

2024

# Ökobilanzierung des Batterierecyclingverfahrens der Librec AG

Eine Analyse der potenziellen Umweltauswirkungen des geplanten Betriebs in Biberist

Teil des Innosuisse-Projekts 47247.1 IP-EE



## **Auftraggeber**

Innosuisse – Schweizerische Agentur für Innovationsförderung

Projekt- und Programmförderung

Einsteinstrasse 2

3003 Bern

## **Auftragnehmer**

Empa

Technology and Society Laboratory<sup>1</sup>

Lerchenfeldstrasse 5

9014 St. Gallen

## **Autoren**

<sup>1</sup> Martin Gasser

## **Hinweise**

Diese Studie wurde im Rahmen eines Innosuisse-Projektes verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

St. Gallen, Februar 2024

Titelbild:

Von Librec bereitgestellte Visualisierung der fertiggestellten Batterierecyclinganlage. Gebäudehülle und –installation sind momentan (Februar 2024) grösstenteils abgeschlossen. Die Installation der Verfahrenstechnik ist in den kommenden Monaten vorgesehen.

## Executive Summary

Das Wachstum der Elektromobilität führt mit einiger Verzögerung zu einem Anstieg der Menge von Altbatterien, welche gemäss Gesetzgebung recycelt werden müssen. Zu diesem Zweck baut die Librec Batterierecycling AG in Biberist, Kanton Solothurn, eine Anlage für die mechanische Vorbehandlung von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektroautos. Im Herbst 2024 soll diese den Betrieb aufnehmen und angelieferte Elektroautoaltbatterien mittels Zerlege- und Separationsprozessen in ihre Bestandteile auftrennen. Das dabei resultierende Gemisch aus Elektrodenmaterialien, die sogenannte Schwarzmasse, wird anschliessend in externen hydrometallurgischen Verfahren weiter separiert.

Um die Anstrengungen von Librec zu unterstützen, wurde von der Schweizerischen Agentur für Innovationsförderung (Innosuisse) 2021 das Innovationsprojekt 47247.1 IP-EE gutgeheissen. Als Teil davon wird in der vorliegenden Studie eine Ökobilanzierung durchgeführt, um die potenziellen Umweltauswirkungen des Librec-Verfahrens abzuschätzen und dessen ökologische Hotspots zu identifizieren. Dies bildet die Grundlage für weitere ökologische Optimierungen des Verfahrens.

Für die Ökobilanzierung wurden sowohl der Bau der Librec-Anlage, als auch der Betrieb des Librec-Verfahrens selber berücksichtigt. Als funktionelle Einheit wurde das Prozessieren von 1 Tonne Batterien im Librec-Verfahren festgelegt. Über eine angenommene Anlagenlebensdauer von 30 Jahren wurden alle modellierten In- und Outputs durch die total prozessierte Batteriemasse geteilt. Dies wurde für zwei Szenarien gerechnet, welche eine *unvorteilhafte* und eine *vorteilhafte Entwicklung* bezüglich den zu erwartenden potenziellen Umweltauswirkungen widerspiegeln. Die für die Wirkungsabschätzung benutzten Hintergrunddaten stammen aus der Datenbank ecoinvent Version 3.8.

Für das Librec-Verfahren werden Baumaterialien und Betriebsmittel benötigt. Gleichzeitig werden Luftemissionen ausgestossen und es fallen Abwässer an. Das Prozessieren einer Tonne Batterien benötigt zudem ca. 150 bis 350 kWh elektrische Energie. Die im Rahmen der Ökobilanzierung durchgeführte Wirkungsabschätzung zeigt, dass dieser Energiebedarf für einen Grossteil der potenziellen Umweltauswirkungen verantwortlich sein wird. In allen untersuchten Szenarien und Umweltkategorien trug die Nutzung von elektrischer Energie zwischen 10 % und 90 % der modellierten Wirkung bei. Darüber hinaus zeigen die Baumaterialien signifikante Beiträge an die Umweltauswirkungen, wenn auch in einem deutlich kleineren Mass als elektrische Energie. Umweltkategorien wie Eutrophierung und Ozonbildung werden durch die Luftemissionen des Librec-Verfahrens negativ beeinflusst.

Der Klimawandelbeitrag des Librec-Verfahrens beträgt gemäss hier durchgeführter Ökobilanzierung 10 bis 40 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Tonne prozessierter Batterien. Die anschliessende hydrometallurgische Aufbereitung für die gleiche Menge an Batterien verursacht gemäss Literaturwerten ca. 1'900 bis 3'300 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Die potenziell vermeidbaren Umweltauswirkungen durch Rückgewinnung von Metallen betragen 3'500 bis 8'000 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Tonne. Dies ist jedoch nicht nur dem Librec-Verfahren alleine, sondern der gesamten Aufbereitungskette von Altbatterien zuzuschreiben.

Die Ökobilanzierung zeigt, dass insbesondere Anstrengungen zur Reduktion des Energieverbrauchs, zur Nutzung von Stromquellen mit geringem CO<sub>2</sub>-Gehalt und zur stetigen Optimierung der Abgasbehandlung einen signifikanten Beitrag zur ökologischen Optimierung des Librec-Verfahrens leisten.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1	HINTERGRUND	1
1.2	ZIELSETZUNG	1
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN</b>	<b>2</b>
2.1	BATTERIERECYCLING	2
2.2	LIBREC-VERFAHREN UND -ANLAGE	2
<b>3</b>	<b>METHODIK</b>	<b>5</b>
3.1	ÖKOBILANZIERUNG	5
3.1.1	<i>Ziel und Untersuchungsrahmen</i>	5
3.1.2	<i>Sachbilanz</i>	6
3.1.3	<i>Wirkungsabschätzung</i>	6
3.1.4	<i>Auswertung</i>	6
3.2	ANNAHMEN UND VEREINFACHUNGEN	7
3.3	SZENARIEN	9
3.3.1	<i>Szenario unvorteilhafte Entwicklung</i>	9
3.3.2	<i>Szenario vorteilhafte Entwicklung</i>	10
<b>4</b>	<b>RESULTATE</b>	<b>11</b>
4.1	SACHBILANZ	11
4.1.1	<i>Absolute Massen- und Energieflüsse</i>	11
4.1.2	<i>Relative Massen- und Energieflüsse</i>	15
4.2	WIRKUNGSABSCHÄTZUNG	18
4.2.1	<i>Potenzielle Umweltauswirkungen</i>	18
4.2.2	<i>Potenzielle vermeidbare Umweltauswirkungen</i>	20
<b>5</b>	<b>DISKUSSION</b>	<b>21</b>
5.1	AUSWERTUNG	21
5.2	EINORDNUNG DER RESULTATE	21
<b>6</b>	<b>FAZIT</b>	<b>23</b>
<b>7</b>	<b>QUELLEN</b>	<b>24</b>
<b>8</b>	<b>ANHANG</b>	<b>25</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Eine effektive Massnahme, um den Ausstoss von Treibhausgasen zu reduzieren und damit die Klimaerwärmung einzudämmen, ist die Förderung der Elektromobilität bei gleichzeitigem Ausbau von erneuerbaren Stromquellen. 2023 betrug der Anteil an batterieelektrisch betriebenen neuzugelassenen Fahrzeugen in der Schweiz 21 % (Swiss eMobility, 2023). Dieser Wert wird in den kommenden Jahren weiter ansteigen, da in der Europäischen Union ab 2035 ein Verkaufsverbot von neuen Benzin- und Dieselfahrzeugen gilt (Europäisches Parlament, 2022). Mittlerweile haben eine Vielzahl von Fahrzeugherstellern ihre vorzeitige Abkehr von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren bekanntgegeben (ADAC, 2023).

