat eine fragmentierte Partikelmorphologie, die bereits im Ausgangsmaterial vorlag, während als Referenzmaterial Aktivmasse mit sphärischer Partikelmorphologie untersucht wurde. Aufgrund fehlender weiterer Proben basiert die Bewertung auf den vorliegenden Versuchsergebnissen zu der Einzelprobe, was die Aussagekraft hinsichtlich der Eignung des dargestellten Recyclingprozesses für die Rückgewinnung batterietauglicher Aktivmaterialien einschränkt. Das Fraunhofer ISC hatte im Unterauftrag des Fraunhofer IVV das Kathodenaktivmaterial untersucht und Testzellen hergestellt. Aufgrund der schwachen Leistung der Testzellen führte das Fraunhofer ISC zusätzlich eine Nachreinigung an einer 7 Gramm Probe des Aktivmaterials durch. Dadurch verbesserte sich die Leistung der Testzellen geringfügig. Mit der aktuellen Performanz ist es noch unwahrscheinlich, dass das recycelte Kathodenaktivmaterial als Beimischung zu primärem Material in der Batterieproduktion verwendet wird. Es wird aber davon ausgegangen, dass durch eine weitere Verfahrensoptimierung die Qualität so weit verbessert werden kann, dass künftig ein marktfähiges Rezyklat zurückgewonnen werden kann, das marktübliches, primäres Kathodenaktivmaterial ersetzt.

Abbildung 1-1: Untersuchtes Produktsystem: Kathodenfolienausschuss



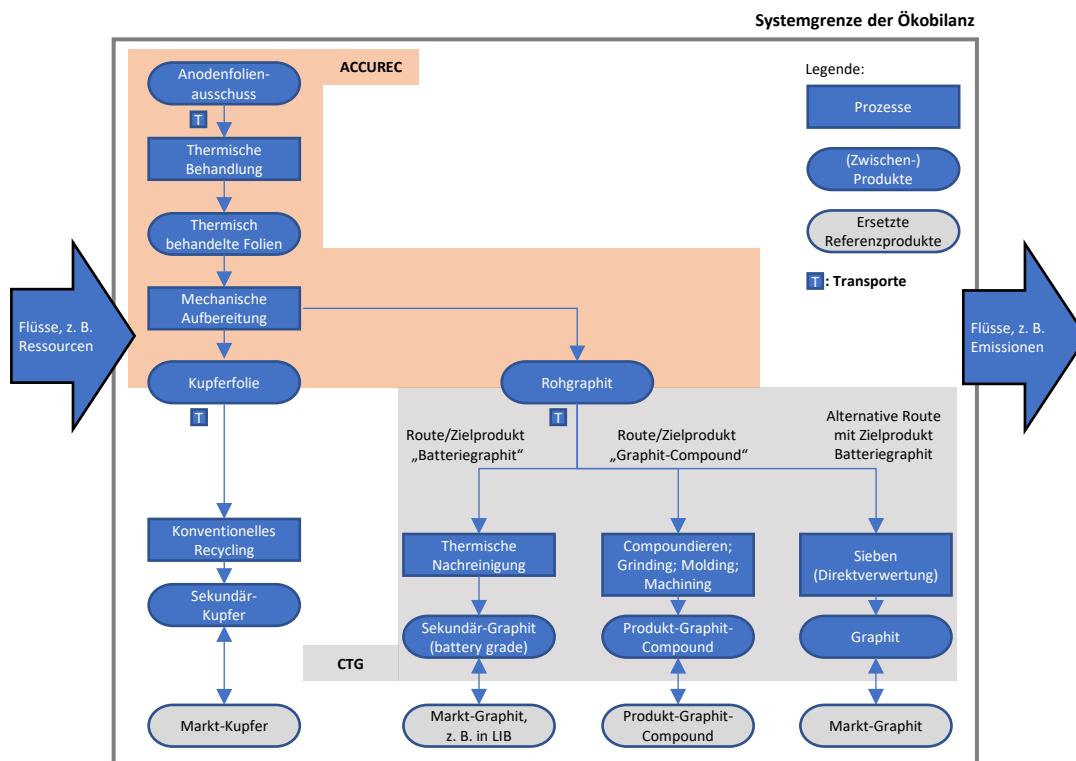
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Anodenfolienausschuss

Für den Anodenfolienausschuss (Abbildung 1-2) war ursprünglich geplant, den Binder durch intensives Auswaschen mit Wasser zu lösen. Diese Route erwies sich allerdings als nicht

praktikabel. Stattdessen wurde von Accurec eine thermische Behandlung des Anodenfolienausschusses durchgeführt. Anschließend wurde der thermisch behandelte Anodenfolienausschuss mechanisch so aufbereitet, dass Kupfer und Graphit voneinander separiert werden können. Das Kupfer kann anschließend über konventionelles Kupferrecycling in ein marktfähiges Produkt aufbereitet werden. Der Graphit wurde von CTG prozessiert. Dabei lagen zwei potenzielle Marktanwendungen im Fokus: einerseits der Einsatz des Graphits bei der Produktion neuer Batterien (Route/Zielprodukt „Batteriegraphit“); andererseits als Produkt-Graphit-Compound (mit ca. 10 % zugemischtem Polypropylenanteil) in z. B. Bipolarplatten (Route/Zielprodukt „Graphit-Compound“). Je nach Intensität der Reinigung sind die Ergebnisse für den Recyclinggraphit gut bis sehr gut (ähnliche Performanz wie Graphit aus primärer Herstellungsrouten).

Abbildung 1-2: Untersuchtes Produktsystem: Anodenfolienausschuss



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Eine Übersicht über die erzeugten Produkte und die ersetzten Marktprodukte liegt in Kapitel 1.2.5 vor. Eine mögliche Herstellung neuer Batterien mit den recycelten Materialien ist nicht Teil des untersuchten Produktsystems. Ebenso ist der Herstellungsprozess, im Rahmen dessen die Folienausschüsse anfallen, nicht Teil des untersuchten Produktsystems.

1.2.2 Untersuchte Folienausschüsse

In Liberation wurden NMC 622 Folienausschüsse untersucht. Die stoffliche Zusammensetzung der untersuchten Folienausschüsse ist in Tabelle 1-1 und Tabelle 1-2 aufgeführt. Zum Zeitpunkt der Durchführung der Versuche wurde NMC 622 als die repräsentativste Batteriechemie angesehen, die auch den größten Anteil am bei Accurec eingehenden Batterieschrott darstellte. NMC 622 Batterien folgen im Vergleich zu NMC 111 oder 532-Batterien dem Trend zu nickelhaltigeren und cobalt- und manganärmeren NMC-Chemien. Mittlerweile werden eher NMC 811 oder 955-Batterien

hergestellt. Diese NMC-Ausgestaltungen wurden in Liberation ebenso wie LFP-Batterien nicht untersucht (siehe Kapitel 4.3).

Bei neueren Batterien geht der Trend dahin, den Anteil des Aktivmaterials zu erhöhen, sodass sich der Aluminium- bzw. Kupferanteil entsprechend reduziert. Eine Sensitivitätsanalyse dazu ist in Kapitel 4.2.2.1 beschrieben.

Tabelle 1-1: Stoffliche Zusammensetzung des Kathodenfolienausschusses

Stoff	Materialanteil
Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC) 622 (inklusive Leitruf)	48,5 %
Aluminium	48,5 %
Binder (Polyvinylidenfluorid, PVDF)	3,0 %

Quelle: Öko-Institut e.V. auf Basis von Angaben des Fraunhofer IVV und der Accurec Recycling GmbH

Tabelle 1-2: Stoffliche Zusammensetzung des Anodenfolienausschusses

Stoff	Materialanteil
Graphit	55 %
Kupfer	40 %
Binder (Natrium-Carboxymethylcellulose (Na-CMC), Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR))	5 %

Quelle: Öko-Institut e.V. auf Basis von Angaben der Accurec Recycling GmbH

1.2.3 Funktionelle Einheit und Referenzfluss

Die funktionelle Einheit (FE) und der Referenzfluss der Ökobilanz für das Recycling des Kathodenfolienausschusses nach dem Liberation-Verfahren sind das Recycling von 1 000 Kilogramm Kathodenfolienausschuss mit NMC 622 Aktivmaterial (stoffliche Zusammensetzung siehe Tabelle 1-1).

Die funktionelle Einheit und der Referenzfluss der Ökobilanz für das Recycling des Anodenfolienausschusses nach dem Liberation-Verfahren sind das Recycling von 1 000 Kilogramm Anodenfolienausschuss (stoffliche Zusammensetzung siehe Tabelle 1-2).

1.2.4 Abschneidekriterien

Für das Vordergrundsystem bzw. die Primärdaten wurden keine allgemeinen Abschneidekriterien angewendet, die zum Ausschluss bestimmter Stoffflüsse aus der Sachbilanz anhand von Relevanzkriterien (z. B. Anteil eines bestimmten Stoffflusses am Eingangsmaterial ist kleiner als 5 %) führen würden.

Der Herstellungsprozess, im Rahmen dessen die Folienausschüsse anfallen, ist nicht Teil des untersuchten Produktsystems. Im Vordergrundsystem bzw. bei den Primärdaten ist Infrastruktur wie Gebäude, Behälter usw. ebenfalls nicht erfasst, da die Beeinflussbarkeit dieser Aspekte in vielen Fällen gering ist und da sie für die laufenden Produktions-/Recyclingprozesse von begrenzter Relevanz sind.

Die Abschneidekriterien, die den Sachbilanzdatensätzen, die der ecoinvent-Datenbank entnommen wurden, zugrunde liegen, sind in Wernet et al. (2016) dokumentiert.

1.2.5 Produkte und Referenzprodukte

In Tabelle 1-3 sind die Recyclingprodukte aus der Behandlung des Kathodenfolienausschusses aufgelistet. Die Recyclingprodukte aus der Behandlung des Anodenfolienausschusses sind in Tabelle 1-4 (Route/Zielprodukt „Batteriegraphit“) und Eine Rückgewinnung des Binders ist bei der hier untersuchten Recyclingroute des Anodenfolienausschusses ausgeschlossen, da er bei der thermischen Behandlung verloren geht. Im Rahmen des Recyclings des Kathodenfolienausschusses ist eine Rückgewinnung des Binders grundsätzlich denkbar, wurde allerdings vom Fraunhofer IVV nicht realisiert. Gegen eine Rückgewinnung spricht die geringe Konzentration des gelösten Binders im Lösemittelstrom. Zudem ist bei der aktuellen regulatorischen Entwicklung fraglich, inwieweit eine zukünftige Nutzung langfristig relevant sein wird.

Tabelle 1-5 (Route/Zielprodukt „Graphit-Compound“) aufgelistet. Beim Recycling des Kathodenfolienausschusses werden zwei, beim Recycling des Anodenfolienausschusses werden in beiden Hauptrouten jeweils drei stofflich nutzbare Produkte erzeugt, die jeweils zu einem produktspezifischen Minderbedarf an anderweitig erzeugten Referenzprodukten führen. Die Tabellen führen außerdem Informationen dazu auf, in welcher Gesamtmasse pro funktioneller Einheit die Produkte erzeugt werden, welche Referenzprodukte angesetzt werden (siehe auch die Sachbilanzdatensätze in Tabelle 5-1 im Anhang) und welche Schritte ggf. ergänzend modelliert werden, um das Ersetzen eines üblicherweise marktfähigen Referenzprodukts zu rechtfertigen.

Tabelle 1-3: Produkte und ersetzte Referenzprodukte: Kathodenfolienausschuss. Massenangaben beziehen sich auf industriellen Maßstab.

Produkt	kg / FE	Erläuterung
Aluminium	466	Nach der Lösung des Binders lässt sich die Aluminiumfraktion per Grobfiltration vom Aktivmaterial abtrennen. Durch konventionelles Recycling (modelliert mit dem Datensatz „RER: treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, etc“) wird ein marktfähiges Aluminiumprodukt erzeugt. Es wird angesetzt, dass dadurch eine marktübliche Bereitstellung von Guss-Aluminium mit Primär- und Sekundäranteilen ersetzt werden kann (Datensatz „GLO: market for aluminium, cast alloy“). Aufgrund der Anhaftungen von Kathodenaktivmaterial wird mit Guss-Aluminium das weniger hochwertige Referenzprodukt gewählt.
Aktivmaterial	428	Der Grundansatz des Liberation-Projekts sieht vor, dass das Kathoden-Aktivmaterial nach der Liberalisierung vom Binder und der Abtrennung von der Trägerfolie per „Direktrecycling“ in der Herstellung neuer Batterien wieder einsetzbar ist, ohne es vorher hydrometallurgisch in seine Wertmaterialien Lithium, Nickel, Cobalt und Mangan aufzutrennen. Der empirische Beweis, dass dieser Ansatz mit hoher Performanz der neuen Batteriezellen funktionieren kann, konnte im Rahmen des Liberation-Projekts nicht erbracht werden (siehe Kapitel 1.2.1). Nach der Nachreinigung verbesserte sich die Performanz der Testzelle. Um das Potenzial des Recyclingprozesses darstellen zu können, wird in Anlehnung an den Schlüsselparameter „Entladekapazität“ der Testzelle im Vergleich zur Referenzzelle (Fraunhofer ISC 2026) angesetzt, dass 1 Kilogramm des Recycling-Aktivmaterials 0,7 Kilogramm marktübliches $\text{LiNi}_{0,6}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{0,2}\text{O}_2$ in Batteriequalität aus primärer Herstellung (Datensatz „CN: market for NMC622 oxide“) ersetzt.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

FE: Funktionelle Einheit, d.h. Recycling von 1 000 kg Kathodenfolienausschuss (NMC 622)

Tabelle 1-4: Produkte und ersetzte Referenzprodukte: Anodenfolienausschuss. Route/Zielprodukt „Batteriegraphit“. Massenangaben beziehen sich auf industriellen Maßstab.

Produkt	kg / FE	Erläuterung
Kupfer	272	Nach der thermischen Behandlung des Anodenfolienausschusses können das Anodenfolien-Aktivmaterial (Graphit) und die Trägerfolie (Kupfer) mechanisch voneinander separiert werden. Die Kupferfraktion kann durch konventionelles Recycling (modelliert mit dem Datensatz „RER: treatment of copper scrap by electrolytic refining“) zu einem marktfähigen Kupferprodukt aufbereitet werden. Dafür wird angesetzt, dass es eine marktübliche Bereitstellung von Kupfer mit Primär- und Sekundäranteilen ersetzt (Datensatz „GLO: market for copper, cathode“).
Batteriegraphit	514	Die Qualität und Performanz des thermisch nachbehandelten Recyclinggraphits sind so überzeugend, dass ein Einsatz in neuen Lithium-Ionen-Batterien als realistisch eingeschätzt wird. Es ist daher gerechtfertigt, anzusetzen, dass 1 kg thermisch nachgereinigter Recyclinggraphit 1 kg Graphit aus primärer Herstellungsrouten in Batteriequalität (Datensatz „CN: synthetic graphite production, battery grade, via Acheson powder route“) ersetzt.
Gebrauchte Tiegel	26	Bei der Herstellung von Batteriegraphit wird der „Ziel“-Graphit in Tiegel (Behälter) gegeben und darin stark erhitzt. Die Tiegel bestehen selbst ebenfalls aus Graphit. Nach ca. 10 Nutzungen müssen die Tiegel ersetzt werden. Die gebrauchten Tiegel haben noch einen Restwert und können als Aufkohlungsmittel verwendet werden (1:1-Massenersatz; Datensatz: „CN: used graphite crucibles to generic market for recarburizer“).

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

FE: Funktionelle Einheit, d.h. Recycling von 1 000 kg Anodenfolienausschuss

Eine Rückgewinnung des Binders ist bei der hier untersuchten Recyclingroute des Anodenfolienausschusses ausgeschlossen, da er bei der thermischen Behandlung verloren geht. Im Rahmen des Recyclings des Kathodenfolienausschusses ist eine Rückgewinnung des Binders grundsätzlich denkbar, wurde allerdings vom Fraunhofer IVV nicht realisiert. Gegen eine Rückgewinnung spricht die geringe Konzentration des gelösten Binders im Lösemittelstrom. Zudem ist bei der aktuellen regulatorischen Entwicklung fraglich, inwieweit eine zukünftige Nutzung langfristig relevant sein wird.

Tabelle 1-5: Produkte und ersetzte Referenzprodukte: Anodenfolienausschuss. Route/Zielprodukt „Graphit-Compound“. Massenangaben beziehen sich auf industriellen Maßstab.

Produkt	kg / FE	Erläuterung
Kupfer	272	Analog zu Route/Zielprodukt „Batteriegraphit“ (Tabelle 1-4).
Graphit-Compound	492	Eine alternative Recyclingroute besteht darin, aus dem Graphit über die Prozessschritte Compoundieren, Grinding, Molding und Machining ein Produkt-Graphit-Compound herzustellen, der beispielsweise in Bipolarplatten eingesetzt werden kann. Die Autor*innen dieser Ökobilanzstudie konnten weder in der ecoinvent-Datenbank noch in der Gesamtliste an Datensätzen der sphaera/GaBi-Datenbank einen spezifischen Ökobilanzdatensatz finden, der solche Produkt-Graphit-Compounds abbildet. Gemäß Experteneinschätzung der Firma CTG wäre ein Ersatz von Batteriegraphit eine Überschätzung der Gutschriften, der ecoinvent-Datensatz für „Graphit-Block“ („CN: market for graphite block“) wäre allerdings eine Unterschätzung des möglichen Umweltentlastungspotenzials. Vor diesem Hintergrund wird als Expertenschätzung für diese Recyclingroute angesetzt, dass 1,0 kg Graphit-Compound 1,5 kg Graphit-Block ersetzt. Pro funktioneller Einheit werden über die Route „Graphit-Compound“ 22 kg weniger Zielprodukt recycelt (492 kg) als über die Route „Batteriegraphit“ (514 kg), obwohl dem Graphit-Compound 10 % Polypropylen zugegeben werden. Das liegt daran, dass bei der Herstellung des Graphit-Compounds höhere Verluste entstehen (siehe die größere Restfraktion von 83 kg pro funktioneller Einheit), insbesondere beim Fräsen in die gewünschte Form.
Graphit-Restfraktion	83	Bei der Herstellung des Graphit-Compounds fällt eine Graphit-Restfraktion an, die noch einen Wert hat. Sie kann als Aufkohlungsmittel verwendet werden (1:1-Massenersatz; Datensatz „CN: market for recarburizer“).

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

FE: Funktionelle Einheit, d.h. Recycling von 1 000 kg Anodenfolienausschuss

1.2.6 Allokation und End-of-Life Modellierung

Als funktionelle Einheit ist für beide untersuchten Produktsysteme das Recycling von 1 000 kg Kathoden- bzw. Anodenfolienausschuss definiert, d. h. die Ergebnisse werden nicht für Einzelprodukte ausgewiesen, sondern als Gesamtergebnis des jeweiligen Recyclingverfahrens für Kathoden- bzw. Anodenfolienausschuss. Aus diesem Grund ist eine Allokation der Umweltlasten unter den unterschiedlichen Produkten des Kathoden- bzw. Anodenfolienrecyclings nicht erforderlich.

Weder die Produktion der Batterien, in deren Rahmen die Folienausschüsse anfallen, noch die Nutzungen der unterschiedlichen Sekundärmaterialien, die mithilfe der Liberation-Recyclingrouten zurückgewonnen werden, sind Teil der Systemgrenze (siehe Kapitel 1.2.1). Sowohl der Kathoden- als auch der Anodenfolienausschuss geht ökobilanziell lastenfrei ins Recycling ein, abgesehen vom Antransport des Folienausschusses. Alle Ergebnisse dieser Studie gelten nur für diesen End-of-Life-Allokationsansatz. Auf die methodische Randbedingung des lastenfreien Eingangs des Folienausschusses und auf die Relevanz wird in der Auswertung der Ökobilanz hingewiesen (Kapitel 4.3.1 und 4.3.2). Im Vergleich zu anderen End-of-Life-Allokationsansätzen, u. a. einem 0:100-Ansatz (End-of-Life-Recycling / Avoided burden, siehe beispielsweise Ekvall et al. 2020) oder der Circular Footprint Formula (European Commission 2021), stellt dieser Ansatz die vorteilhafteste Wahl im Sinne des Recyclingprozesses dar.

Den verwendeten Sachbilanzdatensätzen aus den Datenbanken (siehe Tabelle 5-1) liegen teilweise Allokationen zugrunde, die den entsprechenden Quellen / Dokumentationen entnommen werden können (ecoinvent 2024).

1.2.7 Anforderungen an die Datenqualität

Technologische Repräsentativität

Die Daten zum Vordergrundsystem repräsentieren labor-, pilot- bzw. teilweise auch bereits demonstrationsmaßstäbliche Versuche bei den Verbundpartnern Accurec, Fraunhofer IVV und CTG sowie beim Unterauftragnehmer Fraunhofer ISC. Um einen aussagekräftigen Bezug zu den etablierten marktüblichen Produktionsrouten zu gewährleisten, wurden die Verbundpartner gebeten, die von ihnen gemessenen Daten auf einen Industriemaßstab anzupassen. Es besteht also der grundsätzliche Anspruch, dass die Daten eine industrielle Umsetzung der Liberation-Recyclingrouten abbilden. Trotz dieses Anspruchs an die Daten zum Vordergrundsystem handelt es sich bei dieser Ökobilanz nicht um eine prospektive Ökobilanz im Sinne von Arvidsson et al. (2018, 2024) und Thonemann et al. (2020). Bei der Anpassung der Daten wurde behutsam und konservativ vorgegangen und wo belastbare Schätzungen nicht möglich waren, wurden keine Anpassungen vorgenommen. In der Sachbilanz sind im Standardfall die angepassten Daten verwendet. Tabelle 2-1 bzw. Tabelle 2-2 stellen sowohl die durchschnittlichen Messwerte, als auch die auf einen großtechnischen Maßstab bezogenen Werte dar.