Mit einiger Verzögerung wird diese Veränderung der Fahrzeugflotte auch zu einem starken Anstieg an rücklaufenden Lithium-Ionen-Batterien (LIB) aus Elektroautos führen. Dieser wachsende Abfallstrom an Batterien stellt für die Kreislaufwirtschaft sowohl eine Herausforderung, als auch eine Chance dar. Es müssen hierfür neue Recyclingkapazitäten aufgebaut werden, jedoch können Recyclingverfahren auch einen Teil der für die Batterieproduktion benötigten Materialien bereitstellen.

Vor diesem Hintergrund wurde 2021 die Librec Batterierecycling AG (nachfolgend "Librec" genannt) gegründet, welche das Ziel hat die in der Schweiz anfallenden Elektroautoaltbatterien zu recyceln. Das Librec-Verfahren sieht vor Batterien zentral mechanisch vorzubehandeln, um anschliessend in externen hydrometallurgischen Verfahren Ausgangsstoffe für die Batterieherstellung zurückzugewinnen. Für diese mechanische Vorbehandlung wurde in Biberist, Kanton Solothurn, eine Recyclinganlage geplant, welche zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts kurz vor Vollendung steht.

Nach der Installation der Anlagentechnik ist geplant die Librec-Batterierecyclinganlage im Oktober 2024 in Betrieb zu nehmen. Eingehende Elektroautoaltbatterien und Produktionsabfälle aus der Batterieherstellung werden in mehreren Zerkleinerungs- und Sortierprozessen in verschiedene Metallfraktionen und Schwarzmasse (Gemisch aus Elektrodenaktivmaterialien) aufgetrennt.

In der Anfangsphase des Betriebs wird die Optimierung des Librec-Verfahrens zentral sein. Hierzu zählt auch, dass mit möglichst geringen negativen Umweltauswirkungen, möglichst viele Wertstoffe zurückgewonnen werden.

## 1.2 Zielsetzung

Um die Anstrengungen von Librec zu unterstützen, wurde von der Schweizerischen Agentur für Innovationsförderung (Innosuisse) 2021 das Innovationsprojekt 47247.1 IP-EE gutgeheissen. Ziel des Projekts ist es Rückgewinnungsprozesse so zu optimieren, dass 90 % der eingehenden Batteriematerialien zurückgewonnen werden können. Zudem soll das Librec-Verfahren digital modelliert sowie bezüglich Energie- und Materialeffizienz verstanden und in einer Ökobilanzierung beurteilt werden.

Die vorliegende Ökobilanzierung fokussiert sich auf die Identifizierung von ökologischen Hotspots des Librec-Verfahrens. Dies ermöglicht zielgerichtete Anpassungen in Zukunft, mit dem Ziel die Umweltauswirkungen der Prozesse zu verringern und LIB noch ökologischer zu recyceln.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Batterierecycling

Recyclingprozesse werden eingesetzt, um Materialien in einzelne Fraktionen zu separieren und anschliessend Zielstoffe zu konzentrieren und zurückzugewinnen. Um dies zu erreichen, bedient man sich verschiedener Materialeigenschaften der Zielstoffe, wie Dichte, Schmelzpunkt, Ausfällungsverhalten, etc. Grundsätzlich können LIB thermisch, mechanisch oder chemisch aufbereitet werden (Zheng et al., 2018).

#### *Thermische Aufbereitung*

Bei der thermischen Aufbereitung werden LIB unter hohem Energieaufwand eingeschmolzen und in verschiedene Metallfraktionen separiert. In der Schweiz bildet dieser pyrometallurgische Prozess die Grundlage für das Recycling von herkömmlichen Gerätebatterien (BATREC, 2022). Traktionsbatterien können in diesem Prozess als Ganzes aufgegeben werden, was einen hohen Durchsatz und eine breite Anwendung ermöglicht. Kupfer, Kobalt, Mangan und Nickel werden zurückgewonnen, während Graphit, Kunststoffe und Elektrolyt verbrennen. Aluminium und Lithium landen in der Schlacke des Schmelzofens und können nicht zurückgewonnen werden.

#### *Mechanische Aufbereitung*

Bei der mechanischen Aufbereitung werden LIB in ihre einzelnen Komponenten zerlegt. Spezifisch auf einzelne Batterietypen abgestimmte Prozesse erlauben eine Trennung der Materialien ohne grossen Energieaufwand. Batteriezellen werden abgewickelt oder anderweitig manuell bzw. semiautomatisch auseinandergenommen. Solche spezialisierten Prozesse erlauben momentan jedoch nur einen kleinen Durchsatz. In grösserem Masstab werden LIB zunächst geschreddert und die Aktivmaterialien von den Elektroden getrennt. Daraufhin werden diese mithilfe von Sieben und Magneten in einzelne Materialfraktionen aufgeteilt. Eine dieser Fraktionen ist die Schwarzmasse, ein Gemisch aus den Aktivmaterialien, welche anschliessend nasschemisch aufbereitet werden muss. Kupfer, Aluminium und Eisen hingegen lassen sich mit diesem Prozess einfach zurückgewinnen.