Die Daten zum Hintergrundsystem sollen den durchschnittlichen Technologiemark auf dem Markt abbilden.

Zeitliche Repräsentativität

Die Daten zum Vordergrundsystem sollen entsprechend des Anspruchs an die technologische Repräsentativität einen industriellen Maßstab in ca. 5 Jahren abbilden. Dabei sollen möglichst aktuelle Messdaten aus den zuletzt abgeschlossenen Versuchsreihen zugrunde liegen.

Hinsichtlich der Daten des Hintergrundsystems wird es für diese Ökobilanzstudie als ausreichend angesehen, wenn die neuesten verfügbaren Ökobilanzdatensätze verwendet werden, die am ehesten eine marktübliche Bereitstellung der Referenzprodukte abbilden können.

Geographische Repräsentativität

Die Daten zum Vordergrundsystem sollen für Deutschland repräsentativ sein. Die Daten zum Hintergrundsystem sollen ebenfalls für Deutschland repräsentativ sein. Wenn das nicht möglich ist, sollen die Daten durchschnittliche Marktprodukte in Europa oder weltweit abbilden.

Hinsichtlich Präzision, Vollständigkeit, Konsistenz, Reproduzierbarkeit, Datenquellen und Unsicherheit wurden keine spezifischen Anforderungen festgelegt, die über eine gute wissenschaftliche Praxis hinausgehen.

1.2.8 Wirkungskategorien

In dieser Ökobilanz werden die in Tabelle 1-6 aufgeführten Wirkungskategorien detailliert ausgewertet und in Ergebnisgrafiken dargestellt. Diese Wirkungskategorien geben einen Überblick über

relevante Umweltauswirkungen des untersuchten Systems. Klassifizierung und Charakterisierung erfolgen nach EF 3.1 (Environmental Footprint 3.1; JRC 2022). Weitere Wirkungskategorien – darunter der Verbrauch abiotischer fossiler Ressourcen, Öko- bzw. Humantoxizität, Feinstaub, Wasserbedarf und Flächenbelegung – wurde quantitativ ausgewertet und in den Kapiteln 3.1.6 bzw. 3.2.6 kurz diskutiert. Die numerischen Ergebniswerte sind ergänzend in (Tabelle 5-2, Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 in Anhang II) aufgeführt.

Tabelle 1-6: Untersuchte Wirkungskategorien

Abk.	Wirkungskategorie	Einheit	Wirkungsabschätzungsmethode
GWP	Globale Erwärmung (Climate Change – total)	kg CO ₂ -Äquiv.	EF 3.1
ADP	Abiotischer Ressourcenverbrauch (Resource use, mineral and metals)	kg Sb-Äquiv.	EF 3.1
AP	Versauerung, terrestrisch (Acidification)	Mol H ⁺ Äquiv.	EF 3.1
EP	Eutrophierung, terrestrisch (Eutrophication, terrestrial)	Mol N Äquiv.	EF 3.1
POCP	Photochemische Ozonbildung (Photochemical ozone formation, human health)	kg NMVOC Äquiv.	EF 3.1

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Bzgl. des GWPs beziehen sich alle Ergebnisdarstellung auf den GWP₁₀₀. EF 3.1 verwendet Charakterisierungsfaktoren aus dem AR6 des IPCC (Forster et al. 2021).

Der Verbrauch abiotischer Ressourcen ist ein Maß für die Entnahme abiotischer Ressourcen aus der Erde bzw. die Erschöpfung nicht lebender natürlicher Ressourcen. Die Environmental Footprint Methode des Joint Research Center (JRC) verwendet nach wie vor das vom Centrum voor Milieukunde der Universität Leiden (CML) in den 1990er Jahren entwickelte Konzept, das die Entnahmerate einer Ressource und die Reserven berücksichtigt. Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Reserven zu bestimmen: Zu den wichtigsten Optionen zählen die ultimativen Reserven, die Reservebasis und die wirtschaftlichen Reserven. Die für diese Ökobilanz verwendete Environmental Footprint Methode stützt sich auf die ultimativen Reserven.

Versauerung kann sowohl in terrestrischen als auch in aquatischen Systemen auftreten. Die Environmental Footprint Methode des JRC verwendet das Modell von Seppälä et al. 2006 und Posch et al. 2008, das sich ausschließlich mit terrestrischer Versauerung befasst. Das terrestrische Versauerungspotenzial (AP) wird in Form von Mol H⁺-Äquivalenten berechnet.

Eutrophierung bezeichnet einen Überschuss an Nährstoffen, sowohl in Gewässern als auch in Böden. Das terrestrische Eutrophierungspotenzial (EP) wird durch die Summe der Stickstoffäquivalente bestimmt.

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

Eine Normierung mit durchschnittlichen Jahresemissions- bzw. Verbrauchswerten als optionaler Bestandteil der Wirkungsabschätzung wird in dieser Studie nicht durchgeführt. Ebenso werden keine

Ordnungs- und Gewichtungungsverfahren verwendet. Die Wirkungsabschätzungsergebnisse sind relative Aussagen und können keine Voraussagen über Auswirkungen auf die Wirkungsendpunkte, Schwellenwertüberschreitungen, Sicherheitsspannen oder Risiken machen.

1.2.9 Methoden der Auswertung

Die Auswertung wird entsprechend der in ISO 14040 und ISO 14044 geforderten Bestandteile durchgeführt. Sie umfasst:

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

1.2.10 Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts

Die Art und der Aufbau des Berichts orientieren sich an den vier Phasen einer Ökobilanz (Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung, Auswertung). Nach Abschluss des Projekts soll dieser Bericht als Ganzes publiziert werden.

1.2.11 ISO-Konformität und kritische Prüfung

Die vorliegende Ökobilanz wurde entsprechend den einschlägigen Vorgaben der ISO 14040 und ISO 14044 durchgeführt. Da es sich um eine Ökobilanz handelt, die zur Publikation vorgesehen ist, wurde, wie in den Normen empfohlen, eine kritische Prüfung nach ISO 14071 (ISO 2024) durch einen unabhängigen Gutachter durchgeführt. Prof. Dr. Matthias Finkbeiner kann auf einschlägige und umfassende Kenntnisse und Erfahrungen in den methodischen Anforderungen an Ökobilanzen, auch auf dem Gebiet der Abfallwirtschaft und insbesondere beim Recycling, verweisen. Die kritische Prüfung erstellte er als unabhängiger Gutachter und nicht als Vertreter oder im Auftrag der TU Berlin. Die Überprüfung wurde nach Abschluss der Studie durchgeführt. Das die Prüfaussage enthaltende Gutachten wird in den Anhang des Berichtes aufgenommen. Eine Validierung des Sachbilanzmodells und der verwendeten Daten war nicht Gegenstand der kritischen Prüfung.

2 Sachbilanz

2.1 Datenerhebung: Vordergrundsystem

Tabelle 2-1 und Tabelle 2-2 führen die Inputs und Outputs der jeweiligen Prozessschritte des Recyclings von Kathoden- bzw. Anodenfolienausschuss auf. Die Zuordnung, welche Verbundpartner für die unterschiedlichen Prozessschritte verantwortlich waren und entsprechende Daten zu den Prozessschritten bereitgestellt haben, ist den farblichen Kennzeichnungen in Abbildung 1-1 bzw. Abbildung 1-2 zu entnehmen. Die von den Verbundpartnern übermittelten Daten wurden vom Öko-Institut auf Plausibilität geprüft.

Tabelle 2-1: Sachbilanz Kathodenfolienausschuss: Inventar der Stoff- und Energieflüsse jeweils pro funktioneller Einheit (Recycling von 1000 kg Kathodenfolienausschuss)

Parameter	Durchschnittlicher Messwert	Anpassung industrieller Maßstab	Einheit
MATERIALVORBEREITUNG			
<i>Inputs</i>			
Kathodenfolienausschuss	1.000	1.000	kg
Elektrische Energie	11	11	kWh
LÖSUNG DES BINDERS, FILTRATION UND LÖSEMITTELRÜCKGEWINNUNG			
<i>Inputs</i>			
Lösemittel	6.000	600	kg
Elektrische Energie	2.210	1.310	kWh
<i>Outputs</i>			
Aluminium	417	466	kg
NMC 622	421	475	kg
NASSCHEMISCHE AUFREINGIGUNG			
<i>Inputs</i>			
NMC 622	421	475	kg
Chemikalien	Vertraulich	Vertraulich	kg
Elektrische Energie	Vertraulich	Vertraulich	kWh
Wasser	Vertraulich	Vertraulich	kg

Parameter	Durchschnittlicher Messwert	Anpassung industrieller Maßstab	Einheit
<i>Outputs</i>			
Recycling-Kathodenaktivmaterial (NMC 622)	379	428	kg
Abwasser	Vertraulich	Vertraulich	kg

Quelle: Öko-Institut e.V. auf Basis von Angaben der Verbundpartner bzw. Unterauftragnehmer, siehe Abbildung 1-1

Der durchschnittliche reelle Lösemitteleinsatz beim Verbundpartner Fraunhofer IVV betrug hochgerechnet auf die funktionelle Einheit (Recycling von 1.000 kg Kathodenfolienausschuss) ca. 6.000 kg. Der hohe Lösemitteleinsatz ist auf die Betriebsrandbedingungen der eingesetzten Multi-Purpose-Anlage zurückzuführen, da eine Kreislaufführung des Lösemittels zur Vermeidung von Kreuzkontamination zwischen unterschiedlichen Materialströmen nach sicherheitstechnischer Abwägung nicht zulässig war. Für den Betrieb im industriellen Maßstab setzt das Fraunhofer IVV einen Einsatz von ca. 600 kg Lösemittel an, insbesondere aufgrund von klaren Indizien dafür, dass eine Kreislaufführung des Lösemittels möglich wäre.

Tabelle 2-2: Sachbilanz Anodenfolienausschuss: Inventar der Stoff- und Energieflüsse jeweils pro funktioneller Einheit (Recycling von 1000 kg Anodenfolienausschuss)

Parameter	Durchschnittlicher Messwert	Anpassung industrieller Maßstab	Einheit
THERMISCHE UND MECHANISCHE BEHANDLUNG			
<i>Inputs</i>			
Anodenfolienausschuss	1.000	1.000	kg
Elektrische Energie: Stickstofferzeugung	2	2	kWh
Elektrische Energie: Heizen des Ofens	200	100	kWh
Elektrische Energie: Mechanische Aufbereitung	32	32	kWh
<i>Outputs</i>			
Graphit	491	518	kg
Kupfer	349	356	kg
Route 1: THERMISCHE NACHREINIGUNG (Erzeugung von Graphit in Batteriequalität)			
<i>Inputs</i>			
Graphit	491	518	kg
Elektrische Energie	4.174	4.400	kWh

Parameter	Durchschnittlicher Messwert	Anpassung industrieller Maßstab	Einheit
Graphittiegel (Behälter)	25	26	kg
<i>Outputs</i>			
Batteriegraphit	487	514	kg
Gebrauchte Tiegel	25	26	kg
Route 2: HERSTELLUNG GRAPHIT-COMPOUND			
<i>Inputs</i>			
Graphit	491	518	kg
Elektrische Energie	2.257	2.381	kWh
Polypropylen	55	57	kg
<i>Outputs</i>			
Graphit-Compound	467	492	kg
Graphit-Restfraktion	79	83	kg

Abwasser und geringe Mengen an festen Reststoffen sind in dieser Auflistung wegen nachrangiger Relevanz nicht aufgeführt.
Quelle: Öko-Institut e.V. auf Basis von Angaben der Verbundpartner, siehe Abbildung 1-2

2.2 Datenerhebung: Hintergrundsystem

Die Umweltauswirkungen des Hintergrundsystems wurden mithilfe von Sachbilanzdatensätzen aus der Ökobilanzdatenbank ecoinvent v3.11 abgebildet. Der geographische Bezug der Datensätze ist nach Möglichkeit landesspezifisch, ansonsten europäisch oder global gewählt. Insofern ist der primäre räumliche Bezug der Ökobilanz Deutschland. Die verwendeten Datensätze sind in Tabelle 5-1 im Anhang dokumentiert.

Soweit möglich wurden Markt-Sachbilanzdatensätze herangezogen, die die Transporte innerhalb der Prozesskette umfassen. Für den Transport des Kathoden- bzw. Anodenfolienausschusses vom Batteriewerk zum ersten Verarbeitungsort der Recyclingkette und für die Transporte zwischen den beteiligten Recyclingstandorten wurden einfache Distanzen von 200 km angesetzt.

2.3 Technologische, geographische und zeitliche Repräsentativität

Die stoffliche Zusammensetzung des untersuchten Kathoden- bzw. Anodenfolienausschusses wie in Tabelle 1-1 bzw. Tabelle 1-2 aufgeführt wird als hinreichend repräsentativ für aktuelle NMC 622-Produktionsausschüsse angesehen. Es ist davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren ein Trend zu einem höheren Massenanteil der Aktivmasse (z. B. NMC bzw. Graphit) bzw. einem geringeren Massenanteil der Trägerfolien zu verzeichnen sein wird, der teilweise bereits in aktuellen Produktionsausschüssen sichtbar wird. Darüber hinaus ist die untersuchte Batteriechemie NMC 622 lediglich eine von vielen nickelhaltigen Batteriechemien am Markt und der Trend geht eher in Richtung NMC 811 oder NMC 955. Außerdem ist der untersuchte Ausschuss nicht für LFP-Batterien repräsentativ, die aktuell am schnellsten Marktanteile gewinnen. Vor diesem Hintergrund zeigt Kapitel 4.2.2.1 das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse zum Massenverhältnis von Aktivmasse zu

Trägerfolie im Produktionsausschuss. Eine andere Zusammensetzung der Kathodenfolie wird in dieser Ökobilanz nicht untersucht.

Die Daten für das Vordergrundsystem basieren auf den aktuellen Messdaten aus den zuletzt abgeschlossenen Versuchsreihen der Verbundpartner bzw. des Unterauftragnehmers Fraunhofer ISC und wurden, soweit dies anhand von Experteneinschätzungen der Verbundpartner bzw. des Fraunhofer ISC möglich war, auf einen potenziellen großtechnischen Maßstab, beispielsweise in 5 Jahren, bezogen. Sie beziehen sich auf einen Recyclingprozess in Deutschland. Damit erfüllen die Daten die in Kapitel 1.2.7 beschriebenen Anforderungen. Durch den Bezug der Daten auf eine potenzielle Realisierung des Recyclingprozesses im großtechnischen Maßstab werden mitunter große Veränderungen an den von den Verbundpartnern gemessenen Werten vorgenommen. Mitunter wird der Einfluss einer Umsetzung im großtechnischen Maßstab über- bzw. unterschätzt. Die damit verbundenen Unsicherheiten müssen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Bei den Sachbilanzdatensätzen für das Hintergrundsystem sind an mehreren Stellen Datensätze für den geographischen Bezugsraum China verwendet. Damit weichen sie von der in Kapitel 1.2.7 formulierten Anforderung ab, deutsche, europäische oder globale durchschnittliche marktübliche Produktion abzubilden. Diese Abweichung wird bewusst vorgenommen, da China bei der Herstellung von Graphit und Kathodenaktivmaterial hohe Anteile an der Weltmarktproduktion aufweist und als Alternative lediglich ein Datensatz für den geographischen Raum „Rest of World“ zur Verfügung stünde, der als weniger aussagekräftig eingeschätzt wird. Davon abgesehen sind die Daten für das Hintergrundsystem der zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie aktuellsten Version der Ökobilanzdatenbank ecoinvent (v3.11) entnommen und zielen darauf ab, eine marktübliche Bereitstellung abzubilden. Damit erfüllen sie die in Kapitel 1.2.7 beschriebenen Anforderungen. Die konkrete zeitliche Repräsentativität der Datensätze ist in Tabelle 5-1 aufgeführt. Einige Datensätze sind für einen Zeitraum repräsentativ, der bereits über 20 Jahre zurückliegt (Dimethyl-Sulfoxid, Behandlung gefährlicher Abfälle, Aluminiumrecycling, Kupferrecycling). Die Datensätze zur Abbildung der ersetzten Primärproduktion von Aluminium, Kupfer, Kathodenaktivmaterial bzw. Graphit sind für die Jahre 2015, 2015, 2018 bzw. 2019 repräsentativ. Obwohl die Daten, die das Vordergrundsystem beschreiben, so angepasst wurden, dass sie eine potenzielle Umsetzung im Industriemaßstab abbilden, handelt es sich bei dieser Ökobilanz nicht um eine prospektive Ökobilanz im Sinne von Arvidsson et al. (2018, 2024) und Thonemann et al. (2020).

Aus dem recycelten Kathodenaktivmaterial wurde eine Testzelle hergestellt, deren Performanz mit einer modernen Referenzzelle derselben Batteriechemie verglichen wurde. Vor dem Hintergrund der Degradation des eingesetzten Ausgangsmaterials (Kathodenfolienausschuss) stellt die Wahl des Referenzmaterials keinen idealen Vergleichsmaßstab dar.

2.4 Datenqualität

- Vordergrundsystem: Die von den Verbundpartnern bzw. dem Fraunhofer ISC zusammengestellten Daten wurden sorgfältig erhoben, beziehen sich speziell auf den hier analysierten Recyclingprozess und wurden vom Öko-Institut auf Plausibilität geprüft. Einschränkungen bestehen darin, dass die Daten teilweise zwecks Bezugs auf einen großtechnischen Maßstab stark gegenüber den empirischen Messwerten angepasst wurden, was bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss.

- Hintergrundsystem: Über die Ausführungen im vorangegangenen Kapitel 2.3 hinausgehend wurde die Datenqualität der verwendeten Sachbilanzdatensätze aus der ecoinvent-Datenbank nicht überprüft. Bei den Prozessinputs handelt es sich hauptsächlich um Standardprodukte.

3 Wirkungsabschätzung

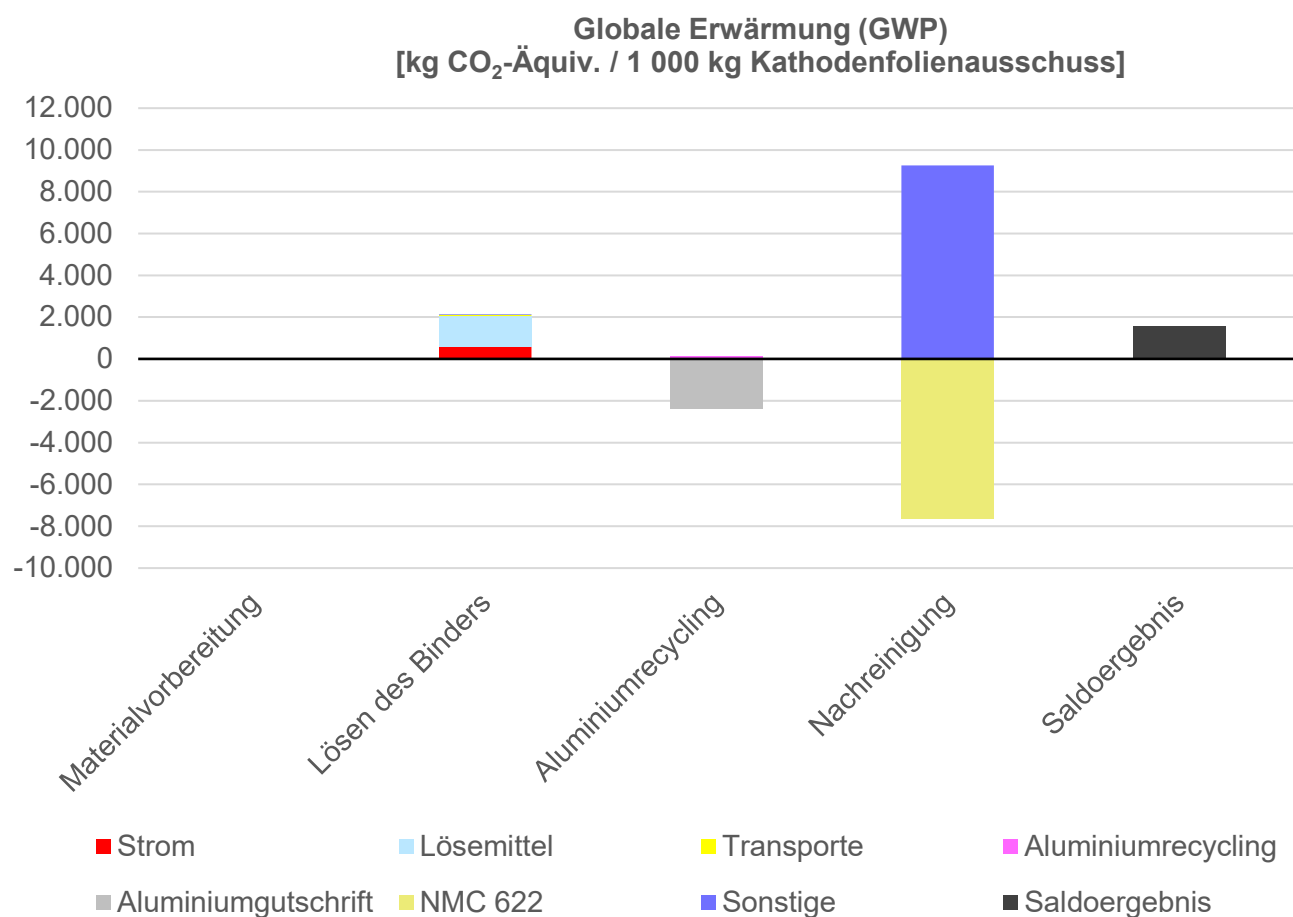
Zunächst werden in Kapitel 3.1 die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zum Recycling des Kathodenfolienausschusses dargestellt. Anschließend werden in Kapitel 3.2 die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zum Recycling des Anodenfolienausschusses dargestellt.