#### *Chemische Aufbereitung*

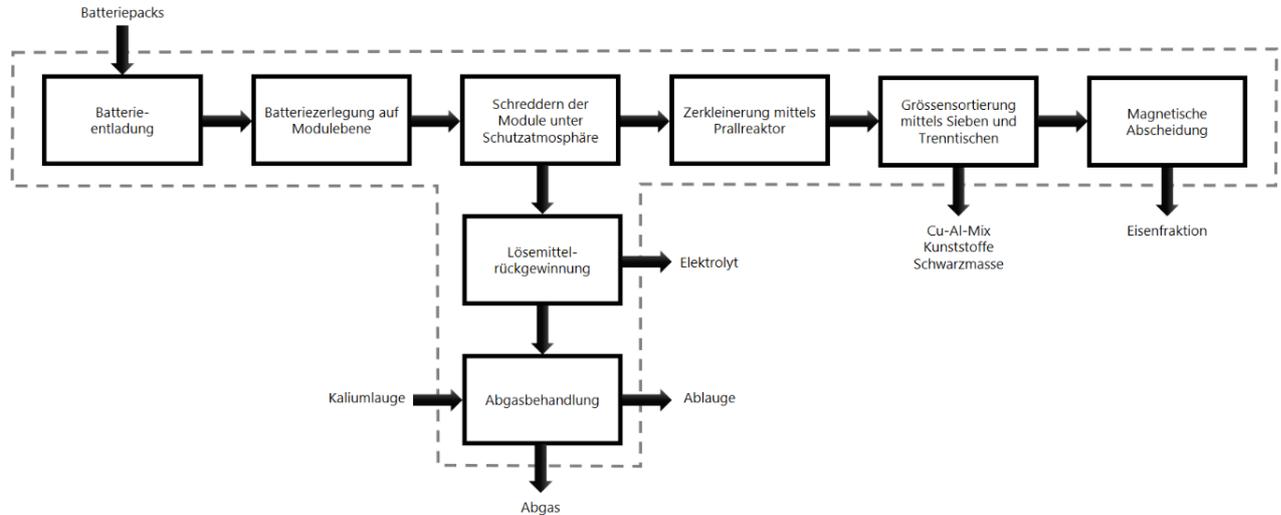
In der chemischen Aufbereitung von LIB werden Zielstoffe aus der Schwarzmasse mittels Säuerungs- und Fällungsreaktionen zurückgewonnen. Dieser hydrometallurgische Prozess benötigt verschiedene Zusatzchemikalien. Bestandteile der Aktivmaterialien wie Kobalt, Nickel, Mangan, Graphit und Lithium werden dabei als Sulfate, Carbonate oder Hydroxide zurückgewonnen. Voraussetzung für die chemische Aufbereitung ist eine vorbereitende mechanische Vorbehandlung.

Die heute angewandten Verfahren kombinieren die oben vorgestellten Prozesse auf vielfältige Weise, um möglichst viele Ausgangsstoffe von LIB möglichst rein zurückzugewinnen.

### 2.2 Librec-Verfahren und -Anlage

Im Librec-Verfahren werden LIB mechanisch aufbereitet. Das Inputmaterial wird in Form von ganzen Batteriepacks angeliefert. In den Batteriepacks enthaltene Restenergie wird entladen und trägt zum Betrieb des Verfahrens bei. Nach manueller Zerlegung der Batteriepacks in einzelne Batteriemodule folgt ein batchweises Schreddern unter Stickstoffatmosphäre. Mittels Trockner und Kondensator kann der Elektrolyt zurückgewonnen werden. Das Abgas wird mittels Wäscher und regenerativem Nachverbrenner (RNV) gereinigt, was jedoch Betriebsmittel (Kaliumlauge) benötigt und Ablauge produziert. Die an die Zerkleinerung anschliessenden Sortierprozesse separieren verschiedene Metall-,

Kunststoff- sowie Schwarzmassefraktionen (Abbildung 1). Bevor diese Fraktionen wieder neuen Herstellungsprozessen zugeführt werden können, benötigt insbesondere die Schwarzmasse weitere Aufbereitungsschritte. Dabei entstehen verschiedene Metallkarbonate und –sulfate, die wiederum als Ausgangsstoff für neue Batterien gebraucht werden können. Es ist geplant die hierfür nötigen hydrometallurgischen Verfahren bei Partnerfirmen im Ausland durchzuführen.



**Abbildung 1:** Hauptschritte des Librec-Verfahrens mit den wichtigsten Prozessschritten und Materialflüssen. Gestrichelt aufgezeigt ist der Perimeter der Librec-Batterierecyclinganlage.

In Abbildung 1 nicht ersichtlich sind die benötigten Energieeinträge. Der Betrieb der Zerkleinerungs- und Sortiermaschinen sowie der Stickstoffgeneratoren benötigt beachtliche Mengen an Elektrizität. Ebenfalls nicht eingezeichnet ist die selektive Wiederaufbereitung geeigneter Elektroautoaltbatterien zu Energiespeichersystemen durch die Firma Libattion, welche im selben Gebäude wie das Librec-Verfahren durchgeführt wird.

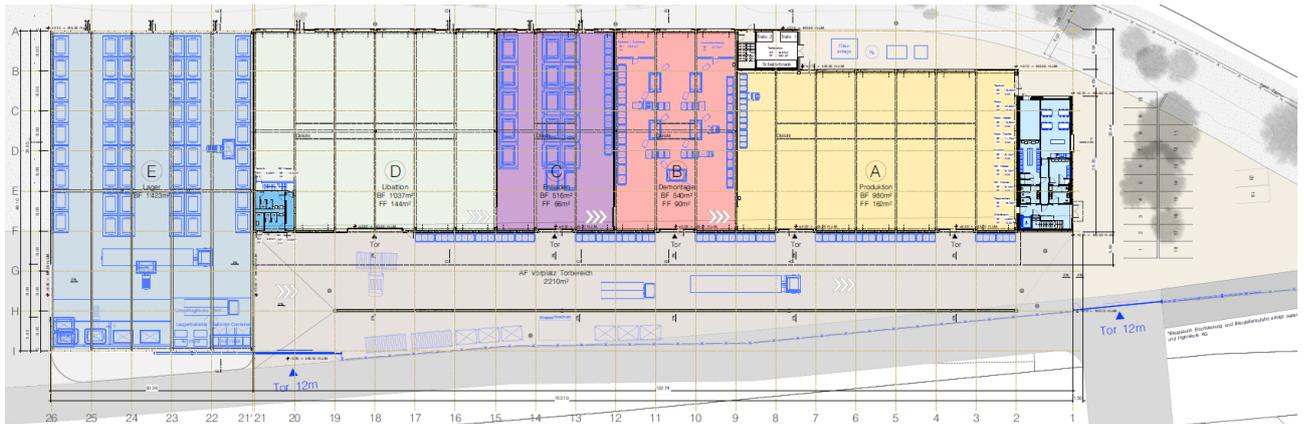
Die Bereitstellung dieses Gebäudes, verursacht eigene Massen- und Energieflüsse. Seit Baustart in 2023 wurde auf einer Fläche von gut 4'500 m<sup>2</sup> eine 10 m hohe Anlage gebaut, welches alle Schritte des oben beschriebenen Batterierecyclungsverfahrens beherbergt. Für das Fundament und den unteren Teil der Wände wurde Stahlbeton verwendet, der Hallenaufbau besteht grösstenteils aus Holz- und Stahlelementen. Der Aussenbereich ist asphaltiert (Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Eindrücke der Librec-Anlage während einer Besichtigung am 13. Dezember 2023.  
Links: Lager für angelieferte Batteriepacks; Rechts: Produktionshalle (Zerkleinerung und Sortierung)

Die Librec-Anlage ist auf eine maximale Kapazität von 2 t/h ausgelegt, was unter Berücksichtigung von Schichtarbeit einem maximalen Jahresdurchsatz von ca. 10'000 t/a entspricht. Die ersten Jahre nach Betriebsstart wird der Durchsatz voraussichtlich schrittweise angefahren, sodass mit dem Maximaldurchsatz frühestens in einigen Jahren zu rechnen ist.