3.1 Kathodenfolienausschuss

3.1.1 Globale Erwärmung

Das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie Globale Erwärmung (Global Warming Potential, GWP) ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

Abbildung 3-1: Kathodenfolienausschuss: LCA-Ergebnis Globale Erwärmung (GWP)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Ergebnisse und Diskussion:

- Das Liberation-Recyclingverfahren führt unter den getroffenen Annahmen und bei den verwendeten Daten im Saldo zu zusätzlichen Treibhausgasemissionen in Höhe von knapp 2.000 kg CO₂-Äquivalenten pro 1.000 kg Kathodenfolienausschuss.

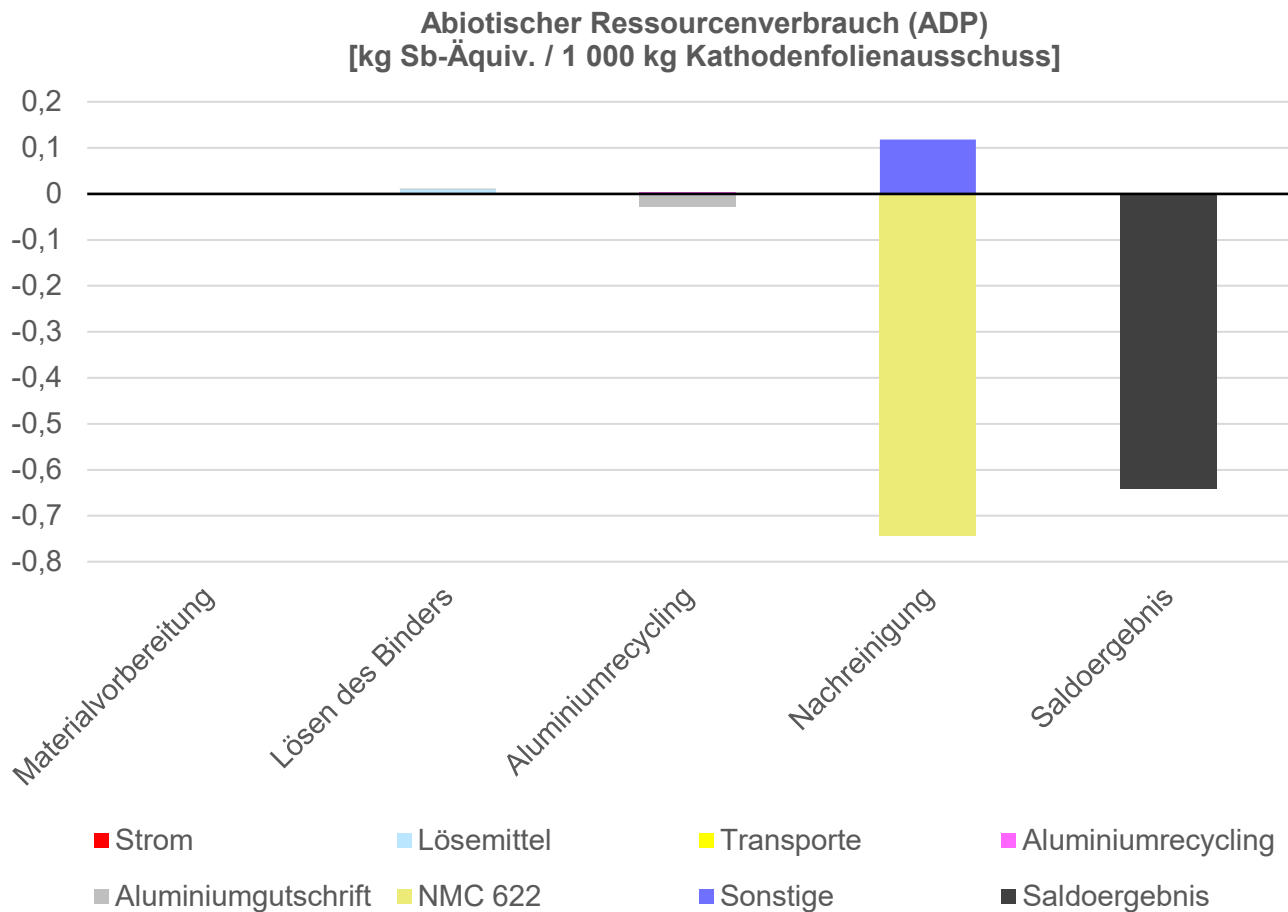
- Den größten Einzelbeitrag liefert die nachträglich eingeführte Nachreinigung des Kathodenaktivmaterials. Sie führt zu zusätzlichen Treibhausgasemissionen in Höhe von ca. 9.000 kg CO₂-Äquivalenten und trägt damit einen Anteil von 80 % an den zusätzlichen Emissionen des gesamten Recyclingverfahrens. Aus Gründen der Vertraulichkeit wird nicht dargestellt, wie sich dieser Einzelbeitrag aus dem Einsatz von Chemikalien, sonstigen Betriebsstoffen und Energie zusammensetzt (siehe auch Tabelle 2-1). Wie in den Kapiteln 1.2.1, 2.1 und 2.3 beschrieben, wurde dieser Prozessschritt unter nicht optimierten Laborbedingungen an einer kleinen Probe (7 Gramm nachzureinigendes Kathodenaktivmaterial) durchgeführt. An den gemessenen Inputströmen wurden konservative Anpassungen vorgenommen, um einen potenziellen großtechnischen Maßstab abzubilden. Es bleibt offen, inwiefern eine großtechnische Umsetzung weitere Effizienzgewinne bringt, die über die Anpassungen an den Messwerten zu den Inputströmen hinausgehen. Darüber hinaus ist zu klären, ob die aufwändige Nachreinigung des vom Binder freigesetzten Kathodenaktivmaterials zwingend erforderlich ist oder ob sich weniger aufwändige Alternativverfahren eignen (vgl. Kapitel 4.3.1). Wie sich das Ökobilanzergebnis verändert, wenn auf eine Anpassung der im Labormaßstab gemessenen Werte auf eine potenzielle Umsetzung im Industriemaßstab verzichtet wird, ist in Form einer Sensitivitätsanalyse untersucht und in Kapitel 4.2.2.2 beschrieben.
- Den zweitgrößten Einzelbeitrag liefert die Gutschrift für das ersetzte, marktübliche NMC 622 Kathodenaktivmaterial. Zugrunde gelegt wurde, dass 1,0 kg Recycling NMC 622 nur 0,7 kg aus primärer Herstellung ersetzt. Einerseits wird das Umweltentlastungspotenzial mit diesem Äquivalenzfaktor überschätzt, da die Testzelle aus nachgereinigtem Kathodenaktivmaterial nicht die Performanz einer modernen Referenzzelle erreichte. Es ist somit noch ohne weitere Verfahrensoptimierungen fraglich, ob das Material realistisch zum Einsatz kommt. Andererseits könnte das Potenzial zur Umweltentlastung des Recyclingverfahrens noch höher liegen, da ein hinreichend performantes Recycling-Kathodenaktivmaterial grundsätzlich in derselben Menge in neuen Batterien eingesetzt werden würde wie Kathodenaktivmaterial aus der primären Herstellungsrouten, sodass sich mit einem Äquivalenzfaktor von 1,0 eine höhere Gutschrift ergeben würde.
- Vor diesem Hintergrund hat das Liberation-Recyclingverfahren für Kathodenfolienausschuss noch großes Potential, ein besseres Ökobilanzergebnis zu erzielen. Bei einer weniger aufwändigen oder sogar komplett vermeidbaren Nachreinigung und einer besseren Performanz des Recycling-Kathodenaktivmaterials könnte der in Abbildung 3-1 dargestellte blaue Balken deutlich kleiner und der gelbe Balken größer ausfallen, sodass sich insgesamt voraussichtlich ein vorteilhaftes Ökobilanzergebnis ergeben würde.
- Der Lösemiteleinsatz führt zu zusätzlichen Treibhausgasemissionen in Höhe von ca. 1.500 kg CO₂-Äquivalenten pro 1.000 kg Kathodenfolienausschuss. Dabei ist der reelle Lösemiteleinsatz um einen Faktor 10 verringert (600 kg Lösemittel pro 1.000 kg Kathodenfolienausschuss, siehe Tabelle 2-1), um die Effizienzgewinne bei einer möglichen großtechnischen Realisierung des Liberation-Recyclingverfahrens abzubilden (siehe Kapitel 1.2.1 und 2.1). Zusätzliche Einsparungen im Materialeinsatz könnten zu weiteren sichtbaren Verbesserungen im Ökobilanzergebnis führen. Es ist zu berücksichtigen, dass für das eingesetzte Lösemittel lediglich ein mit dem Fraunhofer IVV abgestimmter Proxy-Datensatz (Dimethylsulfoxid (DMSO)) angesetzt wurde (Vertraulichkeit, Schutzrechte) und die Emissionen des tatsächlich eingesetzten Lösemittels davon abweichen können.

- Die Materialvorbereitung des Kathodenfolienausschusses, der Energieeinsatz beim Lösen des Binders und die Materialtransporte sind von nachrangiger Relevanz.
- CO₂ und CH₄ tragen am stärksten zu den Ergebnissen bei. Sie machen 92 % bzw. 7 % der Emissionen und 88 % bzw. 8 % der Gutschriften aus.
- Die hier betrachtete Recyclingroute für Kathodenfolienausschuss zielt darauf ab, das Kathodenaktivmaterial direkt wieder für einen Einsatz in neuen Batterien aufzubereiten, d. h. eine Separierung in die jeweiligen Wertstoffe, insbesondere Nickel, Cobalt und Lithium, wird nicht angestrebt. Sollte sich das im Rahmen dieses Projekts anhand einer Testzelle ermittelte Ergebnis, dass die Performanz des Recycling-Kathodenaktivmaterials nennenswert hinter der Performanz einer Zelle aus der primären Herstellungsrouten zurückbleibt, in der Zukunft anhand weiterer Versuche und Testzellen bestätigen, so besteht weiterhin die Option, den Anspruch „Direktrecycling“ aufzugeben und doch eine Separierung in die Wertstoffe durchzuführen. Dabei würde das Recyclingmaterial eine hydrometallurgische Prozessierung durchlaufen, beispielsweise unter Einsatz von Basischemikalien wie Salzsäure und Natronlauge und überschaubaren Mengen an Prozessenergie, wie sie u. a. im Mercator-Recyclingverfahren (Buchert et al. 2023) dargestellt ist. Damit ließen sich separate Metallsalze (z. B. Lithiumcarbonat, Nickelsulfat, Cobalhydroxid) zurückgewinnen, die marktübliche Metallsalze aus der primären Herstellungsrouten ersetzen könnten, was sich mit entsprechend hohen und zuverlässigen Gutschriften im Ökobilanzergebnis abbilden würde. Allerdings wäre in diesem Fall noch der Energieaufwand zu verbuchen, der mit der Herstellung des Kathodenaktivmaterials aus den Metallsalzen einhergeht, was beim Direktrecycling nicht notwendig ist.

3.1.2 Abiotischer Ressourcenverbrauch

Das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch (Abiotic Depletion Potential, ADP) ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

Abbildung 3-2: Kathodenfolienausschuss: LCA-Ergebnis Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Ergebnisse und Diskussion:

- Das Liberation-Recyclingverfahren führt unter den getroffenen Annahmen und bei den verwendeten Daten im Saldo zu Umweltentlastungen in Höhe von etwa 0,6 kg Sb-Äquivalenten pro 1.000 kg Kathodenfolienausschuss.
- Der mit Abstand größte Einzelbeitrag ist die Gutschrift für ersetztes, marktübliches NMC 622 Kathodenaktivmaterial. Zu den Gutschriften tragen Kupfer, Schwefel und Tellur mit 42 %, 41 % bzw. 6 % am stärksten bei. Die Primärproduktion von Cobalt findet überwiegend gemeinsam mit Kupfer bzw. Nickel statt. Dabei werden neben den Zielmetallen (Kupfer, Nickel, Cobalt) auch Schwefel und teilweise Tellur extrahiert, deren Beiträge zum Ergebnis stärker gewichtet werden (siehe nachfolgender Absatz). Die im Kathodenaktivmaterial enthaltenen massenmäßig dominierenden Metalle Lithium, Nickel, Cobalt und Mangan tragen lediglich 0,02 %, 1,09 %, 0,02 % bzw. 0,02 % zu den Gutschriften bei.
- Methodischer Hintergrund: Die angewendeten Charakterisierungsfaktoren (Quantifizierung des Beitrags eines Stoffes zu einem Umweltproblem im Verhältnis zu einem Referenzstoff; hier: Abiotic Depletion Potential, ADP) berücksichtigen die Förderrate einer Ressource und deren Reserven. Die ADP-Faktoren für Kupfer, Schwefel, Tellur, Lithium, Nickel, Cobalt und Mangan

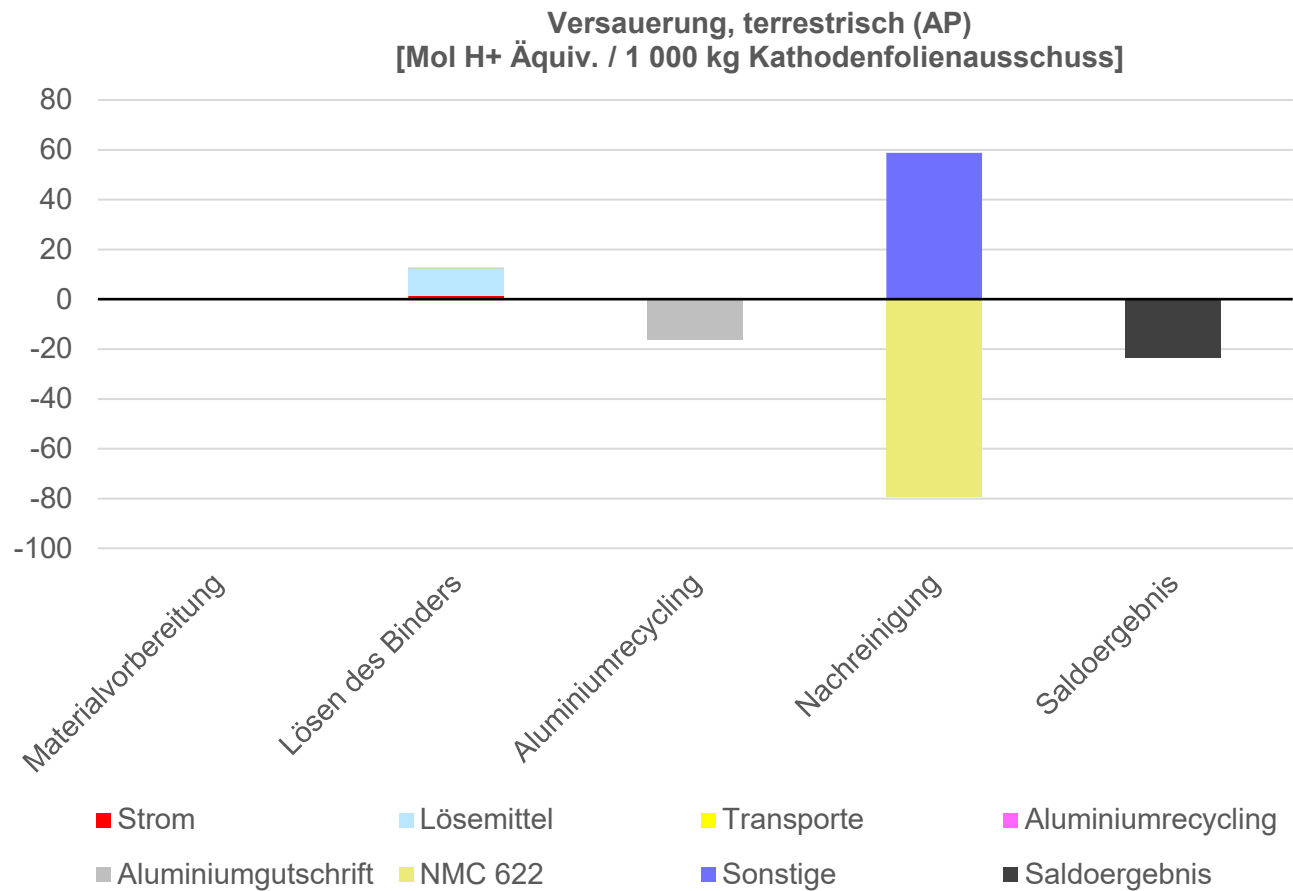
betragen 0,00137, 0,000193, 40,7, 0,0000115, 0,0000653, 0,0000157 bzw. 0,00000254, d. h. zwischen den Elementen liegen mehrere Größenordnungen. So ist der ADP-Faktor für Kupfer 20-mal höher als der für Nickel, 80-mal höher als der für Kobalt und 120-mal höher als der für Lithium. Der ADP-Faktor für Tellur liegt wiederum etwa 30.000-mal höher als der von Kupfer. So können sehr geringe Extraktionsmengen bei den im Hintergrundsystem beteiligten Prozessen sich stark auf das Gesamtergebnis auswirken.

- Neben den unterschiedlichen ADP-Faktoren der Metalle müssen bei der Interpretation der oben genannten Ergebnisse folgende Aspekte berücksichtigt werden: Erstens ist die Verwendung der ultimativen Reserven als Referenzgröße eine subjektive Entscheidung. Die Verwendung der Reservebasis oder der wirtschaftlichen Reserve würde zu anderen Ergebnissen führen. Zweitens ändern sich die Förderraten im Laufe der Zeit.
- Vor diesem Hintergrund gilt: Selbst wenn die Vorteile und Belastungen durch Kupfer und Tellur überschätzt werden, wird der allgemeine Umweltvorteil des Recyclingprozesses unter Berücksichtigung der angewandten Systemgrenzen als robust angesehen, wenn auch als erwartbar. Die Beiträge der verschiedenen zurückgewonnenen Metalle zu den Vorteilen müssen jedoch mit Vorsicht interpretiert werden.

3.1.3 Versauerung (terrestrisch)

Das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie Versauerung, terrestrisch (Acidification Potential, AP) ist in Abbildung 3-3 dargestellt.

Abbildung 3-3: Kathodenfolienausschuss: LCA-Ergebnis Versauerung, terrestrisch (AP)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

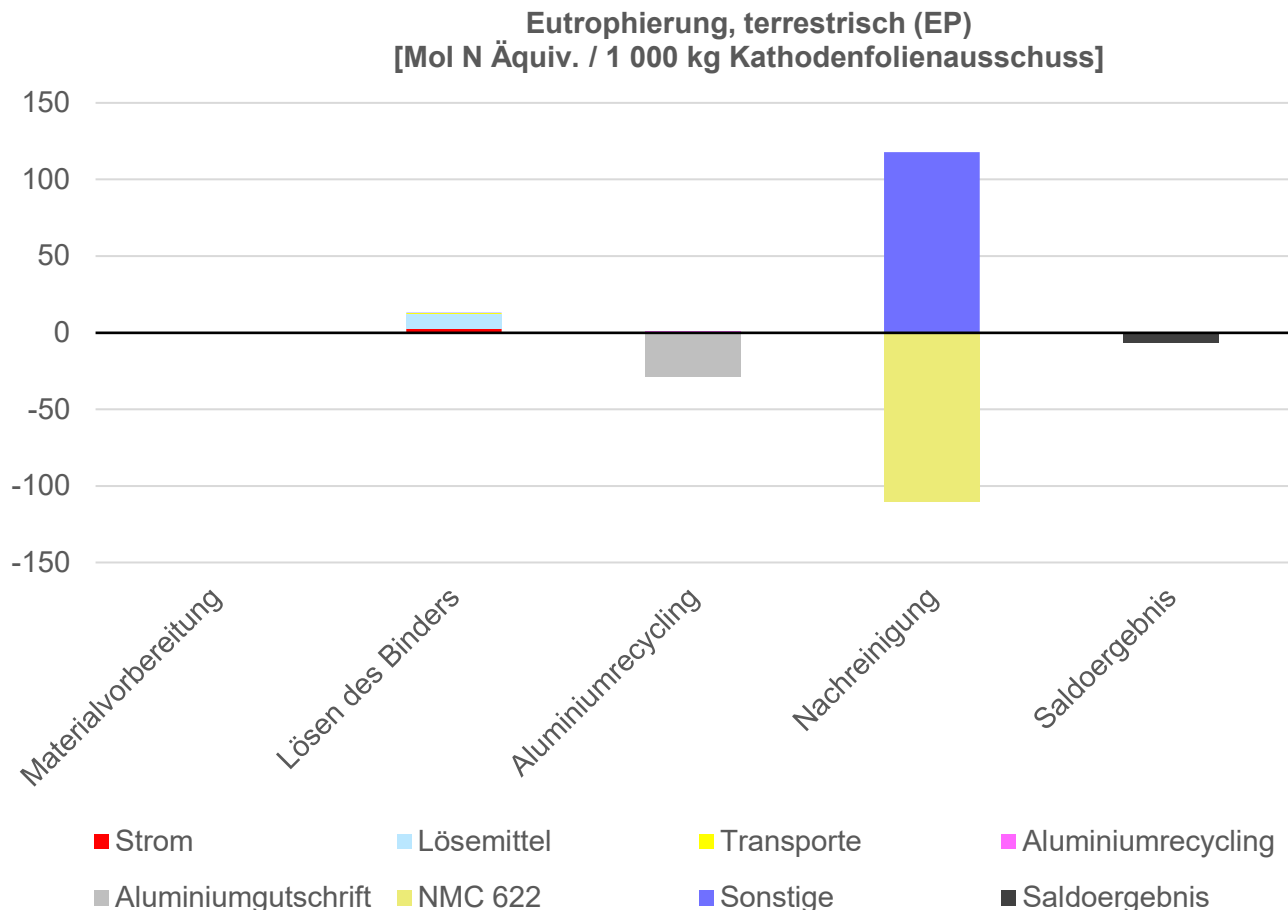
Ergebnisse und Diskussion:

- Das Liberation-Recyclingverfahren führt unter den getroffenen Annahmen und bei den verwendeten Daten im Saldo zu Umweltentlastungen in Höhe von etwa 20 Mol H⁺ Äquivalenten pro 1.000 kg Kathodenfolienausschuss.
- Die Gutschrift für das ersetzte NMC 622 Kathodenaktivmaterial, die Nachreinigung des Kathodenaktivmaterials, die Gutschrift für das ersetzte Aluminium und das eingesetzte Lösemittel tragen am stärksten zum Gesamtergebnis bei. Die hohe Gutschrift für das ersetzte Kathodenaktivmaterial ist zu erwarten, da der Bergbau der sulfidischen Nickel- und Cobalthaltigen Erze mit der Emission von Säurebildnern verbunden ist.
- Das Ergebnis ist nicht deutlich vorteilhaft. Es ist daher wichtig, dass das Lösemittel möglichst effizient eingesetzt wird und dass die Nachreinigung des Kathodenaktivmaterials unter geringem Material- und Energieeinsatz durchgeführt wird.
- Schwefeldioxid, Stickoxide und Ammoniak tragen mit 51 %, 24 % bzw. 1 % am stärksten zu den Emissionen und mit 59 %, 18 % bzw. 6 % am stärksten zu den Gutschriften bei.