## Ökobilanzierung des Batterierecyclingverfahrens der Librec AG



**Abbildung 3:** Grundriss der Librec-Anlage. Verschiedenfarbig sind von links nach rechts zu sehen: Lager, Libattion (Aufbereitung geeigneter Batteriepacks für die Wiederverwendung), Entladung und Zwischenlager, Demontage, Zerkleinerung und Sortierung sowie Büros.

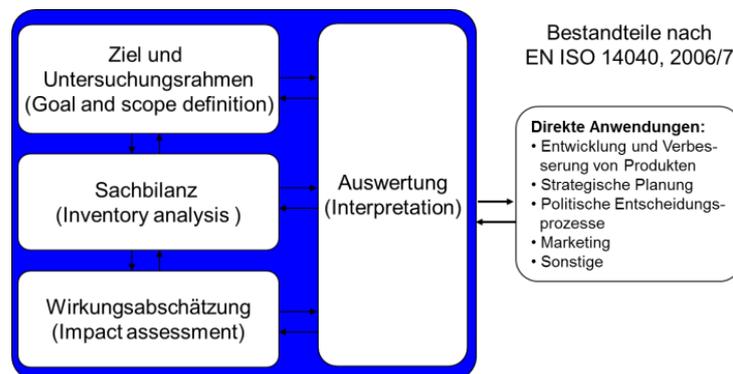
Abbildung 3 zeigt eine Übersicht der Librec-Anlage und die Verortung der Hauptschritte des Verfahrens. Grundsätzlich durchlaufen angelieferte Batteriepacks die Anlage von links nach rechts. Zur Energiegewinnung ist das Dach der Librec-Anlage mit einer 600 kWp PV-Anlage ausgestattet.

### 3 Methodik

#### 3.1 Ökobilanzierung

Die vorliegende Untersuchung orientiert sich an der Methode der Ökobilanz (engl.: Life Cycle Assessment (LCA)), welche in den ISO-Normen 14'040 und 14'044 beschrieben wird. Innerhalb der allgemeinen Vorgehensweise der Methode (Abbildung 4) können folgende Schritte identifiziert werden:

- Die Festlegung des **Untersuchungsrahmens** (Systemgrenzen, funktionelle Einheit, ...) in **Abhängigkeit von der Zielsetzung der Studie**;
- die **Zusammenstellung** der **Sachbilanz** aller relevanten Input- und Outputflüsse eines Produkt- oder Verfahrensystems;
- die **Beurteilung** der mit diesen Inputs und Outputs verbundenen **potenziellen Umweltauswirkungen**, sowie
- die abschliessende **Auswertung** der Ergebnisse aus der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung **hinsichtlich der Zielsetzung der Studie**.



**Abbildung 4:** Grundsätzliches Vorgehen beim Erstellen einer Ökobilanz. Die einzelnen Schritte werden im Verlaufe einer Bilanzierung iterativ durchlaufen, um neuen Erkenntnissen Rechnung zu tragen.

##### 3.1.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Ein Hauptziel war von Anfang an mittels Ökobilanzierung einen Beitrag zur Verfahrensoptimierung zu leisten, um besonders umweltbelastende Schritte früh zu erkennen. Dies legt die Grundlage für eine ökologische Optimierung des Verfahrens, um Batterien möglichst umweltfreundlich zu prozessieren. Folglich beschäftigt sich der vorliegende Bericht mit der Frage:

*"Wie gross sind die Umweltauswirkungen des Librec-Verfahrens und welche Teilschritte tragen in welchem Ausmass dazu bei?"*

Die Ökobilanzierung berücksichtigt sowohl Material- und Energieflüsse des Librec-Verfahrens, als auch die dafür benötigte Infrastruktur (die Librec-Anlage). Die Systemgrenze wurde auf den Perimeter der Librec-Anlage gelegt – die Wiederaufbereitung von Batterien durch Libbation wurde nicht untersucht. Die potenziellen Umweltauswirkungen während der Lebensdauer der Librec-Anlage wurden auf die in dieser Zeit prozessierten Batterien heruntergebrochen. Als **funktionelle Einheit** wurde somit das **Prozessieren von 1 Tonne Batterien** gewählt.

Wie bereits im Meilensteinbericht vom 20.07.2023 angemerkt, konnte der ursprünglich geplante Vergleich des Librec-Verfahrens mit anderen Batterierecyclingverfahren im Rahmen dieses Projekts nicht durchgeführt werden, da die hierfür benötigten Daten für andere Batterierecyclingverfahren nicht im gewünschten Detailgrad beschafft werden konnten. Kapitel 5.2 ordnet jedoch die ermittelten potenziellen Umweltauswirkungen in einen grösseren Rahmen ein.

### 3.1.2 Sachbilanz

Nach einer intensiven Literaturrecherche zum Thema Batterierecycling wurden im Rahmen von zahlreichen Austauschen mit Librec (insbesondere dem CTO Denis Werner) die für Ökobilanzierung benötigten Daten gesammelt und zusammengetragen. Auch das Logisitkmodell der BFH wurde mitberücksichtigt. Wo keine Daten vorhanden waren, wurden auf Literaturquellen begründete Abschätzungen getroffen. Es wurde ein umfassendes Inventar aufgebaut, welches erlaubte, die für das Verfahren erforderlichen Material- und Energieflüsse abzuschätzen. Zumal die vorliegende Bilanzierung zukunftsorientiert ist, wurden mit diesem Inventar zwei Extremszenarien modelliert – ein Szenario mit unvorteilhaften und eines mit vorteilhaften Parametern, was die potenziellen Umweltauswirkungen betreffen.

Die Sachbilanz und die benutzten Szenarien wurden in Excel modelliert und sind so aufgebaut, dass sie in Zukunft mit gemessenen Werten aktualisiert werden können. Die Resultate der Modellierung von zukünftigen Material- und Energieflüsse werden in Kapitel 4.1 präsentiert.

### 3.1.3 Wirkungsabschätzung

Die resultierenden Material- und Energieflüsse wurden mittels Charakterisierungsfaktoren der ecoinvent-Datenbank<sup>1</sup> in die in Kapitel 4.2 aufgeführten potenziellen Umweltauswirkungen umgerechnet. Hierbei wird nach Auswirkungen für verschiedene Umweltkategorien unterschieden.

Für die Charakterisierungsfaktoren wurde die ecoinvent-Version 3.8 verwendet. Die Berechnung erfolgte mit der Software *Activity Browser*. Als Wirkungskategorien wurde der Katalog *Ecological Footprint v3.0 no long-term emissions (EF v3.0 no LT)* gewählt.

### 3.1.4 Auswertung

Welche Teile des Librec-Verfahrens<sup>2</sup> die grössten Umweltauswirkungen verursachen wird im Rahmen der Hotspotanalyse in Kapitel 5 beschrieben. Die potenziellen Auswirkungen auf verschiedene Umweltbereiche werden dort diskutiert und in die mechanisch-hydrometallurgische Aufbereitungskette eingeordnet. Es wird zudem aufgezeigt, was die potenziellen Umweltauswirkungen wären, hätte man das im Batterierecycling zurückgewonnene Material primär abgebaut.

---

<sup>1</sup> <https://ecoinvent.org/>

<sup>2</sup> Wenn im Folgenden vom "Librec-Verfahren" die Rede ist, schliesst dies auch die dafür benötigten und berücksichtigten Infrastrukturleistungen der "Librec-Anlage" mit ein, ausser diese werden explizit ausgeklammert.

## 3.2 Annahmen und Vereinfachungen

Die Tatsache, dass die Librec-Anlage und gewisse Einzelheiten des Librec-Verfahrens sich noch im Aufbau befinden, setzt eine Vielzahl von Annahmen und Vereinfachungen bei der Modellierung der Sachbilanz voraus. Die wichtigsten Modellierungsüberlegungen sind nachfolgend aufgeführt. Sobald sich die Anlage tatsächlich in Betrieb befindet, können diese Annahmen mit gemessenen Werten ersetzt werden.

### *Allgemein*

- Bei der Modellierung wird nicht nur ein "Durchschnittsjahr" angeschaut, sondern die gesamte zu erwartende Lebensdauer der Anlage, welche mit 30 Jahren abgeschätzt wurde. Die total in dieser Zeit auftretenden Energie- und Massenflüsse in die Anlage wurden hierfür durch die total in dieser Zeit prozessierten Batterien geteilt, um eine Aussage über die funktionelle Einheit zu ermöglichen.
- Als Startpunkt der Modellierung gilt der 01.10.2024, als Endpunkt der 31.12.2054.
- Der Bau der Librec-Anlage und der Betrieb des Librec-Verfahrens werden berücksichtigt. Der Rückbau der Anlage (in 30 Jahren) wurde hingegen ausgeklammert.
- Auch für zukünftige Material- und Energieflüsse wird die 2020 publizierte ecoinvent-Version 3.8 verwendet.

### *Bau*

- Von den benötigten Baumaterialien wurden lediglich Beton, Stahl, Asphalt und Metalle für die Elektroinstallation (Kupfer, Eisen, Aluminium) berücksichtigt.
- Die Energie, welche die Installation der Baumaterialien benötigt, wurde ausgeklammert.
- Die Bereitstellung der Materialien des Maschinenparks (in erster Linie Stahl) wurde vernachlässigt.

### *Batterien*

- Es werden drei verschiedene LIB-Typen berücksichtigt: Lithiumeisenphosphat (LFP), Nickel-Mangan-Kobalt (NMC) und Nickel-Kobalt-Aluminium (NCA)
- Die durchschnittliche Zusammensetzung dieser LIB-Typen beruht auf Untersuchungen von Buchert et al. (2011) sowie Kwade und Diekmann (2018), welche eine grobe Differenzierung der Zusammensetzung von Batteriemodulen und restlicher Batterieinfrastruktur erlaubten.

### *Betrieb*

- Es wird angenommen, dass 5 % der aufs Gelände eingehenden Batterien von Libattion für die Wiederverwendung aufbereitet werden. Diese Menge an Batterien wird für die Modellierung des Energiebedarfs, der benötigten Betriebsmittel und der zurückgewonnenen Metalle ausgeschlossen.
- Grundlage der Modellierung ist die Tatsache, dass die Librec-Anlage auf die Verarbeitung von Batterien im Umfang von 2 t/h ausgelegt ist. Abhängig vom angenommenen Input an Batterien ermöglicht dies die Abschätzung der benötigten Maschinenstunden.
- Über die Maschinenstunden lässt sich dessen Strombedarf abschätzen. Hierzu wird die totale installierte elektrische Leistung mit den Maschinenstunden und einem Betriebsleistungsfaktor multipliziert.
- Die Luftemissionen des Librec-Verfahrens werden mittels den gesetzlich vorgegebenen Grenzwerten der Luftreinhalteverordnung (LRV) abgeschätzt. Diese stellen eine obere Grenze dar, welche vom Unternehmen auf jeden Fall eingehalten werden muss.

*Rückgewonnene Materialien*

- Die über die gesamte Aufbereitungskette von Batterien (Librec-Verfahren + hydro-metallurgische Verfahren) zurückgewonnenen Materialien wurden durch Multiplikation des ursprünglichen Materialeintrags mit einem "Rückgewinnungsfaktor" abgeschätzt.
- Diese Rückgewinnungsfaktoren unterscheiden sich je nach Material und Szenario. Zudem wurde festgelegt, dass sie im Lauf der Jahre leicht ansteigen, was einer verbesserten Prozessierung entspricht.
- Bei den rückgewonnenen Materialien wurde der Fokus auf Metalle gelegt, da der primäre Abbau von diesen besonders hohe Umweltauswirkungen verursacht.

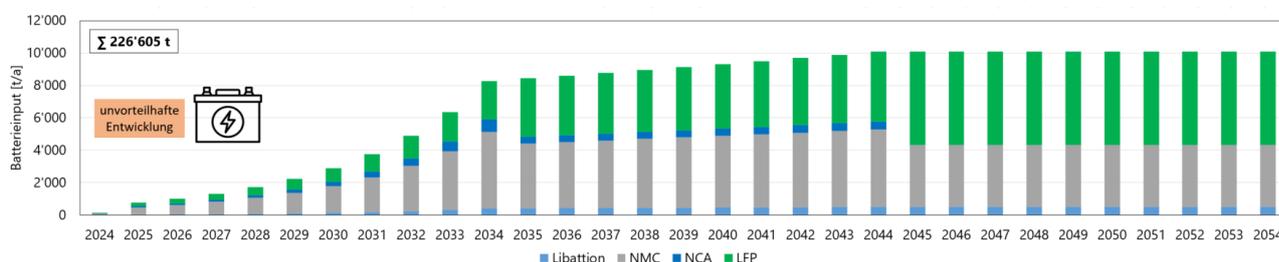
### 3.3 Szenarien

In der Sachbilanz wurde das Librec-Verfahren für zwei Zukunftsentwicklungen modelliert, welche Extremszenarien darstellen. Mit dieser Vorgehensweise wird versucht die Unsicherheit der zukünftigen Entwicklung zu berücksichtigen. Es ist wahrscheinlich, dass die tatsächliche Entwicklung und damit die tatsächliche Umweltauswirkung des Librec-Verfahrens zwischen diesen Extremszenarien liegen.

#### 3.3.1 Szenario *unvorteilhafte Entwicklung*

Im Szenario *unvorteilhafte Entwicklung* entwickeln sich verschiedene Parameter des Modells in einer Weise, dass die potenziellen Umweltauswirkungen des Librec-Verfahrens höher ausfallen, als erwartet:

- Von Anfang Oktober bis Ende Dezember 2024 werden in diesem Szenario lediglich 150 t an Batterien prozessiert. Anschliessend steigt der Batterieinput in die Anlage vergleichsweise langsam auf die maximale Kapazität an, welche erst im Jahr 2044 erreicht wird (Abbildung 5).
- Die eingehenden Batterietypen sind zu einem grossen Teil LFP-Batterien dessen Bestandteile geringere Primärmaterialabbauauswirkungen verursachen als NMC-Batterien oder NCA-Batterien.
- Der Betriebsleistungsfaktor beträgt 75 % der gelisteten elektrischen Leistung des Maschinenparks, was einen hohen Stromverbrauch nach sich zieht.
- Angelieferte Batterien haben lediglich 5 % des ursprünglichen Energiegehalts als nutzbare Restenergie enthalten.
- Der Heizbedarf für die beheizten Gebäudeflächen beträgt 120 kWh pro Quadratmeter und Jahr.
- Die gesetzlich vorgeschriebenen Luftemissionsgrenzwerte werden zu 90 % ausgereizt (Tabelle 3, Anhang).
- Die Rückgewinnungsfaktoren für verschiedene Metalle starten bei 0.7 (Ni, Mn, Co, Li) bis 0.9 (Fe) und steigen im Laufe der Betriebsdauer nur geringfügig (Tabelle 4, Anhang).