3.1.4 Eutrophierung (terrestrisch)

Das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie Eutrophierung, terrestrisch (Eutrophication Potential, terrestrial, EP) ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

Abbildung 3-4: Kathodenfolienausschuss: LCA-Ergebnis Eutrophierung, terrestrisch (EP)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Ergebnisse und Diskussion:

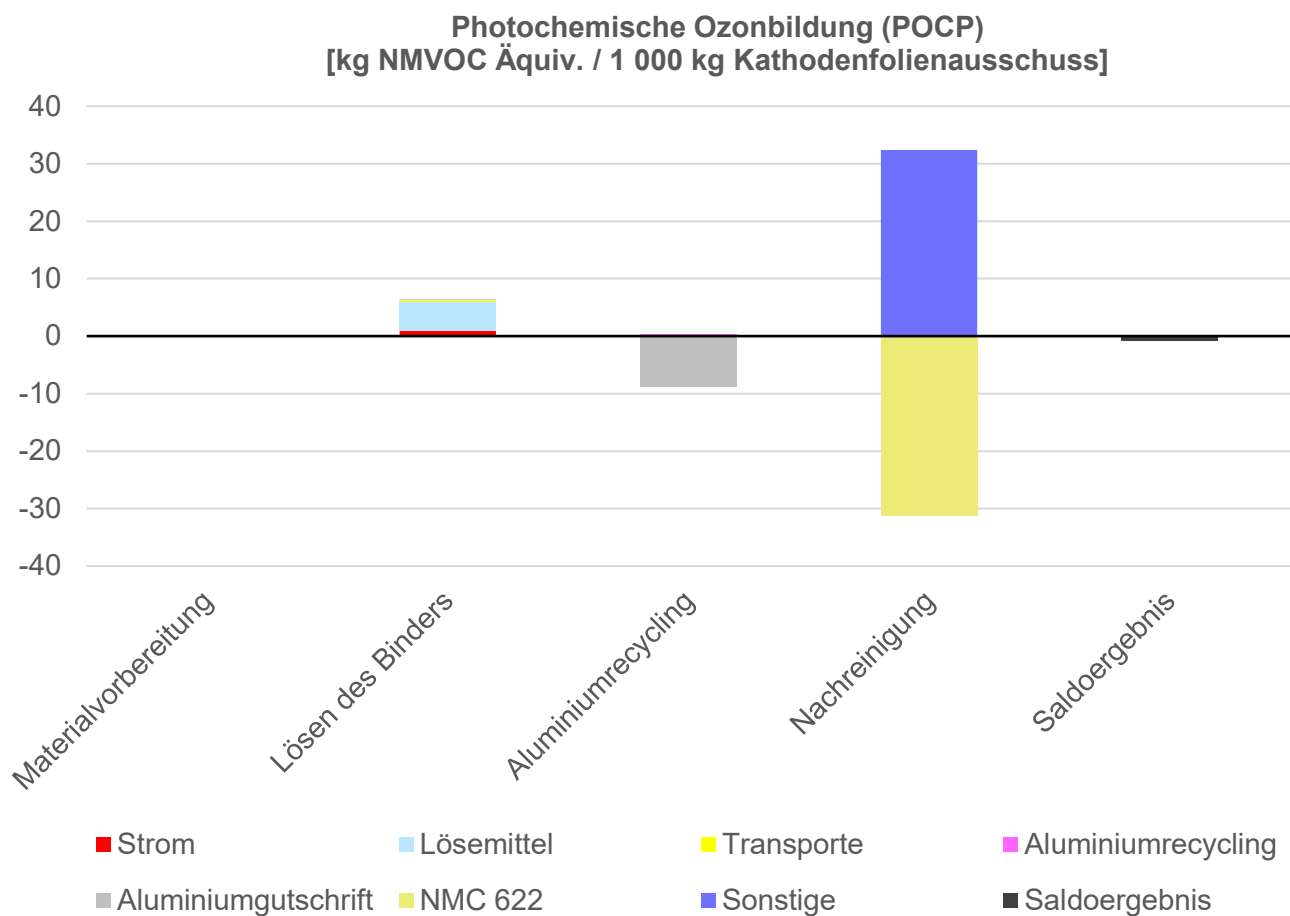
- Die zusätzlichen Emissionen und die Umweltentlastungen (Gutschriften), die mit dem Liberation-Recyclingverfahren unter den getroffenen Annahmen und bei den verwendeten Daten verbunden sind, halten sich in etwa die Waage.
- Die Gutschrift für das ersetzte NMC 622 Kathodenaktivmaterial, die Nachreinigung des Kathodenaktivmaterials, die Gutschrift für das ersetzte Aluminium und das eingesetzte Lösemittel tragen am stärksten zum Gesamtergebnis bei.
- Für eine potenzielle großtechnische Umsetzung ist es für das Umweltergebnis wichtig, dass die Nachreinigung des Kathodenaktivmaterials unter geringem Material- und Energieeinsatz durchgeführt wird und dass das Lösemittel möglichst effizient eingesetzt wird.
- Stickoxide und Ammoniak tragen mit 85 % bzw. 14 % am stärksten zu den Emissionen und mit 79 % bzw. 20 % am stärksten zu den Gutschriften bei. Die ersetzte Herstellung von NMC 622

Kathodenmaterial ist so modelliert, dass Ammoniumhydroxid eingesetzt wird und bei der Kreislaufführung 10 % kontinuierliche Ammoniakverluste entstehen. Die zum Ergebnis beitragenden Stickoxide entstehen überwiegend bei Verbrennungsprozessen zur Stromerzeugung.

3.1.5 Photochemische Ozonbildung

Das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie Photochemische Ozonbildung (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP) ist in Abbildung 3-5 dargestellt.

Abbildung 3-5: Kathodenfolienausschuss: LCA-Ergebnis Photochemische Ozonbildung (POCP)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Ergebnisse und Diskussion:

- Die zusätzlichen Emissionen und die Umweltentlastungen (Gutschriften), die mit dem Liberation-Recyclingverfahren unter den getroffenen Annahmen und bei den verwendeten Daten verbunden sind, halten sich in etwa die Waage.
- Die Gutschrift für das ersetzte NMC 622 Kathodenaktivmaterial, die Nachreinigung des Kathodenaktivmaterials, die Gutschrift für das ersetzte Aluminium und das eingesetzte Lösemittel tragen am stärksten zum Gesamtergebnis bei.

- Für eine potenzielle großtechnische Umsetzung ist es für das Umweltergebnis wichtig, dass die Nachreinigung des Kathodenaktivmaterials unter geringem Material- und Energieeinsatz durchgeführt wird und dass das Lösemittel möglichst effizient eingesetzt wird.
- Stickoxide, Non-methane volatile organic compounds (NMVOCs) und Schwefeldioxid tragen mit 67 %, 21 % bzw. 6 % am stärksten zu den Emissionen und mit 65 %, 20 % bzw. 9 % am stärksten zu den Gutschriften bei.

3.1.6 Weitere Wirkungskategorien

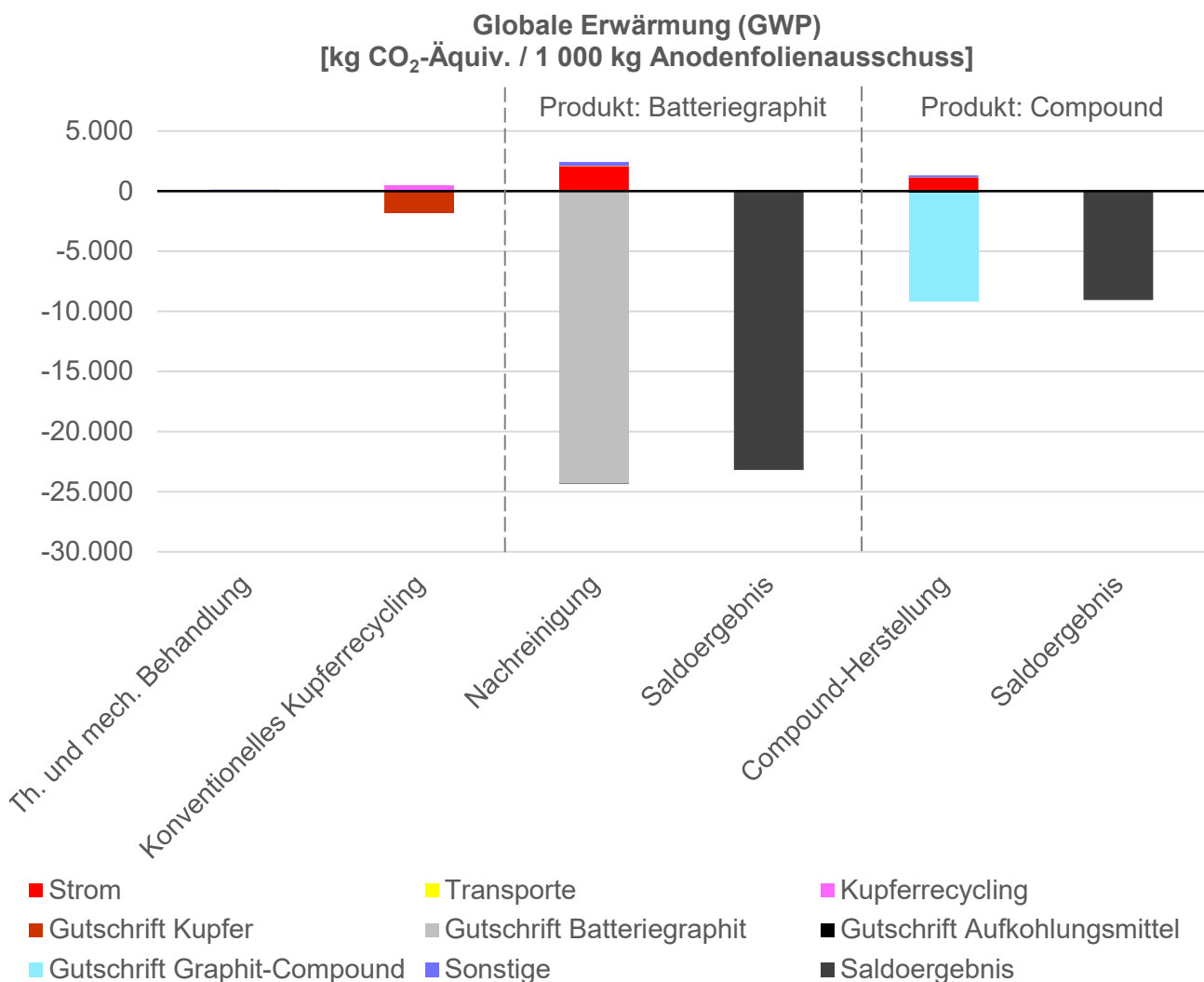
Zusätzlich zu den fünf Wirkungskategorien, für die das jeweilige Ökobilanzergebnis in den voranstehenden Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.5 grafisch dargestellt ist und diskutiert wird, wurde auch für über 20 weitere Wirkungskategorien – darunter Ökotoxizität und Humantoxizität, Landnutzung und Ozonabbau – überprüft, ob sich das generelle Ergebnis bestätigt. Die Ökobilanzergebnisse für alle berechneten Wirkungskategorien sind in Tabelle 5-2 (Anhang II) aufgeführt. Auffällig ist das nachteilige Ergebnis für die Wirkungskategorie Ökotoxizität, Frischwasser, das überwiegend auf den Proxy-Datensatz für das eingesetzte Lösemittel zurückzuführen ist. Vor diesem Hintergrund sollte eine genauere Überprüfung der Ökotoxizität des vom Fraunhofer IVV tatsächlich eingesetzten Lösemittels durchgeführt werden. Bei den übrigen Wirkungskategorien sind die zusätzlichen Umweltbe- und -entlastungen häufig ungefähr gleichgroß, was das uneindeutige Bild der Ergebnisse in den fünf grafisch dargestellten Wirkungskategorien bestätigt.

3.2 Anodenfolienausschuss

3.2.1 Globale Erwärmung

Das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie Globale Erwärmung (Global Warming Potential, GWP) ist in Abbildung 3-6 dargestellt.

Abbildung 3-6: Anodenfolienausschuss: LCA-Ergebnis Globale Erwärmung (GWP)



Lesehilfe: Im linken Bereich des Diagramms sind die Emissionen und Umweltentlastungen (Gutschriften) dargestellt, die mit der thermischen und mechanischen Behandlung des Anodenfolienausschusses sowie mit dem konventionellen Recycling des abgetrennten Kupfers verbunden sind. Diese Umweltauswirkungen sind für die unterschiedlichen betrachteten Recyclingrouten identisch. In der Mitte und im rechten Bereich des Diagramms sind die Umweltauswirkungen dargestellt, die sich aus den beiden alternativen Weiterverarbeitungsrouten des Rohgraphits (Zielprodukt: Batteriegraphit bzw. Produkt-Graphit-Compound, siehe Abbildung 1-2) ergeben.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Ergebnisse und Diskussion:

- Das Liberation-Recyclingverfahren führt unter den getroffenen Annahmen und bei den verwendeten Daten im Saldo zu Treibhausgaseinsparungen in Höhe von ca. 22.000 kg CO₂-Äquivalenten (Produkt: Batteriegraphit) bzw. ca. 9.000 kg CO₂-Äquivalenten (Produkt: Graphit-Compound).

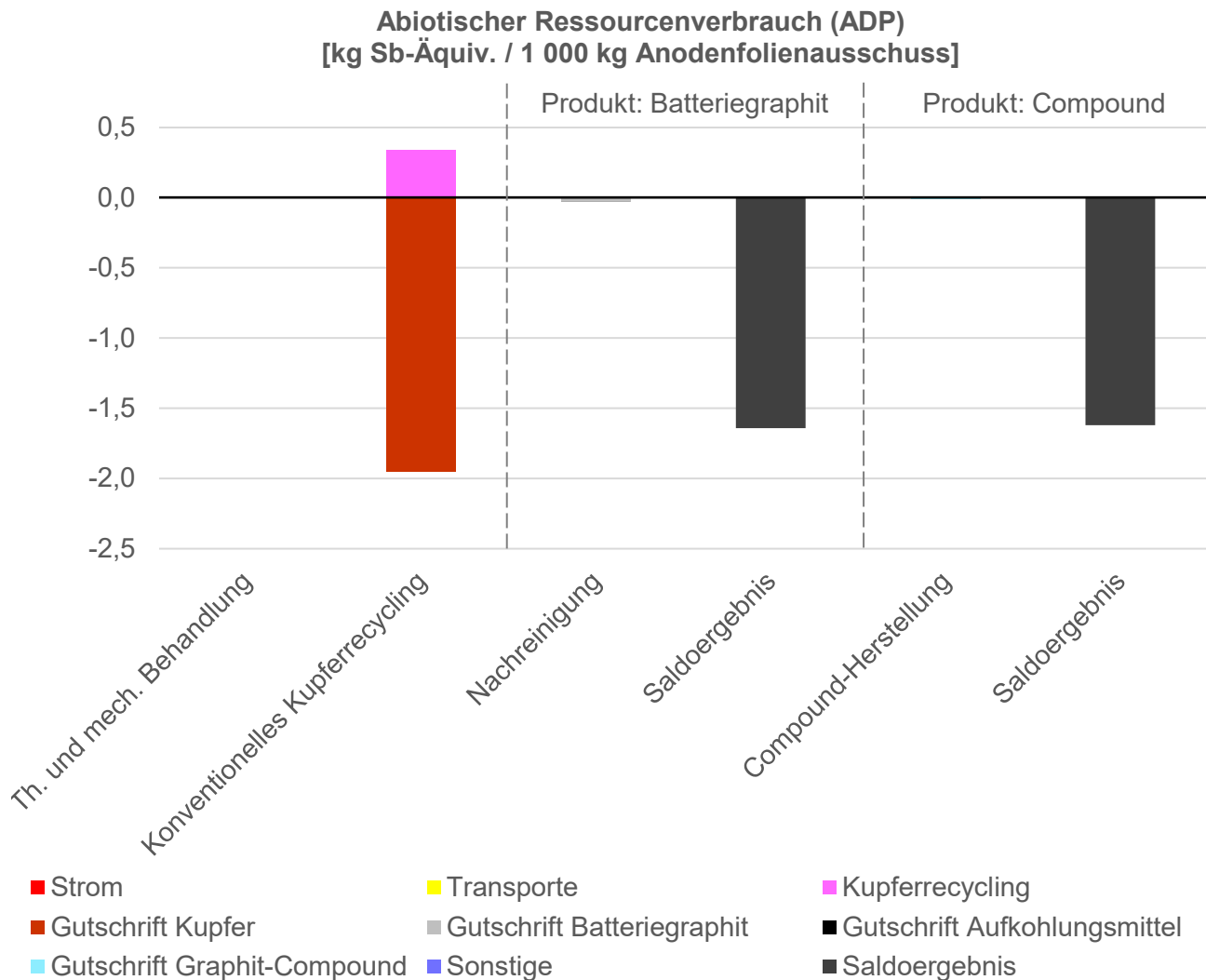
Compound), jeweils pro 1.000 kg Anodenfolienausschuss. Die Einsparungen sind etwa 9- (Batteriegraphit) bzw. 6-mal (Graphit-Compound) so groß wie die zusätzlichen Emissionen.

- Die Gutschrift für das ersetzte Graphitprodukt (Batteriegraphit bzw. Graphit-Compound) stellt in beiden Recyclingrouten jeweils den größten Einzelposten dar. Graphit in Batteriequalität unterliegt hohen Qualitätsanforderungen. Der zugrunde liegende ecoinvent-Datensatz bildet die Herstellung von synthetischem Graphit auf Basis von Industriedaten eines japanischen Unternehmens ab und liegt mit etwa 47 kg CO₂-Äq. / kg synthetischer Graphit (in Batteriequalität) deutlich über anderen Literaturwerten. Für den Graphit-Compound aus primärer Herstellungsrouten lag kein spezifischer Ökobilanzdatensatz vor, sondern es musste auf eine Experteneinschätzung zurückgegriffen werden hinsichtlich eines Äquivalenzfaktors zum Datensatz „market for graphite block“ (siehe Tabelle 1-4). Vor diesem Hintergrund ist in Kapitel 4.2.2.3 eine Sensitivitätsanalyse bzgl. des ersetzten Graphits aufgeführt.
- Die durch die thermische und mechanische Behandlung verursachten Emissionen sind von nachrangiger Relevanz. Sowohl für die Recyclingroute zur Herstellung von Batteriegraphit als auch zur Herstellung eines Graphit-Compounds stellt der Strombedarf den größten Einzelposten bei den zusätzlichen Emissionen dar. Die Graphittiegel, die bei der Herstellung des Batteriegraphits mit kontinuierlichem Durchsatz benötigt werden, und das Polypropylen, das bei der Herstellung des Graphit-Compounds eingesetzt wird, verursachen sichtbare, aber ebenfalls nachrangige zusätzliche Emissionen.
- CO₂ und CH₄ tragen am stärksten zu den Ergebnissen bei: Für die Batteriegraphit-Route machen sie 92 % bzw. 6 % der Emissionen und 90 % bzw. 8 % der Gutschriften aus, für die Graphit-Compound-Route 91 % bzw. 7 % der Emissionen und 90 % bzw. 9 % der Gutschriften.
- Auch mit dem nicht nachgereinigten Graphit (in der grafischen Darstellung des Produktsystems in Abbildung 1-2 als „Rohgraphit“ bezeichnet) wurde eine Testzelle hergestellt („Alternative Route mit Zielprodukt Batteriegraphit“), deren Performanz nicht deutlich niedriger lag als die der Referenzzelle aus primären Materialien. In dieser Route entfallen die nennenswerten zusätzlichen Emissionen, die durch den Strombedarf der Nachreinigung verursacht werden. Andererseits wäre auf die Gutschrift für ersetztes marktübliches Batteriegraphit mitunter noch ein moderater Abschlag vorzunehmen: Der Wert der Testzelle mit nicht nachgereinigtem Graphit für den hochrelevanten Indikator „initiale spezifische Entladekapazität“ betrug 131 mAh pro Gramm, während der Wert für die Zelle aus primärem Graphit 139 mAh pro Gramm betrug (Tauchert et al. 2026). Je nach Abschlag auf die Gutschrift würde sich eine moderate Verbesserung oder Verschlechterung im Vergleich zum oben dargestellten Ökobilanzergebnis (Abbildung 3-6) ergeben.

3.2.2 Abiotischer Ressourcenverbrauch

Das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch (Abiotic Depletion Potential, ADP) ist in Abbildung 3-7 dargestellt.