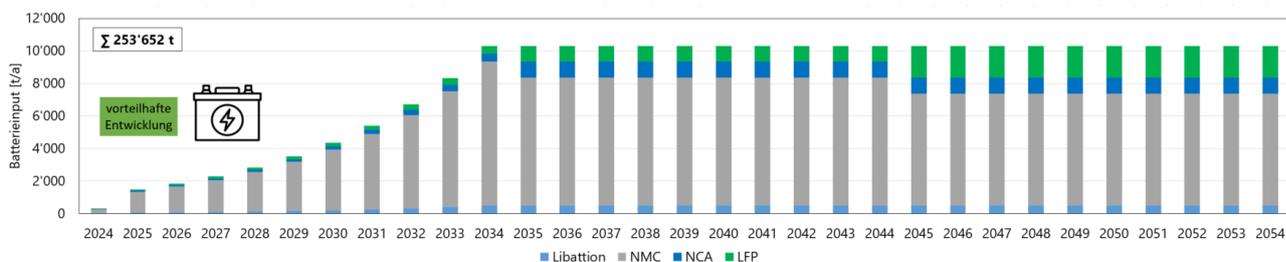


**Abbildung 5:** Batterieinput in die Librec-Anlage im Szenario *unvorteilhafte Entwicklung*. Sichtbar ist der eher langsame Anstieg auf die maximale Anlagenkapazität bis im Jahr 2044 und der hohe Anteil an LFP-Batterien. Im gesamten modellierten Zeitraum beträgt die Menge an behandelten Batterien 226'605 t.

### 3.3.2 Szenario vorteilhafte Entwicklung

Im Szenario *vorteilhafte Entwicklung* entwickeln sich verschiedene Parameter des Modells in einer Weise, dass die potenziellen Umweltauswirkungen des Librec-Verfahrens tiefer ausfallen, als erwartet:

- Von Anfang Oktober bis Ende Dezember 2024 werden in diesem Szenario bereits 300 t an Batterien prozessiert. Anschliessend steigt der Batterieinput in die Anlage vergleichsweise schnell auf die maximale Kapazität an, welche bereits im Jahr 2034 erreicht wird (Abbildung 6).
- Die eingehenden Batterietypen sind zum grössten Teil NMC-Batterien dessen Bestandteile grosse Primärmaterialabbauauswirkungen verursachen, weshalb ihr Recycling als besonders wichtig gilt.
- Der Betriebsleistungsfaktor beträgt lediglich 50 % der gelisteten elektrischen Leistung des Maschinenparks.
- Angelieferte Batterien haben 50 % des ursprünglichen Energiegehalts als nutzbare Restenergie enthalten, was einen bedeutenden Beitrag zur Deckung des Stromverbrauchs leistet.
- Der Heizbedarf für die beheizten Gebäudeflächen beträgt 80 kWh pro Quadratmeter und Jahr.
- Die gesetzlich vorgeschriebenen Luftemissionsgrenzwerte werden zu 10 % ausgereizt (Tabelle 3, Anhang).
- Die Rückgewinnungsfaktoren für verschiedene Metalle starten bei 0.85 (Li) bis 0.95 (Ni, Mn, Co) und steigen im Laufe der Betriebsdauer an (Tabelle 4, Anhang).



**Abbildung 6:** Batterieinput in die Librec-Anlage im Szenario *unvorteilhafte Entwicklung*. Sichtbar ist der schnelle Anstieg auf die maximale Anlagenkapazität bis im Jahr 2034 und der hohe Anteil an NMC-Batterien. Im gesamten modellierten Zeitraum beträgt die Menge an behandelten Batterien 253'652 t.

## 4 Resultate

### 4.1 Sachbilanz

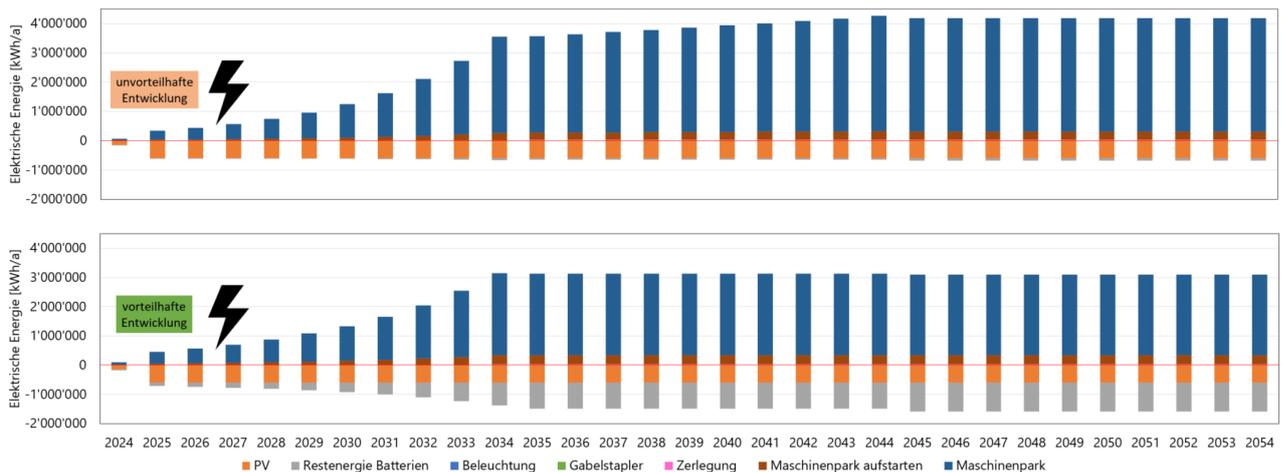
#### 4.1.1 Absolute Massen- und Energieflüsse

Mit den oben aufgeführten Annahmen und den benutzten Parameterwerten für die verschiedenen Szenarien lassen sich die während der Anlagenlebensdauer auftretenden Massen- und Energieflüsse berechnen. Die relevantesten Flüsse werden nachfolgend für die beiden betrachteten Szenarien beschrieben.

#### Elektrische Energie

Die für das Librec-Verfahren benötigte Energie wird hauptsächlich als elektrische Energie verbraucht. Der Stromverbrauch steigt mit dem Batterieinput in die Anlage, da mit dem Prozessieren grösserer Mengen an Batterien auch die Maschinen länger laufen müssen. Dies verursacht mit Abstand den grössten Teil des Stromverbrauchs – Energie für das Zerlegen der Batteriepacks, die Beleuchtung oder die Gabelstapler sind praktisch vernachlässigbar.