Abbildung 3-7: Anodenfolienausschuss: LCA-Ergebnis Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Ergebnisse und Diskussion:

- Das Liberation-Recyclingverfahren führt unter den getroffenen Annahmen und bei den verwendeten Daten in beiden Recyclingrouten (Batteriegraphit bzw. Graphit-Compound) im Saldo zu Umweltentlastungen in Höhe von etwa 1,5 kg Sb-Äquivalenten pro 1.000 kg Anodenfolienausschuss.
- Das Ergebnis wird stark vom konventionellen Kupferrecycling dominiert. Alle anderen Prozesse haben nahezu keine Relevanz für das dargestellte Ergebnis.
- Sowohl für die Batteriegraphit- als auch für die Graphit-Compound-Route gilt, dass Tellur, Kupfer und Gold mit 70 %, 12 % bzw. 4 % am stärksten zu den Gutschriften beitragen und dass ebenfalls Tellur, Kupfer und Gold mit 66 %, 16 % bzw. 4 % am stärksten zu den Lasten tragen beitragen.
- Methodischer Hintergrund: Die angewendeten Charakterisierungsfaktoren (Quantifizierung des Beitrags eines Stoffes zu einem Umweltproblem im Verhältnis zu einem Referenzstoff; hier:

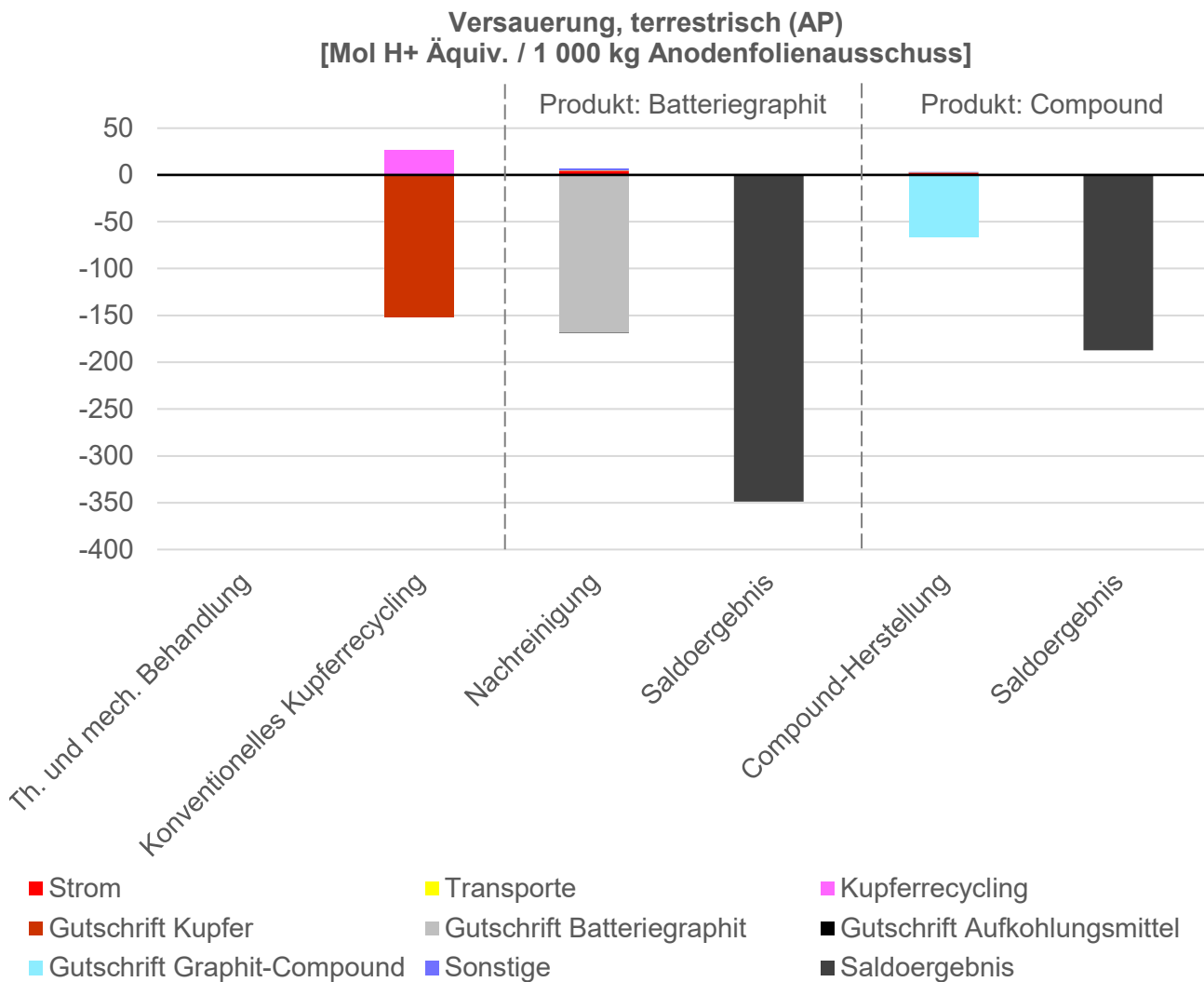
Abiotic Depletion Potential, ADP) berücksichtigen die Förderrate einer Ressource und deren Reserven. Dabei liegen mehrere Größenordnungen zwischen den ADP-Faktoren der Elemente. Der ADP-Faktor für Tellur beträgt beispielsweise 40,7, während der ADP-Faktor für Kupfer 0,00137 beträgt. So können sehr geringe Extraktionsmengen, beispielsweise bei den im Hintergrundsystem beteiligten Prozessen, sich stark auf das Ergebnis auswirken. Darüber hinaus umfasst der hier angewendete Satz an Charakterisierungsfaktoren (EF 3.1) keinen Wert für Kohlenstoff bzw. Graphit. Der Satz stammt ursprünglich aus der Erarbeitung vom CML im Jahr 1999. Kohlenstoff wurde dort wahrscheinlich nicht aufgenommen, weil er kein knappes Element in der Erdkruste darstellt. In einer Methodenaktualisierung aus dem Jahr 2020 weist das CML Kohlenstoff einen ADP-Faktor von 0,000038 zu (van Oers et al. 2020), womit das (in Form eines Tiegels als Input) eingesetzte bzw. das zurückgewonnene Graphit in obenstehender Abbildung voraussichtlich sichtbar, aber nicht entscheidend wäre.

- Der Kupfer-Datensatz aus der ecoinvent-Datenbank, der zur Darstellung der ersetzten marktüblichen Bereitstellung des Kupfers verwendet wird („GLO: market for copper, cathode“, siehe Tabelle 5-1), ist so modelliert, dass als Nebenprodukte des Kupferabbaus auch Tellur und Gold gewonnen werden. Der ADP-Faktor von Tellur bzw. Gold ist jeweils etwa 30.000-mal höher als der von Kupfer. Dadurch erklärt sich der hohe Beitrag von Tellur und Gold zum Ergebnis in dieser Wirkungskategorie.

3.2.3 Versauerung (terrestrisch)

Das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie Versauerung, terrestrisch (Acidification Potential, AP) ist in Abbildung 3-8 dargestellt.

Abbildung 3-8: Anodenfolienausschuss: LCA-Ergebnis Versauerung, terrestrisch (AP)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

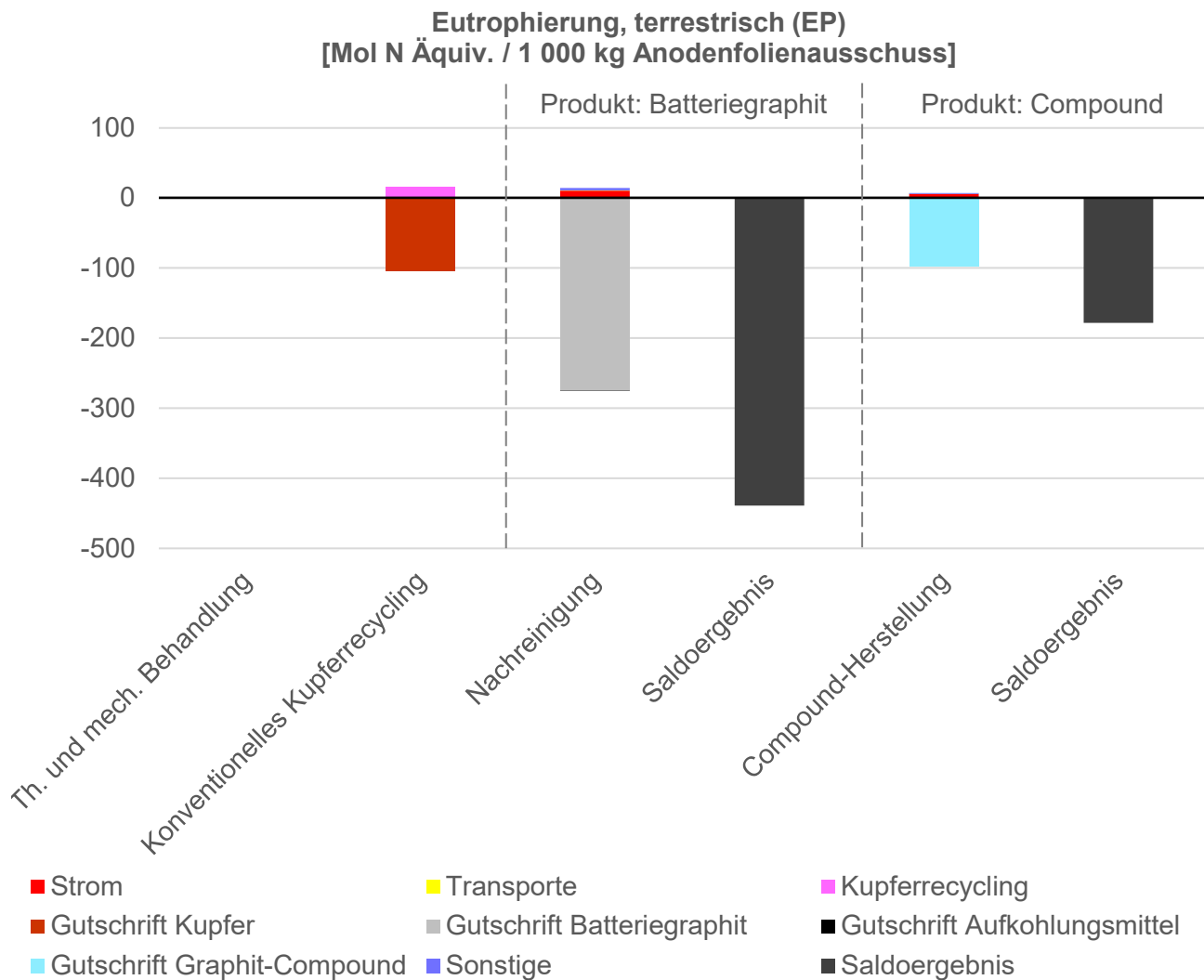
Ergebnisse und Diskussion:

- Das Liberation-Recyclingverfahren führt unter den getroffenen Annahmen und bei den verwendeten Daten im Saldo zu Umweltentlastungen in Höhe von etwa 350 Mol H⁺ Äquivalenten (Produkt: Batteriegraphit) bzw. 180 Mol H⁺ Äquivalenten (Produkt: Graphit-Compound) pro 1.000 kg Anodenfolienausschuss.
- Die Gutschriften für das Recycling-Kupfer und das Recycling-Graphit tragen am stärksten zum Gesamtergebnis bei. Die Gutschriften sind etwa 10-mal (Produkt: Batteriegraphit) bzw. 7-mal (Produkt: Graphit-Compound) so groß wie die Lasten.
- Für beide Recyclingrouten (Batteriegraphit bzw. Graphit-Compound) gilt, dass Schwefeldioxid, Stickoxide und Ammoniak am stärksten zum Ergebnis beitragen: Bei der Batteriegraphit-Route machen sie 84 %, 12 % bzw. 3 % der Lasten und 79 %, 18 % bzw. 2 % der Gutschriften aus. Bei der Graphit-Compound-Route machen sie 82 %, 10 % bzw. 3 % der Lasten und 80 %, 13 % bzw. 3 % der Gutschriften aus.

3.2.4 Eutrophierung (terrestrisch)

Das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie Eutrophierung, terrestrisch (Eutrophication Potential, terrestrial, EP) ist in Abbildung 3-9 dargestellt.

Abbildung 3-9: Anodenfolienausschuss: LCA-Ergebnis Eutrophierung, terrestrisch (EP)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Ergebnisse und Diskussion:

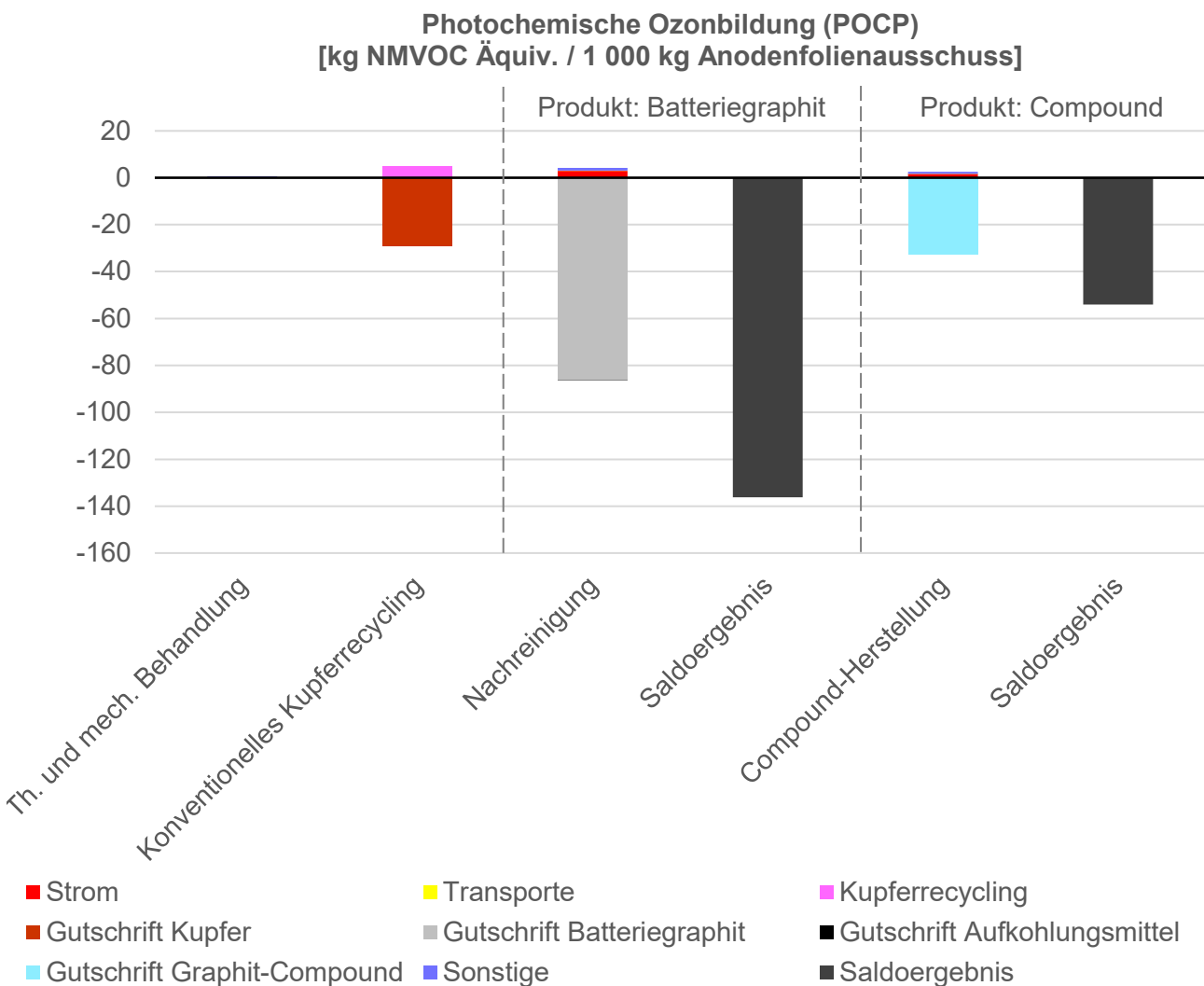
- Das Liberation-Recyclingverfahren führt unter den getroffenen Annahmen und bei den verwendeten Daten im Saldo zu Umweltentlastungen in Höhe von etwa 430 Mol N-Äquivalenten (Produkt: Batteriegraphit) bzw. 180 Mol N-Äquivalenten (Produkt: Graphit-Compound) pro 1.000 kg Anodenfolienausschuss.
- Die Gutschriften für das Recycling-Kupfer und das Recycling-Graphit tragen am stärksten zum Gesamtergebnis bei. Die Gutschriften sind etwa 12-mal (Produkt: Batteriegraphit) bzw. 8-mal (Produkt: Graphit-Compound) so groß wie die Lasten.

- Für beide Recyclingrouten (Batteriegraphit bzw. Graphit-Compound) gilt, dass Stickoxide und Ammoniak am stärksten zum Ergebnis beitragen: Bei der Batteriegraphit-Route machen sie 84 % bzw. 13 % der Lasten und 91 % bzw. 8 % der Gutschriften aus. Bei der Graphit-Compound-Route machen sie 82 % bzw. 16 % der Lasten und 84 % bzw. 15 % der Gutschriften aus.

3.2.5 Photochemische Ozonbildung

Das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie Photochemische Ozonbildung (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP) ist in Abbildung 3-10 dargestellt.

Abbildung 3-10: Anodenfolienausschuss: LCA-Ergebnis Photochemische Ozonbildung (POCP)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Ergebnisse und Diskussion:

- Das Liberation-Recyclingverfahren führt unter den getroffenen Annahmen und bei den verwendeten Daten im Saldo zu Umweltentlastungen in Höhe von etwa 140 kg NMVOC-

Äquivalenten (Produkt: Batteriegraphit) bzw. 50 kg NMVOC-Äquivalenten (Produkt: Graphit-Compound) pro 1.000 kg Anodenfolienausschuss.

- Die Gutschriften für das Recycling-Kupfer und das Recycling-Graphit tragen am stärksten zum Gesamtergebnis bei. Die Gutschriften sind etwa 12-mal (Produkt: Batteriegraphit) bzw. 8-mal (Produkt: Graphit-Compound) so groß wie die Lasten.
- Für beide Recyclingrouten (Batteriegraphit bzw. Graphit-Compound) gilt, dass Stickoxide, NMVOC und Schwefeldioxid am stärksten zum Ergebnis beitragen: Bei der Batteriegraphit-Route machen sie 62 %, 13 % bzw. 17 % der Lasten und 70 %, 14 % bzw. 13 % der Gutschriften aus. Bei der Graphit-Compound-Route machen sie 56 %, 20 % bzw. 19 % der Lasten und 64 %, 16 % bzw. 15 % der Gutschriften aus.

3.2.6 Weitere Wirkungskategorien

Zusätzlich zu den fünf Wirkungskategorien, für die das jeweilige Ökobilanzergebnis in den voranstehenden Kapiteln 3.2.1 bis 3.2.5 grafisch dargestellt ist und diskutiert wird, wurde auch für über 20 weitere Wirkungskategorien – darunter Ökotoxizität und Humantoxizität, Landnutzung und Ozonabbau – überprüft, ob sich das generelle Ergebnis bestätigt. Die Ökobilanzergebnisse für alle berechneten Wirkungskategorien sind in Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 (Anhang II) aufgeführt. Es ergeben sich für den Standardfall unter den getroffenen Annahmen und bei den verwendeten Daten im Saldo stets Umweltvorteile. Abgesehen von den Wirkungskategorien Ionising radiation, Climate Change, biogenic und Climate Change, land use and land use change sind die Gutschriften stets mindestens 4-mal so groß wie die Lasten.

4 Auswertung

4.1 Identifizierung der signifikanten Parameter

Es werden die folgenden Parameter identifiziert, die sowohl hinsichtlich des Recyclings des Kathodenfolienausschusses als auch für das Recycling des Anodenfolienausschusses gültig sind:

- Der gewählte End-of-Life-Allokationsansatz (Cut-Off), bei dem der Folienausschuss ohne Umweltbelastungen in die Systemgrenze eingeht. Die Herstellung neuer Batterien ist mit hohen Umweltlasten verbunden. Würde dem Folienausschuss aufgrund seiner enthaltenen Wertstoffe ein Teil dieser Lasten zugeschrieben, würden sich diese Lasten stark auf die in Kapitel 3 dargestellten Ökobilanzergebnisse auswirken.
- Die vorgenommene Anpassung der Werte, die von den Liberation-Verbundpartnern bzw. dem Fraunhofer ISC im Rahmen der Versuche gemessen wurden, auf einen industriellen Maßstab, da zwischen den Messwerten und den angesetzten Werten teilweise mehr als ein Faktor 10 liegt und die entsprechenden Parameter teilweise nennenswerte Einzelbeiträge zu den Lasten in den unterschiedlichen Wirkungskategorien darstellen.

Hinsichtlich des Recyclings des Kathodenfolienausschusses werden darüber hinaus die folgenden signifikanten Parameter identifiziert:

- Die Menge an ersetzttem marktüblichem Kathodenaktivmaterial pro Kilogramm Recyclingaktivmaterial, da die Gutschrift für das ersetzte marktübliche Kathodenaktivmaterial in den meisten Wirkungskategorien den größten Einzelbeitrag zu den Gutschriften darstellt, siehe Tabelle 1-3.
- Die eingesetzten Chemikalien und der Stromverbrauch bei der Nachreinigung, da die damit verbundene Last in den meisten Wirkungskategorien den größten Einzelbeitrag zu den Lasten darstellt.

Hinsichtlich des Recyclings des Anodenfolienausschusses werden – über die oben genannten sowohl für das Recycling des Kathoden- als auch des Anodenfolienausschusses gültigen signifikanten Parameter hinausgehend – die folgenden signifikanten Parameter identifiziert:

- Der Ökobilanzdatensatz zur Abbildung des potenziell zu ersetzenden Markt-Graphits, der im Standardfall der ecoinvent-Datenbank entnommen ist, der allerdings deutlich größere Umweltlasten ausweist als andere Literaturdaten, was sich vorteilhaft auf das Umweltergebnis des hier untersuchten Recyclingprozesses auswirkt (siehe die Sensitivitätsanalyse in Kapitel 4.2.2.3). Der ecoinvent-Datensatz bildet synthetischen Graphit ab. Daneben wird allerdings weiterhin auch natürlicher Graphit in Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt, dessen Herstellung tendenziell mit geringeren Umweltlasten verbunden ist.
- Die Menge an ersetzttem marktüblichem Graphit pro Kilogramm Recycling-Graphit, da die Gutschrift für das ersetzte marktübliche Graphit in den meisten Wirkungskategorien den größten oder zweitgrößten Einzelbeitrag zu den Gutschriften darstellt. Hinsichtlich des Batteriegraphits ist vergleichsweise klar, dass eine massenmäßige 1:1-Ersetzung von marktüblichem Graphit gerechtfertigt ist; hinsichtlich des Graphit-Compounds bestehen Unsicherheiten, da kein repräsentativer Ökobilanzdatensatz für Graphit-Compounds gefunden wurde, siehe Tabelle 1-4.

- Der Stromverbrauch beim Verbundpartner CTG bei der Nachreinigung bzw. Compound-Herstellung, da die damit verbundene Last in den meisten Wirkungskategorien den größten oder zweitgrößten Einzelbeitrag zu den Lasten darstellt.

4.2 Beurteilung

4.2.1 Vollständigkeitsprüfung

Das Lösemittel, das das Fraunhofer IVV zur Separierung des Kathodenaktivmaterials von der Trägerfolie einsetzt, wurde aus Vertraulichkeitsgründen in dieser Ökobilanz lediglich mit einem Proxy-Datensatz abgebildet.

Davon abgesehen konnten alle Prozesse, die im Rahmen der Festlegung des Untersuchungsrahmens als Teil der analysierten Produktsysteme definiert wurden, hinsichtlich ihrer stofflichen und energetischen Inputs und Outputs berücksichtigt werden. Bei allen Prozessen hat das Öko-Institut sichergestellt, dass die Summe der Inputs und die Summe der Outputs übereinstimmen.

Hinweis: Die Batterieproduktion ist nicht Teil der analysierten Produktsysteme. Die Folienausschüsse treten ohne Umweltbelastungen in das analysierte System ein. Die Verwendung aller im Rahmen des Liberation-Recyclingverfahrens zurückgewonnenen Produkte ist ebenfalls aus den Systemgrenzen ausgeschlossen, insbesondere die potenzielle Herstellung neuer Batterien unter Einsatz des Recycling-Kathodenaktivmaterials bzw. des Recycling-Graphits.

4.2.2 Sensitivitätsprüfung

4.2.2.1 „Perspektivische“ stoffliche Zusammensetzung der Folienausschüsse

Die im Standardfall angesetzte stoffliche Zusammensetzung entspricht der von den Verbundpartnern gemessenen Zusammensetzung der Folienausschüsse. Wie in Kapitel 1.2.2 beschrieben, geht der Trend bei neueren Batterien dahin, den Anteil des Aktivmaterials zu erhöhen, sodass sich der Aluminium- bzw. Kupferanteil entsprechend reduziert. Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Sensitivitätsanalyse untersucht, wie sich eine eher „perspektivische“ stoffliche Zusammensetzung der Folienausschüsse auf die Ökobilanzergebnisse auswirken würde. Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 fassen die entsprechenden Werte zusammen.

Tabelle 4-1: Stoffliche Zusammensetzung des Kathodenfolienausschusses: Standardfall und „perspektivische“ Zusammensetzung

Stoff	Materialanteil Standardfall	Materialanteil „perspektivisch“
Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC) 622 (inklusive Leitruf)	48,5 %	75,0 %
Aluminium	48,5 %	22,0 %
Binder (Polyvinylidenfluorid, PVDF)	3,0 %	3,0 %

Quelle: Öko-Institut e.V. auf Basis von Angaben des Fraunhofer IVV und der Accurec Recycling GmbH

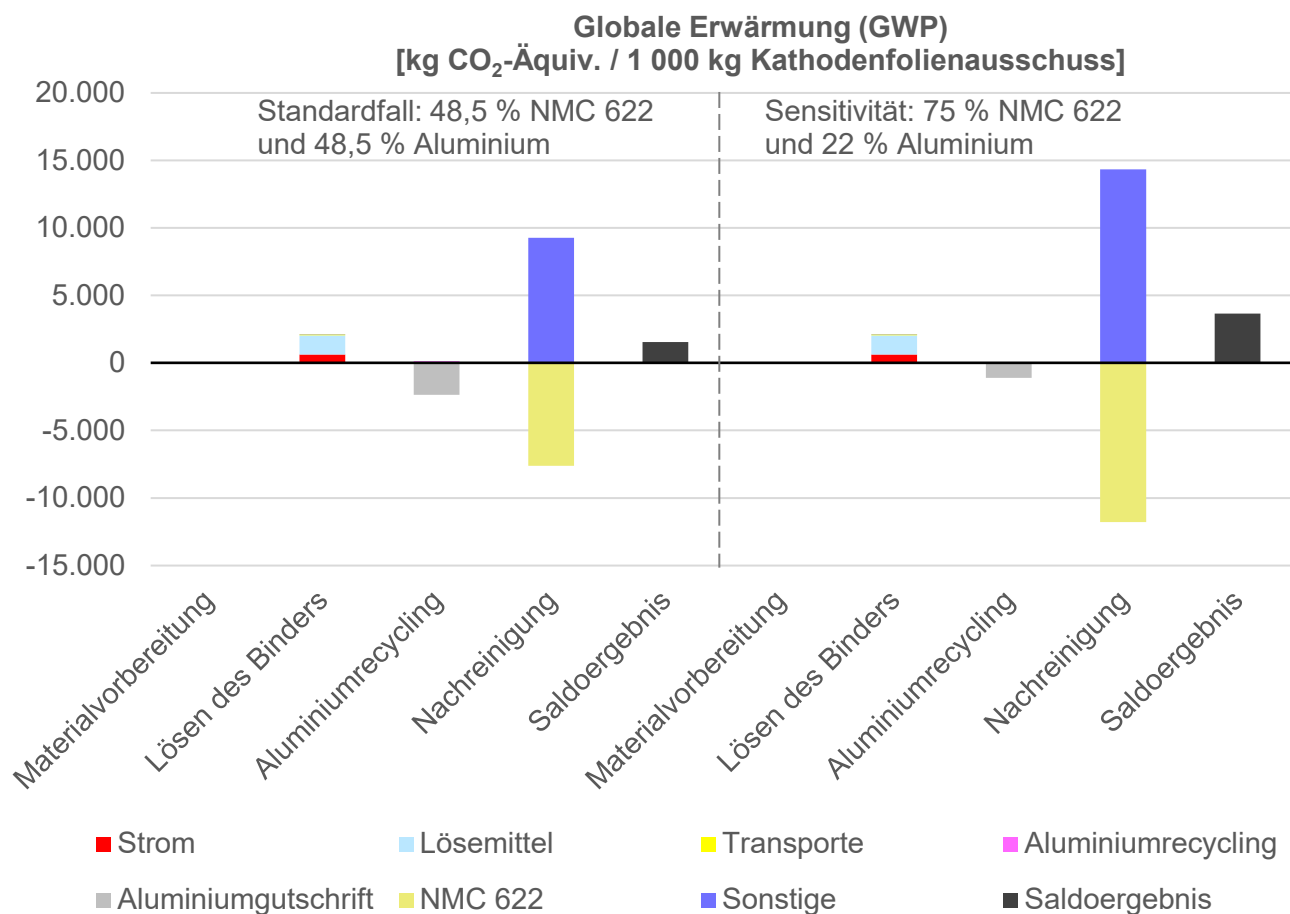
Tabelle 4-2: Stoffliche Zusammensetzung des Anodenfolienausschusses: Standardfall und „perspektivische“ Zusammensetzung

Stoff	Materialanteil Standardfall	Materialanteil „perspektivisch“
Graphit	55 %	75 %
Kupfer	40 %	20 %
Binder (Natrium-Carboxymethylcellulose (Na-CMC), Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR))	5 %	5 %

Quelle: Öko-Institut e.V. auf Basis von Angaben der Accurec Recycling GmbH

Abbildung 4-1 stellt dar, wie sich das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie GWP verändert, wenn der Kathodenfolienausschuss zu 75 % (rechte Seite des Diagramms) anstatt zu 48,5 % (linke Seite des Diagramms) aus NMC 622 besteht.

Abbildung 4-1: Sensitivitätsanalyse: „perspektivische“ stoffliche Zusammensetzung des Kathodenfolienausschusses (75 % NMC 622 anstatt 48,5 %): LCA-Ergebnis Globale Erwärmung (GWP)



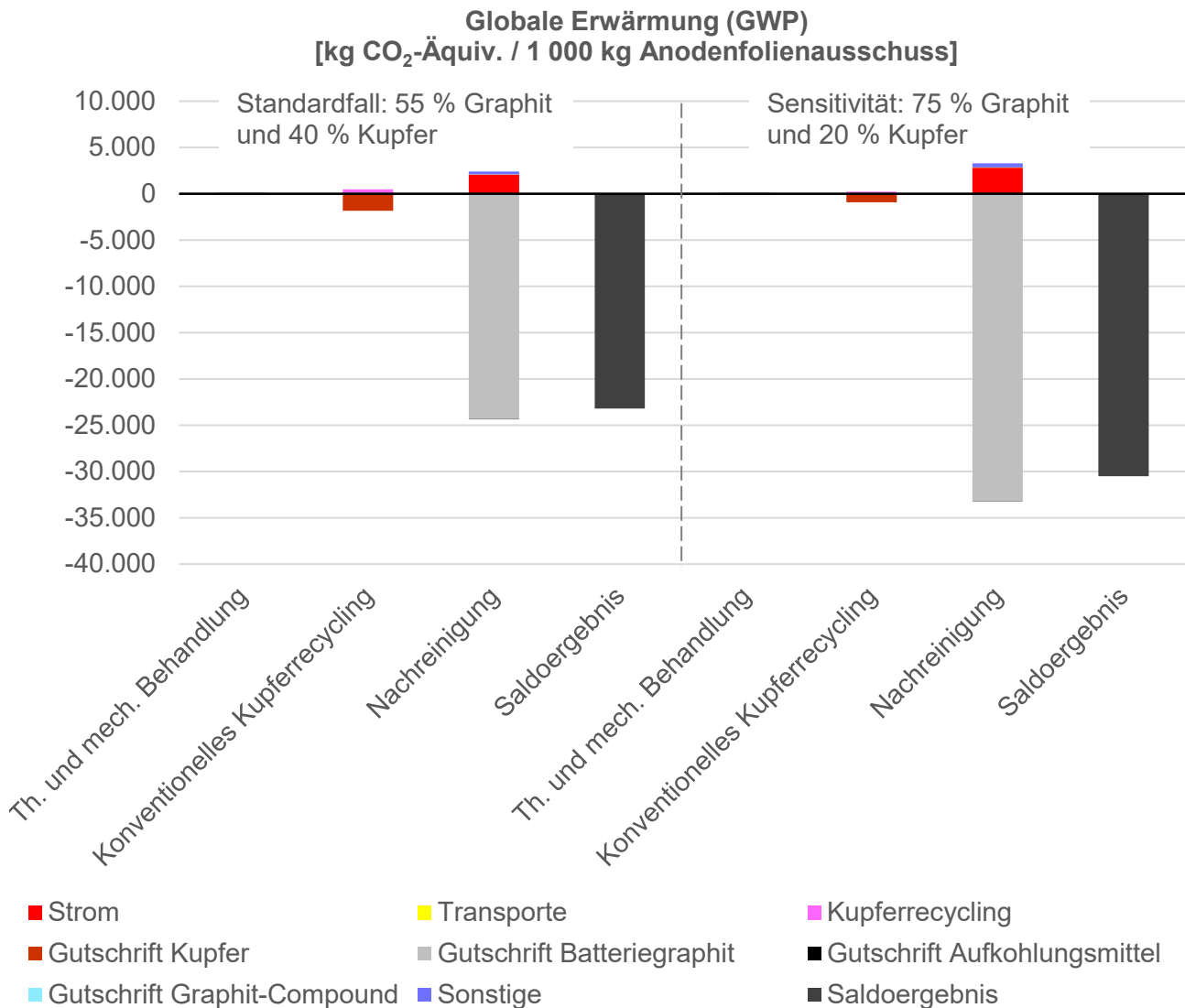
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Ergebnisse und Diskussion:

- Erwartungsgemäß steigen mit einem höheren Anteil des Kathodenaktivmaterials auch die mit der Nachreinigung verbundenen Emissionen bzw. die mit der Gewinnung des Recycling-Kathodenaktivmaterials verbundenen Gutschriften an. Da mit der Nachreinigung im Standardfall höhere Emissionen als Gutschriften verbunden sind, verschlechtert sich das Ökobilanzergebnis.
- Wenn es gelingt, die Lasten, die mit der Nachreinigung verbunden sind, so weit zu senken, dass sie niedriger sind als die Gutschrift für das Recycling-Kathodenaktivmaterial, könnte ein höherer Anteil an Kathodenaktivmaterial am Folienausschuss zu einer Verbesserung des Ökobilanzergebnisses führen.

Abbildung 4-2 stellt für die Recyclingroute des Anodenfolienausschusses mit dem Zielprodukt Batteriegraphit dar, wie sich das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie GWP verändert, wenn der Anodenfolienausschuss zu 75 % (rechte Seite des Diagramms) anstatt zu 55 % (linke Seite des Diagramms) aus Graphit besteht.

Abbildung 4-2: Sensitivitätsanalyse: „perspektivische“ stoffliche Zusammensetzung des Anodenfolienausschusses (75 % Graphit anstatt 55 %): LCA-Ergebnis Globale Erwärmung (GWP) für die Anodenfolienausschuss-Recyclingroute „Batteriegraphit“



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

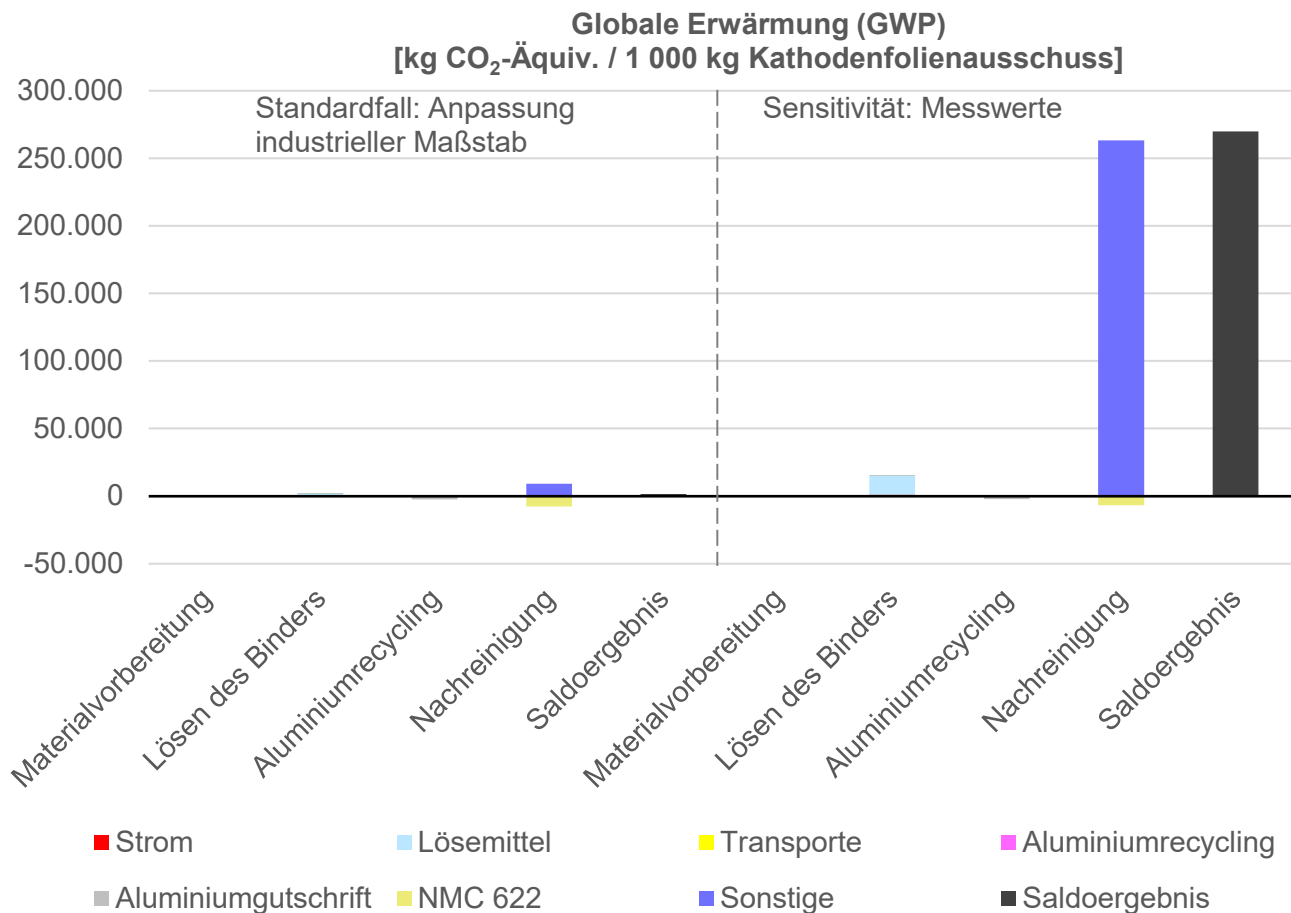
Ergebnisse und Diskussion:

- Erwartungsgemäß steigen mit einem höheren Anteil des Graphits am Anodenfolienausschuss auch die für den Recycling-Graphit zu verbuchenden Gutschriften an. Das ohnehin bereits eindeutig vorteilhafte Ergebnis wird noch vorteilhafter.
- Für die Recycling-Route mit dem Zielprodukt „Graphit-Compound“ sowie für andere Wirkungskategorien (beides hier nicht grafisch dargestellt) sind die Auswirkungen auf das Ökobilanzergebnis weniger deutlich, aber in keinem Fall ergibt sich dadurch im Saldo ein nachteiliges Ergebnis.

4.2.2.2 Keine Anpassung auf industriellen Maßstab

Abbildung 4-3 stellt für das Recycling des Kathodenfolienausschusses dar, wie sich das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie GWP verändert, wenn die Sachbilanzdaten nicht auf einen industriellen Maßstab angepasst werden. Dadurch soll dargestellt werden, wie sensibel das Ökobilanzergebnis auf die eingesetzten Mengen reagiert.

Abbildung 4-3: Sensitivitätsanalyse: keine Anpassung auf industriellen Maßstab: LCA-Ergebnis Globale Erwärmung (GWP)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Ergebnisse und Diskussion:

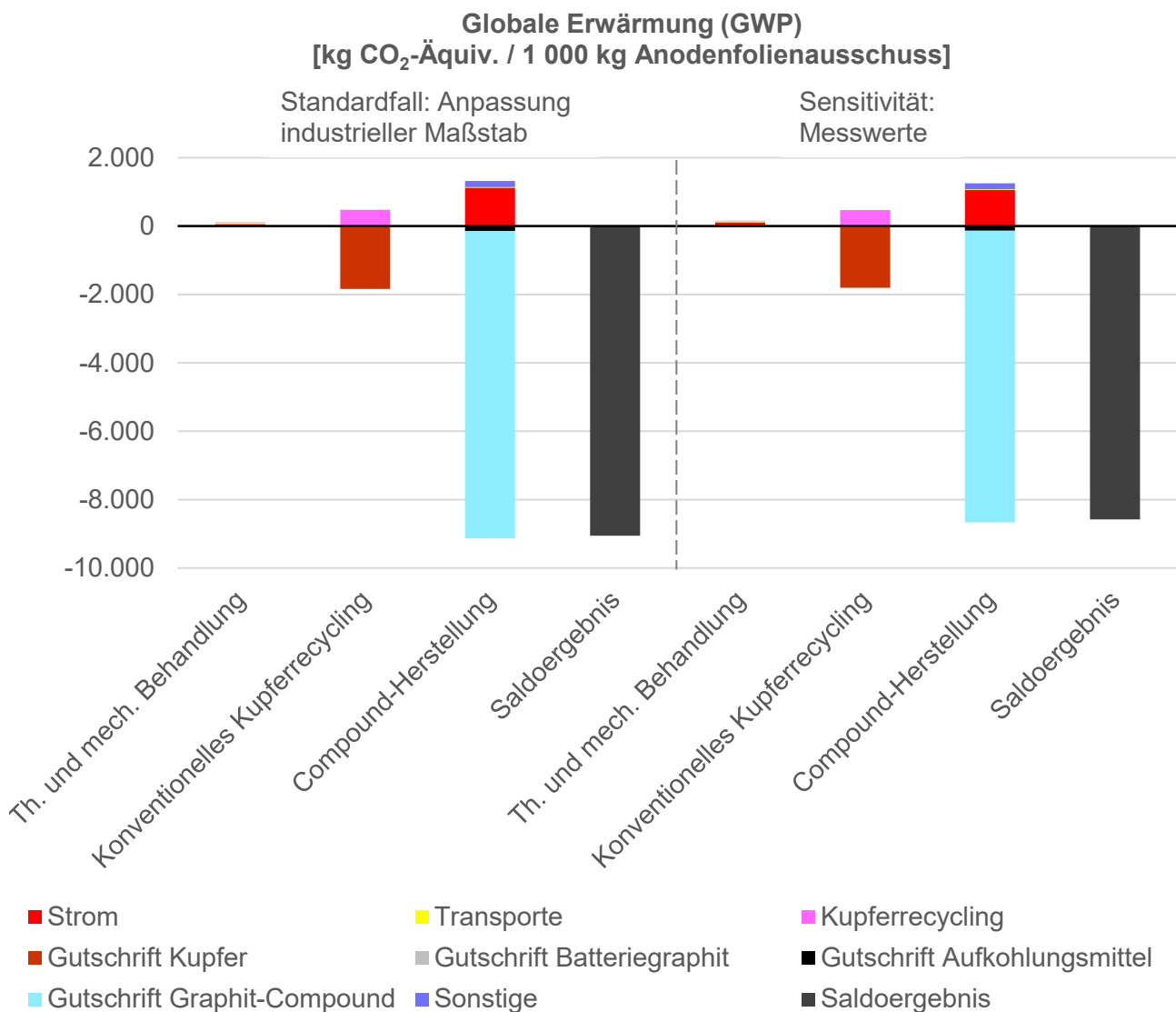
- Ohne eine Anpassung der Sachbilanzdaten auf einen industriellen Maßstab fällt das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie GWP eindeutig nachteilig aus. Nicht nur die Emissionen, die mit der Nachreinigung verbunden sind, übersteigen die Gutschrift für das ersetzte marktübliche Kathodenaktivmaterial um ein Vielfaches. Auch die Emissionen, die mit dem Einsatz des Lösemittels verbunden sind, sind ohne eine Anpassung auf einen industriellen Maßstab höher als die Gutschrift für das ersetzte marktübliche Kathodenaktivmaterial.
- Die Sensitivität veranschaulicht insbesondere, dass die Nachreinigung des Kathodenaktivmaterials in sehr kleinem Maßstab erfolgte (7 Gramm Probe) und entsprechend hohe Material- und Energieeinsätze pro funktioneller Einheit zu verbuchen sind. Sie

veranschaulicht auch, dass das Gesamtergebnis vor dem Hintergrund der Anpassung der Messwerte auf einen großtechnischen Maßstab hinsichtlich der Nachreinigung mit nennenswerten Unsicherheiten verbunden ist.