Im Szenario *vorteilhafte Entwicklung* ist der Stromverbrauch trotz hohem Batterieinput geringer als im Szenario *unvorteilhafte Entwicklung*, da mit einem niedrigeren Betriebsleistungsfaktor der Maschinen gerechnet wird. Zudem wird hier von grösseren Restenergiemengen gespeichert in den angelieferten Batterien ausgegangen, sodass insgesamt weniger Strom vom Netz bezogen werden muss (Abbildung 7). Die Stromproduktion der PV-Anlage wurde in beiden Szenarien gleich modelliert.

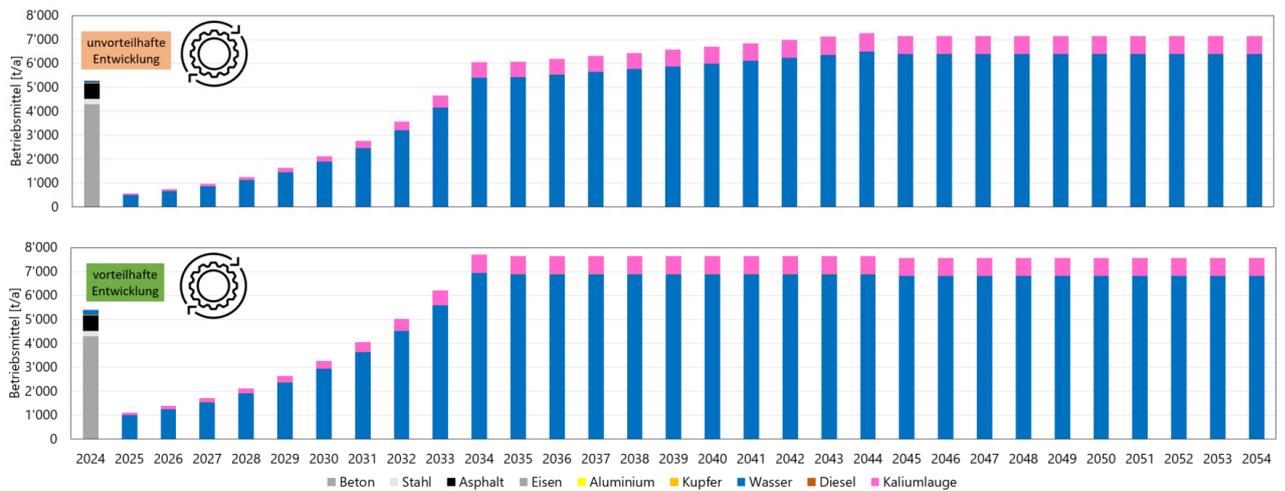


**Abbildung 7:** Stromverbrauch und Stromproduktion der Librec-Anlage im Szenario *unvorteilhafte Entwicklung* (oben) und *vorteilhafte Entwicklung* (unten) von 2024 bis 2054. Der Stromverbrauch ist auf der positiven Achse dargestellt (fließt von aussen in die Anlage rein), die Stromproduktion auf der negativen Achse (wird lokal genutzt bzw. fließt von der Anlage ins Netz).

## Baumaterialien und Betriebsmittel

Für die Errichtung der Librec-Anlage fallen 2024 bedeutende Mengen an Baumaterialien an, insbesondere Beton. Während des Betriebs fallen mit steigendem Batterieinput, grösser werdende Mengen an Wasser und Kaliumlauge (KOH) an. Diese Betriebsmittel werden für die Wäscher benötigt.

Die Baumaterialien wurden unabhängig von den Szenarien modelliert. Die benötigten Mengen an Betriebsmitteln fallen in beiden Szenarien ähnlich aus (Abbildung 8). Wasser, Diesel und Kaliumlauge sind vom Batterieinput der Szenarien abhängig.

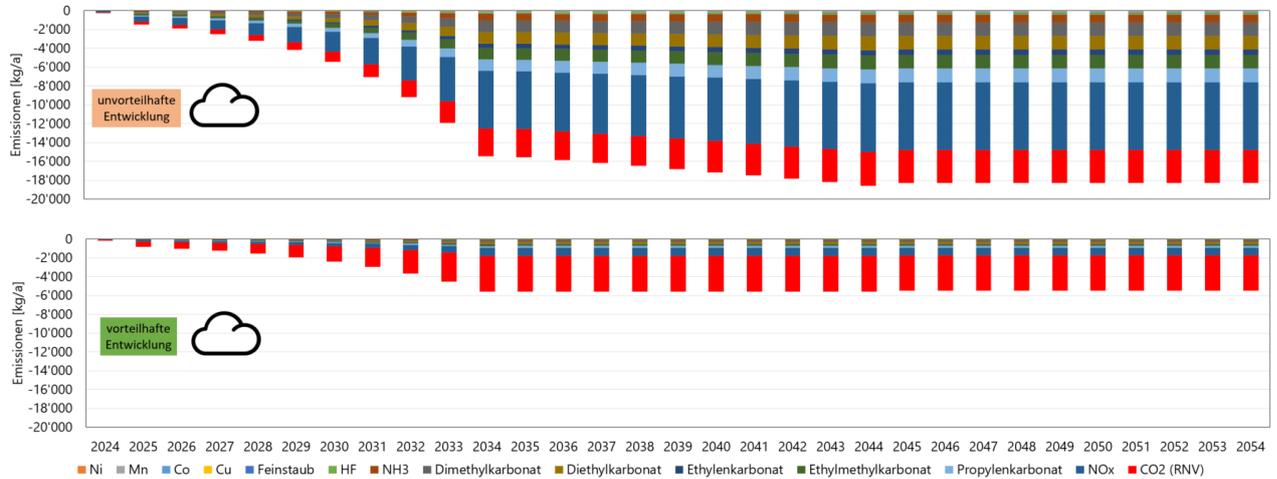


**Abbildung 8:** Baumaterial- und Betriebsmittelverbrauch der Librec-Anlage im Szenario *unvorteilhafte Entwicklung* (oben) und *vorteilhafte Entwicklung* (unten) von 2024 bis 2054.

## Luftemissionen

Gewisse Mengen an Schadstoffen entweichen trotz Abgasbehandlung in die Umwelt. Zudem oxidiert die RNV organische Stoffe zu CO<sub>2</sub>, welches ebenfalls in die Luft emittiert.

Im Szenario *vorteilhafte Entwicklung* werden deutlich weniger Schadstoffe emittiert, als im Szenario *unvorteilhafte Entwicklung*, da mit einer geringeren Ausreizung der Grenzwerte für Luftschadstoffe gerechnet wird (Abbildung 9). Das nach der regenerativen Nachverbrennung ausgestossene CO<sub>2</sub> liegt bei Erreichen der Maximalkapazität der Anlage voraussichtlich bei ungefähr 3 bis 4 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr.