- Hinsichtlich des Lösemittels ist der im Vergleich zum Standardfall um einen Faktor 10 erhöhte Materialeinsatz auf sicherheitsbezogene Abwägungen beim Betrieb der Multi-Purpose-Anlage zurückzuführen. Die Temperierung und Kreislaufführung des Lösemittels wäre auf einer großtechnischen Anlage problemlos umsetzbar.

Abbildung 4-4 stellt für die Recyclingroute des Anodenfolienausschusses mit dem Zielprodukt Graphit-Compound dar, wie sich das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie GWP verändert, wenn die Sachbilanzdaten nicht auf einen industriellen Maßstab angepasst werden.

Abbildung 4-4: Sensitivitätsanalyse: keine Anpassung auf industriellen Maßstab: LCA-Ergebnis Globale Erwärmung (GWP) für die Anodenfolienausschuss-Recyclingroute „Graphit-Compound“



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Ergebnisse und Diskussion:

- Ohne eine Anpassung der Sachbilanzdaten auf einen industriellen Maßstab verschlechtert sich das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie GWP lediglich um etwa 5 %.
- Es wird deutlich, dass die am Recycling des Anodenfolienausschusses beteiligten Verbundpartner (Accurec und CTG) bereits in größeren Maßstäben gearbeitet haben.

4.2.2.3 Datensatz Graphit

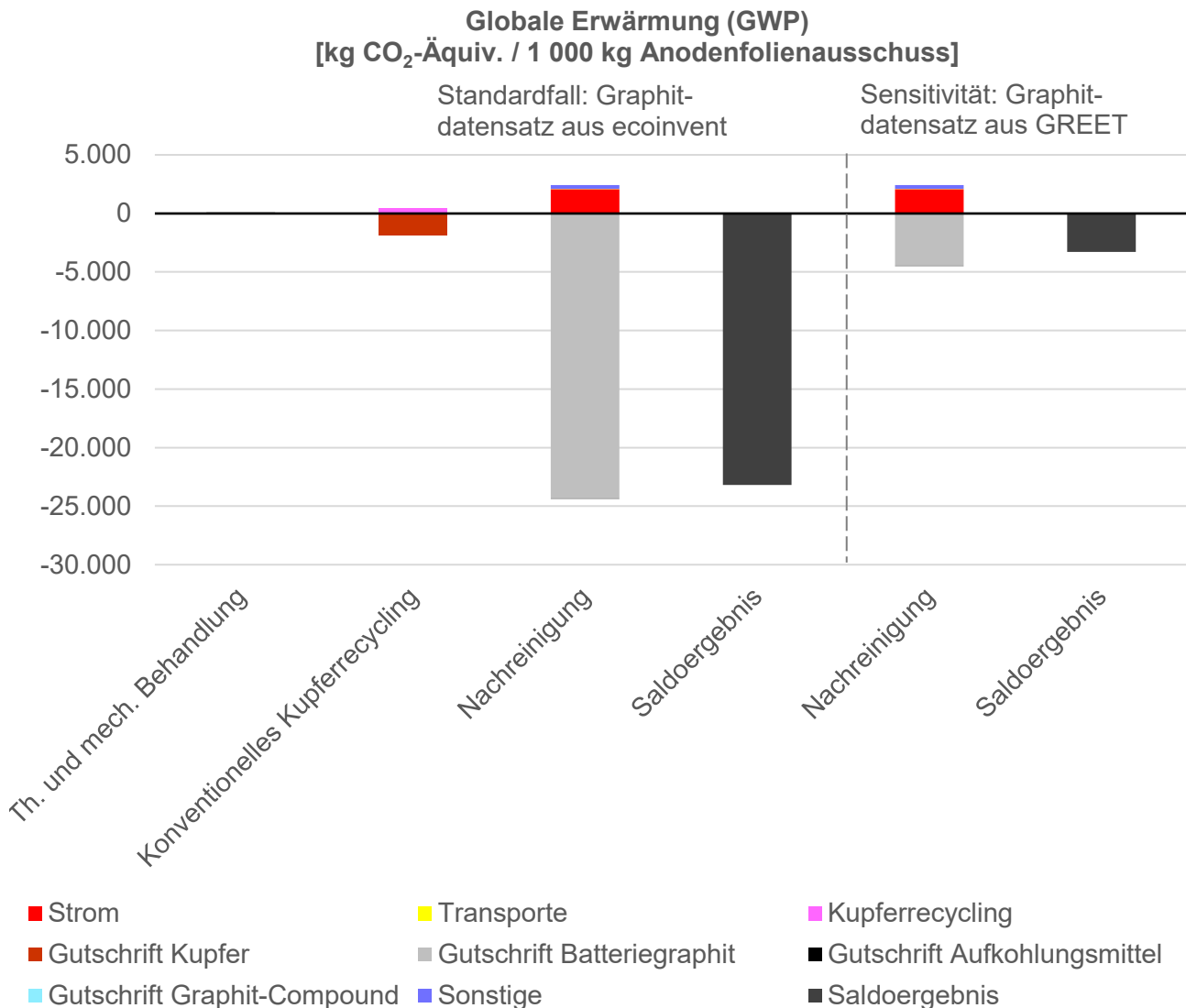
Durch das Recycling des Anodenfolienausschusses kann Graphit zurückgewonnen werden, der potenziell die Herstellung marktüblichen Graphits ersetzen kann. Der marktübliche Graphit ist in dieser Ökobilanz standardmäßig mit Datensätzen aus der ecoinvent-Datenbank abgebildet („CN: synthetic graphite production, battery grade, via Acheson powder route“; „CN: market for graphite block“; siehe Tabelle 5-1). Wie in Kapitel 3.2.1 erwähnt, sind die damit verbundenen Emissionen hoch im Vergleich zu anderen Literaturdaten: Während der ecoinvent-Datensatz „CN: synthetic graphite production, battery grade, via Acheson powder route“ einen GWP-Wert von 47 kg CO₂-Äq. / kg Graphit (EF 3.1: Climate Change – total) aufweist, liegen andere Literaturdaten bei ca. 5 – 15 kg CO₂-Äq. / kg Graphit (Engels et al. 2022).

Der ecoinvent-Datensatz, der in dieser Ökobilanzstudie zur Abbildung von Graphit in Batteriequalität verwendet wird, basiert auf einer Studie von Sphera Solutions aus dem Jahr 2024 und bildet die Herstellung von synthetischem Graphit auf Basis von Industriedaten eines graphitproduzierenden Unternehmens (Tokai Carbon Group) in Japan und Korea ab. Neben der Veröffentlichung in der ecoinvent-Datenbank wurde auch ein Artikel im Journal of Energy Storage veröffentlicht (Carrère et al. 2024). Die Autor*innen rechtfertigen die hohen Umweltbelastungen im Vergleich zu anderen Literaturdaten u. a. damit, dass die Acheson Powder Route mittlerweile weiter verbreitet ist als die Acheson Block Route und mit höheren Umweltbelastungen verbunden ist und dass in ihrer Sachbilanz auch der Tiegel aus Graphit berücksichtigt ist, der als Gefäß bei der Graphitprozessierung benötigt wird und dessen Herstellung mit nennenswerten Lasten verbunden ist.

Diese Argumente greifen auch Gorman et al. (2025) in ihrer Diskussion zum CO₂-Fußabdruck von Graphit auf, halten auf Basis der Studien von Minviro (2024) und Wang et al. (2025) allerdings dagegen, dass die von Carrère et al. (2024) angesetzten Materialverluste und der Bedarf an Tiegeln sowie der CO₂-Fußabdruck des eingesetzten Stroms hoch und global gesehen nicht repräsentativ sind.

Unbestritten ist, dass der Datensatz von Carrère et al. (2024) im Vergleich zu anderen aktuellen LCA-Datensätzen für Graphit mit Abstand die höchsten CO₂-Emissionen ausweist, was zu hohen Gutschriften des Anodenfolienrecyclings führt. Vor diesem Hintergrund stellt Abbildung 4-5 dar, wie sich das Ökobilanzergebnis für die Wirkungskategorie GWP verändert, wenn bei der Recyclingroute des Anodenfolienausschusses, deren Zielprodukt Batteriegraphit ist, nicht der Datensatz von Carrère et al. 2024, sondern der Datensatz des GREET Models zu natürlichem Graphit angesetzt wird. Der CO₂-Fußabdruck zu diesem Datensatz beträgt 8,6 kg CO₂-Äq. / kg natürlichem Graphit und liegt damit am unteren Ende der Bandbreite, die Wang et al. (2025) für Graphit aus China bestimmt haben.

Abbildung 4-5: Sensitivitätsanalyse Graphit-Datensatz: Anodenfolienausschuss (Zielprodukt Batteriegraphit): LCA-Ergebnis Globale Erwärmung (GWP)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Ergebnisse und Diskussion:

- Wird für das potenziell zu ersetzende Markt-Graphit der Datensatz des GREET Modells anstatt des ecoinvent-Datensatzes verwendet, sind nur noch deutlich geringere Gutschriften für den Recyclingprozess zu verbuchen. Das Saldoergebnis bleibt vorteilhaft, allerdings ist die Gesamtgutschrift lediglich noch etwa doppelt so groß wie die Gesamtlast (Standardfall: etwa Faktor 9).

4.2.3 Konsistenzprüfung

Sämtliche verwendeten Ökobilanzdatensätze entstammen der ecoinvent-Datenbank, Version 3.11, Cut-Off. Somit herrscht Konsistenz hinsichtlich der verwendeten Datenbank und hinsichtlich des angesetzten End-of-Life-Allokationsansatzes (Cut-Off), siehe auch Kapitel 1.2.6.

Die Klassifizierung und Charakterisierung erfolgte einheitlich nach der Wirkungsabschätzungsmethode des JRC (Environmental Footprint, Version 3.1).

Alle Daten des Vordergrundsystems wurden in einem einheitlichen Prozess von denselben zwei Personen am Öko-Institut auf Plausibilität geprüft.

Die Repräsentativität der Daten, insbesondere die Anpassung der teilweise im Labormaßstab erhobenen Messwerte auf einen industriellen Maßstab, ist in Kapitel 2.3 diskutiert. Der geographische Bezug der verwendeten Sachbilanzdatensätze ist in vielen Fällen nicht Deutschland. Außerdem wurde das vom Fraunhofer IVV eingesetzt Lösemittel lediglich mit einem Proxy-Datensatz abgebildet.

Systemgrenzen und funktionelle Einheit sind für die untersuchten Produktsysteme konsistent.

Detailtiefe, Systemgrenzen und Datenqualität sind geeignet, um das dieser Ökobilanzstudie zugrundeliegende Ziel zu erreichen (siehe Kapitel 1.1).

4.3 Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen

4.3.1 Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser Ökobilanz zum Liberation-Recyclingverfahren von Folienausschüssen, die bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien anfallen (Kathodenfolienausschuss und Anodenfolienausschuss), wurde untersucht, welche Umweltvor- und -nachteile mit den Recyclingprozessen verbunden sind und welche Prozesse am stärksten zu den Ökobilanzergebnissen in den jeweiligen Wirkungskategorien beitragen.

Sachbilanz und Wirkungsabschätzung wurden jeweils separat für das Recycling des Kathodenfolienausschusses bzw. des Anodenfolienausschusses erstellt. Vor diesem Hintergrund werden auch separate Schlussfolgerungen gezogen.

Bezüglich des Recyclings des Kathodenfolienausschusses lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Selbst bei einem lastenfreien Eingang des Kathodenfolienausschusses und bei einer Anpassung der gemessenen Inputs auf einen industriellen Maßstab sind Umweltvorteile für ein Direktrecycling des Aktivmaterials nicht zwangsläufig gegeben. Es ist zu berücksichtigen, dass die Anpassung der Sachbilanzdaten auf einen industriellen Maßstab konservativ erfolgte und deutlich größere Effizienzgewinne denkbar sind. Diese sollten entsprechend bei einer potenziellen zukünftigen Implementierung auch angestrebt werden, um ein vorteilhaftes Ökobilanzergebnis zu erzielen. Das Ökobilanzergebnis könnte allerdings auch noch schlechter ausfallen, wenn beispielsweise NMC-Folienausschüsse mit geringeren Nickelgehalten (z. B. NMC 532 oder NMC 111) oder LFP-Folienausschuss prozessiert werden.
- Der Kernansatz des Liberation-Projekts bestand hinsichtlich des Kathodenfolienausschusses darin, mithilfe eines innovativen Lösemittels den Binder zu lösen, sodass sich Kathodenaktivmaterial und Aluminiumfolie besser trennen und in hochwertigere Recyclingprozesse überführen lassen. Es wurde erfolgreich demonstriert, dass dieser Kernansatz praktikabel ist. Sofern es gelingt, die Menge des einzusetzenden Lösemittels gegenüber der Umsetzung im Technikumsmaßstab so zu verringern, wie in dieser Ökobilanz im Standardfall

angesetzt wurde, sind die mit dem Lösemiteleinsatz verbundenen Umweltlasten vertretbar. Dennoch reduziert der Lösemiteleinsatz die potenziellen Gutschriften auch im Standardfall (Anpassung der Messwerte auf einen industriellen Maßstab) in einem nennenswerten Umfang.

- Die empirische Basis zur Bewertung der Qualität des Recycling-Kathodenaktivmaterials, die im Rahmen des Liberation-Projekts erhoben werden konnte, beschränkt sich auf eine 7 Gramm Probe, die zur Herstellung von einer Testzelle genutzt wurde. Auch nach der Nachreinigung des Kathodenaktivmaterials war die Performanz der Testzelle gering, was in der Sachbilanz in einem nennenswerten Abschlag auf die Gutschrift für ersetztes, marktübliches Kathodenaktivmaterial abgebildet wurde. Dass die Performanz der Testzelle noch hinter der Performanz der Referenzzelle aus Materialien aus der primären Herstellung zurückblieb, kann u. a. daran liegen, dass das Material über einen längeren Zeitraum zwischengelagert wurde, ehe es für das Liberation-Recyclingverfahren genutzt wurde, dass das Material bereits vor dem Durchlaufen des Liberation-Recyclingverfahrens von schlechter Qualität war oder dass die Prozessierung bislang nicht unter Schutzatmosphäre stattfand. Das Lagern unter feuchter Luft und Licht kann zu irreversiblen Veränderungen bei den Elektroden führen und ihre Performanz deutlich verschlechtern, u. a. aufgrund von Li^+/H^+ -Austausch, Bildung von LiOH - und/oder Li_2CO_3 -Schichten an der Oberfläche, Korrosion des Aluminiums und photokatalytischen Reaktionen durch die Übergangsmetalloxide. Diese Erklärungsansätze sprechen dafür, dass unter anderen Bedingungen über das Liberation-Verfahren ein Recycling-Kathodenaktivmaterial zurückgewonnen werden kann, das hinsichtlich Qualität und Performanz stärker an Kathodenaktivmaterial aus der primären Herstellung heranreicht.

Bezüglich des Recyclings des Anodenfolienausschusses lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Bei einem lastenfreien Eingang des Anodenfolienausschusses sind die Umweltlasten, die mit dem Recyclingprozess verbunden sind, niedriger als die Umweltlasten, die mit einer marktüblichen Bereitstellung der entsprechenden Produkte verbunden sind. Pro Tonne Anodenfolienausschuss lassen sich im untersuchten Fall (hohe Gutschrift durch die Substitution von in China produziertem synthetischem Graphit) ca. 22.000 kg CO_2 -Äq. einsparen, sofern Batteriegraphit erzeugt wird bzw. ca. 9.000 kg CO_2 -Äq. einsparen, sofern ein Graphit-Compound erzeugt wird. In allen in Kapitel 3 grafisch dargestellten Wirkungskategorien und in beiden Hauptrouten (Zielprodukt Batteriegraphit bzw. Graphit-Compound) sind die Umweltentlastungen (Gutschriften) in den jeweiligen untersuchten Fällen mindestens 6-mal so groß wie die zusätzlichen Umweltlasten. Deutlich schlechtere, aber immer noch im Saldo vorteilhafte Ökobilanzergebnisse ergeben sich, wenn für das potenziell zu ersetzende Marktgraphit ein anderer Datensatz verwendet wird, der natürlichen Graphit abbildet (siehe Kapitel 4.2.2.3).
- Anders als beim Recycling des Kathodenfolienausschusses konnte für das Recycling des Anodenfolienausschusses im Rahmen des Projekts die ursprüngliche Idee zur Liberalisierung der Wertstoffe (Graphit und Kupfer) vom Binder, die darin bestand, den Binder mit Wasser auszuwaschen, nicht erfolgreich umgesetzt werden. Stattdessen wurde eine thermische Behandlung umgesetzt. Eine Rückgewinnung des Binders ist damit ausgeschlossen. Demgegenüber konnte für den Recycling-Graphit anhand von Testzellen nachgewiesen werden, dass der Recyclinggraphit eine ähnlich gute Performanz bzw. Qualität aufweist wie Graphit aus der primären Herstellungsrouten. Sogar für den nicht nachgereinigten Graphit konnten ansehnliche Ergebnisse erzielt werden, wodurch noch geringere zusätzliche Umweltbelastungen möglich wären.

4.3.2 Einschränkungen

Die Aussagekraft der in dieser Studie abgebildeten Ökobilanzergebnisse wird durch folgende Aspekte bzw. Zusammenhänge eingeschränkt:

- Die von den Verbundpartnern bzw. dem Fraunhofer ISC gemessenen Werte wurden teilweise deutlich angepasst, um eine potenzielle zukünftige industrielle Implementierung abzubilden. Trotz dieser Anpassung der Daten zum Vordergrundsystem handelt es sich bei dieser Ökobilanz nicht um eine prospektive Ökobilanz im Sinne von Arvidsson et al. (2018, 2024) and Thonemann et al. (2020).
- Sowohl der Kathoden- als auch der Anodenfolienausschuss geht lastenfrei in das jeweilige Recyclingsystem ein, d. h. die vorherigen Umweltauswirkungen werden abgeschnitten. Dieser Ansatz stellt im Vergleich zu anderen End-of-Life-Allokationsansätzen die vorteilhafteste Wahl im Sinne des Recyclingprozesses dar.
- Die Ergebnisse zum Recycling des Kathodenfolienausschusses gelten im engeren Sinne ausschließlich für den hier untersuchten NMC 622 Folienausschuss. Andere Studien, beispielsweise Buchert et al. 2023, legen nahe, dass andere NMC-Zellchemien mit einem höheren Nickelgehalt (NMC 811 / 955) zu einem besseren Ökobilanzergebnis und mit einem geringeren Nickelgehalt (NMC 532 / 111) zu einem schlechteren Ökobilanzergebnis führen. Die hier vorliegenden Ergebnisse können nicht auf LFP-Kathodenfolienausschuss übertragen werden.
- Das tatsächlich vom Fraunhofer IVV eingesetzte Lösemittel steht unter Schutzrechten. In der Sachbilanz ist der Lösemiteleinsatz daher in Absprache mit dem Fraunhofer IVV über einen Proxy-Datensatz (Dimethylsulfoxid, DMSO) abgebildet.
- Der in Kathodenfolien häufig eingesetzte Binder Polyvinylidenfluorid (PVDF) gehört zur Gruppe der Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS). Über welchen Zeitraum das hier untersuchte Liberation-Recyclingverfahren zur Behandlung von Kathodenfolienausschüssen mit dem spezifisch für PVDF anwendbaren Lösemittel des Fraunhofer IVV in den kommenden Jahren noch zum Einsatz kommen kann, hängt davon ab, ob es gelingt, gleichwertige PFAS-freie Alternativen zu entwickeln und welche regulatorischen Entwicklungen sich ergeben.

4.3.3 Empfehlungen

Vor dem Hintergrund der im Rahmen dieser Ökobilanzstudie erarbeiteten Erkenntnisse werden folgende Empfehlungen ausgesprochen:

- Ein vorteilhaftes Ökobilanzergebnis kann sich hinsichtlich des Recyclings des Kathodenfolienausschusses nur dann ergeben, wenn der Einsatz an Energie und Chemikalien gegenüber den gemessenen Werten der Verbundpartner deutlich gesenkt werden kann. Daher sollte bei einer potenziellen Umsetzung des Liberation-Verfahrens in der Praxis darauf geachtet werden, den Einsatz an Energie und Chemikalien möglichst effizient auszugestalten. Beispielsweise sind die Umweltlasten, die mit dem Lösemiteleinsatz verbunden sind, trotz einer Reduktion des Lösemiteleinsatzes in der Sachbilanz um einen Faktor 10 gegenüber dem gemessenen Verbrauch noch deutlich sichtbar. Das Ökobilanzergebnis würde dementsprechend sichtbar besser ausfallen, wenn der Lösemiteleinsatz über den angesetzten Faktor 10 hinausgehend noch weiter reduziert werden könnte.

- Die empirische Basis, die im Rahmen des Liberation-Projekts erhoben wurde, um die Qualität des Recycling-Kathodenaktivmaterials zu bewerten, war sehr klein. Es sollten daher weitere Versuche durchgeführt werden, um besser beurteilen zu können, ob über das Liberation-Verfahren ein Recycling-Kathodenaktivmaterial zurückgewonnen werden kann, das sich für den Einsatz in neuen Batterien eignet oder ob sich das unbefriedigende Ergebnis der im Rahmen dieses Projekts hergestellten Testzelle bestätigt. Falls weitere Versuche zeigen würden, dass das Liberation-Verfahren grundsätzlich auch ein Recycling-Kathodenaktivmaterial zurückgewinnen kann, das höheren Qualitätsansprüchen genügt (Einsatz in neuen Batterien), wären ein 1:1-Ersatz von marktüblichem Kathodenaktivmaterial gerechtfertigt, sodass höhere Gutschriften in der Ökobilanz möglich wären.
- Die Ökobilanzergebnisse für das Recycling des Anodenfolienausschusses sind vielversprechend. Das Verfahren sollte weiterverfolgt werden und es sollte mit weiteren Versuchen überprüft werden, ob sich die überzeugende Performanz des Recycling-Graphits bestätigt.
- In weiterführenden Versuchen sollte untersucht werden, inwiefern sich das hier entwickelte Recyclingverfahren von Folienausschüssen auch auf Batterien mit anderen Zellchemien, beispielsweise NMC 955 oder LFP, oder mit anderen Bindern anwenden lässt und ob sich dabei das vorliegende Ökobilanzergebnis bestätigt.

5 Literaturverzeichnis

- Arvidsson et al. 2024 Arvidsson, R., Svanström, M., Sandén, B.A. et al. Terminology for future-oriented life cycle assessment: review and recommendations. *Int J Life Cycle Assess* 29, 607–613 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02265-8>
- Arvidsson et al. 2018 Arvidsson R, Tillman A-M, Sandén BA, Janssen M, Nordelöf A, Kushnir D, Molander S (2018) Environmental assessment of emerging technologies: recommendations for prospective LCA. *J Ind Ecol* 22(6):1286–1294
- Buchert et al. 2023 Buchert, M., Sutter, J., Wagner, T.: Ökobilanz für das MERCATOR Verfahren zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterie, 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, Darmstadt, Juni 2023
- Carrère et al. 2024 Carrère, T.; Khalid, U.; Baumann, M.; Bouzidi, M.; Allard, B. (2024): Carbon footprint assessment of manufacturing of synthetic graphite battery anode material for electric mobility applications. *Journal of Energy Storage* 94, 112356. DOI: 10.1016/j.est.2024.112356.
- ecoinvent 2024 ecoinvent (2024): ecoinvent Version 3.11, Database Overview File [https://support.ecoinvent.org/hubfs/Knowledge%20Base/Database/Releases/3.11/Database-Overview-for-ecoinvent-v3.11%20\(6\).xlsx](https://support.ecoinvent.org/hubfs/Knowledge%20Base/Database/Releases/3.11/Database-Overview-for-ecoinvent-v3.11%20(6).xlsx)
- 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.
- Engels et al. 2022 Engels, P.; Kononova, N.; Khalid, U.; Cerdas, F.; Herrmann, C. (2022): Methodology for a combined uncertainty analysis and data quality rating of existing graphite datasets in context of battery LCAs. *Procedia CIRP* 105, S. 577–582. DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.096.
- 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
- Fraunhofer ISC 2026 Fraunhofer ISC: Interne Dokumentation bzgl. Charakterisierung und Regeneration von recyceltem NCM622-Kathodenmaterial, 2026 (nicht veröffentlicht)
- Gorman et al. 2025 Gorman, S., Hitt, C., Kesler, S. et al. (2025): US graphite sourcing for electric vehicle battery applications. *J. Ind. Ecol.* 29, 2162–2181. <https://doi.org/10.1111/jiec.70104>
- ISO 2021 a DIN EN ISO 14040:2021-02, Umweltmanagement_ - Ökobilanz_ - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO_14040:2006_+ Amd_1:2020); Deutsche Fassung EN_ISO_14040:2006_+ A1:2020
- ISO 2021 b DIN EN ISO 14044:2021-02, Umweltmanagement_ - Ökobilanz_ - Anforderungen und Anleitungen (ISO_14044:2006_+ Amd_1:2017_+ Amd_2:2020); Deutsche Fassung EN_ISO_14044:2006_+ A1:2018_+ A2:2020
- ISO 2024 DIN EN ISO 14071:2024 Umweltmanagement - Ökobilanz - Kritische Prüfungsverfahren und Kompetenzen der Prüfer
- JRC 2022 JRC: European Platform on LCA | EPLCA, Environmental Footprint reference packages, <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html>, 2022
- Minviro 2024 Minviro. (2024): Life cycle assessment for Vianode: Sustainable battery material innovation. <https://www.minviro.com/resources/case-studies/life-cycle-assessment-vianode>

- Posch et al. 2008 Posch, M., Seppälä, J., Hettelingh, J.P., Johansson, M., Margni M., Jolliet, O. (2008). The role of atmospheric dispersion models and ecosystem sensitivity in the determination of characterisation factors for acidifying and eutrophying emissions in LCIA. *International Journal of Life Cycle Assessment* (13) pp.477–486
- Seppälä et al. 2006 Seppälä, J., Posch, M., Johansson, M., Hettelingh, J.P. (2006). Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator. *International Journal of Life Cycle Assessment* 11(6): 403-416
- Tauchert et al. 2026 Tauchert, N., Schneider, B.: Vollzellen: Kapazität & Coulomb-Effizienz. Interne Auswertung im Rahmen des Liberation-Projekts. März, 2026 (nicht veröffentlicht)
- Thonemann et al. 2020 Thonemann, N., Schulte, A., Maga, D., 2020. How to conduct prospective life cycle assessment for emerging technologies? A systematic review and methodological guidance. *Sustainability* 12 (3), 1192. <https://doi.org/10.3390/SU12031192>
- van Oers et al. 2020 van Oers, L., Guinée, J.B. & Heijungs, R.: Abiotic resource depletion potentials (ADPs) for elements revisited—updating ultimate reserve estimates and introducing time series for production data. *Int J Life Cycle Assess* 25, 294–308 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01683-x>
- Wang et al. 2025 Fang Wang, Shaojun Zhang, Min Liu, Yiling Xiong, Daniel De Castro Gomez, Xin He, Mohammed A. Almoniee, Omar Hurtado Perez, Ziyu Liu, Xuexing Pan, Guangliang Lin, Ye Wu (2025): Carbon Footprint and Decarbonization Potential of Battery-Grade Synthetic Graphite. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 9 June 2025; 13 (22): 8298–8306. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5c00921>
- Wernet et al. 2016 Wernet, Gregor; Bauer, Christian; Steubing, Bernhard; Reinhard, Jürgen; Moreno-Ruiz, Emilia; Weidema, Bo (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *Int J Life Cy-cle Assess* 21 (9), S. 1218–1230. DOI: 10.1007/s11367-016-1087-8.

Anhang

Anhang I. Verwendete Sachbilanzdatensätze

Tabelle 5-1: Verwendete Sachbilanzdatensätze

Datensatz	Quelle	Erläuterung / Verwendung	Zeitl. Repräsentativität der Inputs und Outputs des Vordergrundsystems
RER: market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 5	ecoinvent v 3.11		2010
DE: market for electricity, medium voltage	ecoinvent v 3.11		2022
GLO: market for dimethyl sulfoxide	ecoinvent v 3.11	Proxy-Datensatz für das vom Fraunhofer IVV eingesetzte Lösemittel beim Recycling des Kathodenfolienausschusses	2000
Europe without Switzerland: treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration	ecoinvent v 3.11		2000
RER: treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing	ecoinvent v 3.11	Recycling der abgetrennten Aluminiumfraktion zur Erzeugung eines marktfähigen Aluminium-Sekundärprodukts	2005
GLO: market for aluminium, cast alloy	ecoinvent v 3.11	Ersetztes marktübliches Aluminium, Mix aus Primär- und Sekundäraluminium	2015
Weitere Prozesse zur Abbildung der Nachreinigung des Kathodenaktivmaterials aus Vertraulichkeitsgründen hier nicht aufgeführt			
Europe without Switzerland: treatment of wastewater, average, wastewater treatment	ecoinvent v 3.11		2010
CN: market for NMC 622 oxide	ecoinvent v 3.11	Ersetztes marktübliches Kathodenaktivmaterial (NMC 622)	2018
RER: treatment of copper scrap by electrolytic refining	ecoinvent v 3.11	Recycling der abgetrennten Kupferfraktion zur Erzeugung eines marktfähigen Kupfer-Sekundärprodukts	1999
GLO: market for copper, cathode	ecoinvent v 3.11	Ersetztes marktübliches Kupfer, Mix aus Primär- und Sekundärkupfer	2015

Datensatz	Quelle	Erläuterung / Verwendung	Zeitl. Repräsentativität der Inputs und Outputs des Vordergrundsystems
CN: market for graphite block	ecoinvent v 3.11	a) Verwendung zur Abbildung des Graphittiegels bei der Erzeugung von Recycling-Batteriegraphit b) Verwendung zur Abbildung des ersetzten marktüblichen Graphit-Compounds (Äquivalenzfaktor siehe Tabelle 1-4)	2019
GLO: market for polypropylene, granulate	ecoinvent v 3.11	Einsatzstoff bei der Herstellung des Graphit-Compounds	2011
CN: synthetic graphite production, battery grade, via Acheson powder route	ecoinvent v 3.11	Ersetzter marktüblicher Batteriegraphit	2019
CN: market for recarburizer	ecoinvent v 3.11	Ersetztes marktübliches Aufkohlungsmittel	2019
CN: used graphite crucibles to generic market for recarburizer	ecoinvent v 3.11	Weiterverwertung der gebrauchten Graphittiegel (Erzeugung von Recycling-Batteriegraphit)	2019

CN: China; DE: Deutschland; GLO: Global; RER: Europa

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V. auf Basis der ecoinvent-Datenbank v3.11

Anhang II. Ökobilanzergebnisse für alle berechneten Wirkungskategorien

Tabelle 5-2: Kathodenfolienausschuss: Ökobilanzergebnisse für alle berechneten Wirkungskategorien (EF 3.1)

Wirkungskategorie	Einheit	Σ Lasten	Σ Gut-schriften	Saldo-ergebnis
Acidification	[Mole of H+ eq.]	72	-95	-23
Climate Change - total	[kg CO ₂ eq.]	11.535	-9.980	1.555
Climate Change, biogenic	[kg CO ₂ eq.]	32	-26	7
Climate Change, fossil	[kg CO ₂ eq.]	11.491	-9.924	1.566
Climate Change, land use and land use change	[kg CO ₂ eq.]	12	-30	-18
Ecotoxicity, freshwater - total	[CTUe]	1.396.481	-93.806	1.302.675
Ecotoxicity, freshwater inorganics	[CTUe]	1.395.945	-92.910	1.303.035
Ecotoxicity, freshwater organics	[CTUe]	536	-896	-360
Eutrophication, freshwater	[kg P eq.]	8,9	-3,6	5,2
Eutrophication, marine	[kg N eq.]	26,1	-15,6	10,5
Eutrophication, terrestrial	[Mole of N eq.]	132	-139	-7
Human toxicity, cancer - total	[CTUh]	5,33E-06	-1,05E-05	-5,15E-06
Human toxicity, cancer inorganics	[CTUh]	1,91E-06	-4,14E-06	-2,24E-06
Human toxicity, cancer organics	[CTUh]	3,42E-06	-6,33E-06	-2,91E-06
Human toxicity, non-cancer - total	[CTUh]	1,36E-04	-2,40E-04	-1,04E-04
Human toxicity, non-cancer inorganics	[CTUh]	1,28E-04	-2,33E-04	-1,05E-04
Human toxicity, non-cancer organics	[CTUh]	8,29E-06	-7,19E-06	1,10E-06
Ionising radiation, human health	[kBq U235 eq.]	1.079	-1.812	-732
Land Use	[Pt]	41.167	-37.376	3.791
Ozone depletion	[kg CFC-11 eq.]	1,80E-04	-1,76E-04	3,33E-06
Particulate matter	[Disease incidences]	6,02E-04	-8,15E-04	-2,12E-04
Photochemical ozone formation, human health	[kg NMVOC eq.]	39	-40	-1
Resource use, fossils	[MJ]	177.862	-157.734	20.128
Resource use, mineral and metals	[kg Sb eq.]	0,13	-0,77	-0,64
Water use	[m ³ world equiv.]	4.130	-32.344	-28.214

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Tabelle 5-3: Anodenfolienausschuss, Zielprodukt Batteriegraphit: Ökobilanzergebnisse für alle berechneten Wirkungskategorien (EF 3.1)

Wirkungskategorie	Einheit	Σ Lasten	Σ Gut-schriften	Saldo-ergebnis
Acidification	[Mole of H+ eq.]	34	-320	-286
Climate Change - total	[kg CO2 eq.]	3.007	-26.190	-23.182
Climate Change, biogenic	[kg CO2 eq.]	10	-10	1
Climate Change, fossil	[kg CO2 eq.]	2.993	-26.168	-23.175
Climate Change, land use and land use change	[kg CO2 eq.]	5	-12	-8
Ecotoxicity, freshwater - total	[CTUe]	25.884	-233.629	-207.745
Ecotoxicity, freshwater inorganics	[CTUe]	25.800	-232.852	-207.052
Ecotoxicity, freshwater organics	[CTUe]	83	-777	-694
Eutrophication, freshwater	[kg P eq.]	4,5	-16,3	-11,8
Eutrophication, marine	[kg N eq.]	3,2	-33,4	-30,2
Eutrophication, terrestrial	[Mole of N eq.]	31	-379	-348
Human toxicity, cancer - total	[CTUh]	3,90E-06	-2,21E-05	-1,82E-05
Human toxicity, cancer inorganics	[CTUh]	3,19E-06	-1,69E-05	-1,37E-05
Human toxicity, cancer organics	[CTUh]	7,10E-07	-5,13E-06	-4,42E-06
Human toxicity, non-cancer - total	[CTUh]	3,59E-04	-1,71E-03	-1,35E-03
Human toxicity, non-cancer inorganics	[CTUh]	3,39E-04	-1,60E-03	-1,26E-03
Human toxicity, non-cancer organics	[CTUh]	1,99E-05	-1,12E-04	-9,20E-05
Ionising radiation, human health	[kBq U235 eq.]	562	-1.142	-579
Land Use	[Pt]	15.344	-101.644	-86.300
Ozone depletion	[kg CFC-11 eq.]	3,00E-05	-1,73E-04	-1,43E-04
Particulate matter	[Disease incidences]	1,07E-04	-2,41E-03	-2,31E-03
Photochemical ozone formation, human health	[kg NMVOC eq.]	10	-116	-106
Resource use, fossils	[MJ]	51.076	-434.139	-383.063
Resource use, mineral and metals	[kg Sb eq.]	0,34	-1,98	-1,63
Water use	[m³ world equiv.]	910	-5.050	-4.139

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

**Tabelle 5-4: Anodenfolienausschuss, Zielprodukt Graphit-Compound:
Ökobilanzergebnisse für alle berechneten Wirkungskategorien (EF 3.1)**

Wirkungskategorie	Einheit	Σ Lasten	Σ Gut-schriften	Saldo- ergebnis
Acidification	[Mole of H+ eq.]	30	-217	-187
Climate Change - total	[kg CO ₂ eq.]	1.913	-10.965	-9.052
Climate Change, biogenic	[kg CO ₂ eq.]	6	-7	-1
Climate Change, fossil	[kg CO ₂ eq.]	1.904	-10.951	-9.048
Climate Change, land use and land use change	[kg CO ₂ eq.]	3	-7	-4
Ecotoxicity, freshwater - total	[CTUe]	24.081	-192.497	-168.416
Ecotoxicity, freshwater inorganics	[CTUe]	23.995	-191.971	-167.975
Ecotoxicity, freshwater organics	[CTUe]	85	-526	-440
Eutrophication, freshwater	[kg P eq.]	3,1	-13,7	-10,6
Eutrophication, marine	[kg N eq.]	2,3	-16,7	-14,5
Eutrophication, terrestrial	[Mole of N eq.]	24	-202	-178
Human toxicity, cancer - total	[CTUh]	3,70E-06	-1,89E-05	-1,52E-05
Human toxicity, cancer inorganics	[CTUh]	3,09E-06	-1,60E-05	-1,29E-05
Human toxicity, cancer organics	[CTUh]	6,07E-07	-2,92E-06	-2,31E-06
Human toxicity, non-cancer - total	[CTUh]	3,53E-04	-1,63E-03	-1,28E-03
Human toxicity, non-cancer inorganics	[CTUh]	3,33E-04	-1,53E-03	-1,19E-03
Human toxicity, non-cancer organics	[CTUh]	1,98E-05	-1,09E-04	-8,90E-05
Ionising radiation, human health	[kBq U235 eq.]	351	-515	-165
Land Use	[Pt]	13.029	-69.252	-56.222
Ozone depletion	[kg CFC-11 eq.]	2,30E-05	-8,81E-05	-6,51E-05
Particulate matter	[Disease incidences]	7,79E-05	-1,13E-03	-1,05E-03
Photochemical ozone formation, human health	[kg NMVOC eq.]	8	-62	-54
Resource use, fossils	[MJ]	33.878	-186.868	-152.991
Resource use, mineral and metals	[kg Sb eq.]	0,34	-1,96	-1,62
Water use	[m ³ world equiv.]	714	-3.279	-2.565

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Anhang III. Externes kritisches Gutachten

Kritische Prüfung der Studie

ÖKOBILANZ FÜR DAS LIBERATION VERFAHREN ZUM RECYCLING VON FOLIENAUSCHÜSSEN BEI DER PRODUKTION VON LITHIUM-IONEN BATTERIEN

Auftraggeber: Öko-Institut e.V., Darmstadt
mit Förderung durch das
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
(BMWE), Berlin

Prüfer: Prof. Dr. Matthias Finkbeiner, Berlin

Normbezug: DIN EN ISO 14040 (2006): Umweltmanagement –
Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen
DIN EN ISO 14044 (2006): Umweltmanagement –
Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen
ISO 14071 (2024):
Environmental management - Life cycle
assessment - Critical review processes and
reviewer competencies

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 16.09.2026 vorgelegten Fassung V1.3.

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 hat mit einem Kick-off-Meeting am 30. März 2026 begonnen, in dem die wesentlichen Elemente des Ziels und des Untersuchungsrahmens der Studie präsentiert wurden. Der Sachverständige hat Hinweise gegeben, die bei der Fortführung der Studie berücksichtigt wurden. Der zweite Schritt der Prüfung war die Vorlage des ersten Entwurfes des Abschlussberichtes der Studie am 02. Juli 2026.

Der Sachverständige hat den Bericht umfassend analysiert und auf Normkonformität geprüft. Die Prüfung ergab insgesamt 35 Hinweise genereller, technischer und redaktioneller Art, die dem Auftraggeber am 08. Juli 2026 übermittelt wurden. Der zweite, überarbeitete Entwurf des Berichtes wurde dem Prüfer am 31. August 2026 übermittelt.

Die Prüfung des zweiten Entwurfes ergab, dass die Prüfhinweise konstruktiv und umfassend berücksichtigt wurden. Es war lediglich ein weiterer Hinweis notwendig, der in der finalen Fassung des Berichtes adressiert wurde. Zusätzlich gab es einige redaktionelle Änderungen im Bericht, die vom Sachverständigen geprüft wurden.

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 der im Verbundvorhaben „LIBERATION – Lösungsbasierte Liberalisierung und Reintegration funktionaler Batteriematerialien aus Produktionsausschüssen der Zellfertigung“ entwickelten und untersuchten Prozessrouten zum Recycling von Kathoden- bzw. Anodenfolienausschüssen.

Die funktionelle Einheit und der Referenzfluss der Ökobilanz für das Recycling des Kathodenfolienausschusses nach dem Liberation-Verfahren sind das Recycling von 1000 kg Kathodenfolienausschuss mit NMC 622 Aktivmaterial.

Die funktionelle Einheit und der Referenzfluss der Ökobilanz für das Recycling des Anodenfolienausschusses nach dem Liberation-Verfahren sind das Recycling von 1000 kg Anodenfolienausschuss.

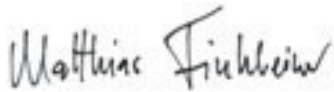
Die vorgelegten Ergebnisse gelten nur unter der Annahme, dass sowohl der Kathoden- als auch der Anodenfolienausschuss lastenfrei in die Bilanz eingehen. Alternative End-of-Life-Allokationsansätze wurden nicht untersucht.

Es wird transparent darauf hingewiesen, dass es sich bei den betrachteten Recyclingverfahren um Prozesse handelt, die sich noch in der Entwicklung befinden. Diese wurden mithilfe plausibler Annahmen auf das Niveau eines technologisch ausgereiften Prozesses hochgerechnet. Dabei verbleiben Unsicherheiten, da die tatsächlichen Auswirkungen bei Implementierung in industriellem Maßstab davon abweichen können.

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 und ISO 14044 erstellt.

A handwritten signature in black ink, reading "Matthias Finkbeiner". The signature is written in a cursive, slightly slanted style.

Prof. Dr. Matthias Finkbeiner
18. September 2026