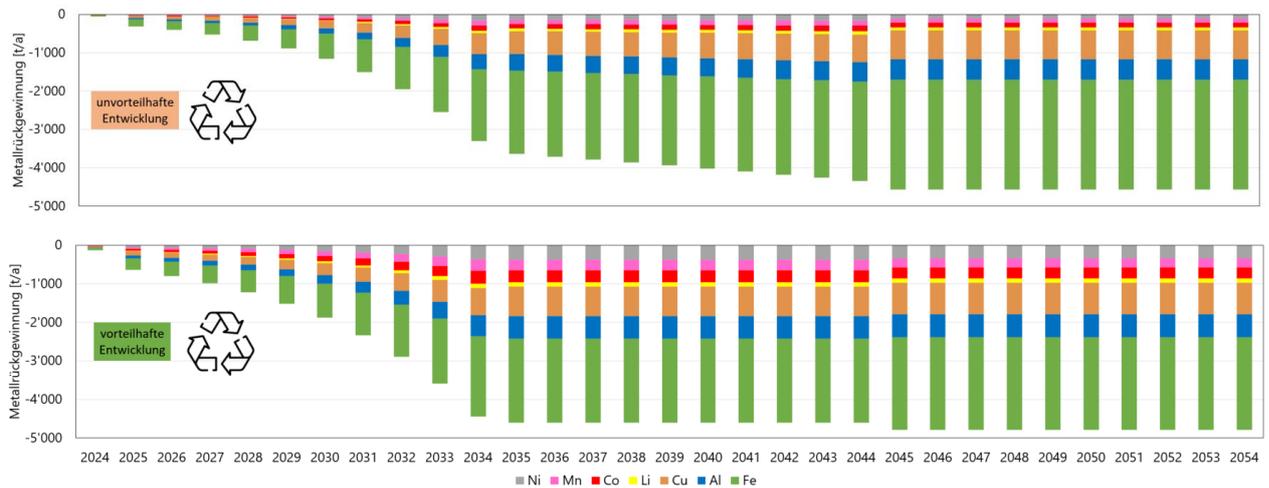


**Abbildung 9:** Luftemissionen der Librec-Anlage im Szenario *unvorteilhafte Entwicklung* (oben) und *vorteilhafte Entwicklung* (unten) von 2024 bis 2054. Die Emissionen sind auf der negativen Achse dargestellt, da sie die Anlage verlassen. Im Gegensatz zu den übrigen Massenflussdiagrammen werden die jährlichen Flüsse hier in Kilogramm und nicht in Tonnen beschrieben, da es sich um geringere Mengen handelt.

## Metallrückgewinnung

Nach der mechanischen Vorbehandlung von Batterien (Librec-Verfahren) wird die resultierende Schwarzmasse hydrometallurgisch weiter aufgeschlüsselt. Am Schluss dieser Aufbereitungskette kann ein Teil der eingehenden Metalle zurückgewonnen werden.

Die zurückgewonnene Menge an Metallen hängt vom modellierten Batterieinput und den angenommenen Rückgewinnungsfaktoren ab. Im Szenario *vorteilhafte Entwicklung* werden insbesondere mehr Ni, Mn und Co zurückgewonnen, als im Szenario *unvorteilhafte Entwicklung*, da mit einem höheren Anteil von NMC-Batterien am Batterieinput und höheren Rückgewinnungsfaktoren gerechnet wird (Abbildung 10).



**Abbildung 10:** Zurückgewonnene Metalle aus dem Librec-Verfahren und anschließender hydrometallurgischer Aufbereitung im Szenario *unvorteilhafte Entwicklung* (oben) und *vorteilhafte Entwicklung* (unten) von 2024 bis 2054. Die Metalle sind auf der negativen Achse dargestellt, da sie die Anlage verlassen.

#### 4.1.2 Relative Massen- und Energieflüsse

Um die potenziellen Umweltauswirkungen der betrachteten Szenarien anhand der funktionellen Einheit abzuschätzen, müssen die absoluten Massen- und Energieflüsse durch die prozessierte Masse an Batterien geteilt werden. Dies resultiert in den unten aufgeführten Inputs und Outputs, welche für das Prozessieren von 1 Tonne Batterien in der Librec-Anlage benötigt werden bzw. durch das Librec-Verfahren verursacht werden (Tabelle 1). Diese Werte werden als Ausgangslage für die Wirkungsabschätzung verwendet.

Als Grundlage für eine Einordnung der potenziell vermeidbaren Umweltauswirkungen, durch die Vermeidung von Primärmaterialabbau wurden in Tabelle 2 die abgeschätzten Mengen an zurückgewonnenen Metallen pro Tonne prozessierter Batterien aufgelistet.

**Tabelle 1:** Inputs an Energie und Masse welche für das Prozessieren von 1 Tonne Batterien im Librec-Verfahren voraussichtlich benötigt werden sowie Outputs, welche durch das Verfahren verursacht werden.

Massen- und Energieflüsse	Einheit	unvorteilhafte Entwicklung	vorteilhafte Entwicklung
<b>Energie</b>			
Elektrische Energie	kWh/t	351	150
Heizenergie	kWh/t	11.8	7.04
<b>Baumaterialien</b>			
Beton	kg/t	19.9	17.8
Armierungsstahl	kg/t	0.830	0.741
Asphalt	kg/t	2.98	2.66
Stahl	kg/t	0.278	0.249
Aluminium	kg/t	3.67E-03	3.28E-03
Kupfer	kg/t	3.65E-02	3.26E-02
<b>Betriebsmittel</b>			
Wasser	kg/t	674	701
Diesel	kg/t	0.232	0.238
Kaliumlauge	kg/t	8.00E-02	7.77E-02
<b>Luftemissionen</b>			
Ni	kg/t	-1.52E-03	-1.75E-04
Mn	kg/t	-7.58E-03	-8.76E-04
Co	kg/t	-1.52E-03	-1.75E-04
Cu	kg/t	-7.58E-03	-8.76E-04
Feinstaub	kg/t	-7.58E-03	-8.76E-04
HF	kg/t	-1.52E-02	-1.75E-03
NH <sub>3</sub>	kg/t	-9.10E-02	-1.05E-02
Dimethylkarbonat	kg/t	-0.152	-1.75E-02
Diethylkarbonat	kg/t	-0.152	-1.75E-02
Ethylenkarbonat	kg/t	-6.07E-02	-7.01E-03
Ethylmethylkarbonat	kg/t	-0.152	-1.75E-02
Propylenkarbonat	kg/t	-0.152	-1.75E-02
NO <sub>x</sub>	kg/t	-0.758	-8.76E-02
CO <sub>2</sub> (RNV)	kg/t	-0.371	-0.386
<b>Abwasser</b>			
Ablauge	kg/t	-0.416	-0.404

**Tabelle 2:** Die modellierte Menge an zurückgewonnenen Metallen pro Tonne prozessierter Batterien nach der kombinierten Aufbereitung von mechanischer Vorbehandlung (Librec-Verfahren) und hydrometallurgischen Verfahren.

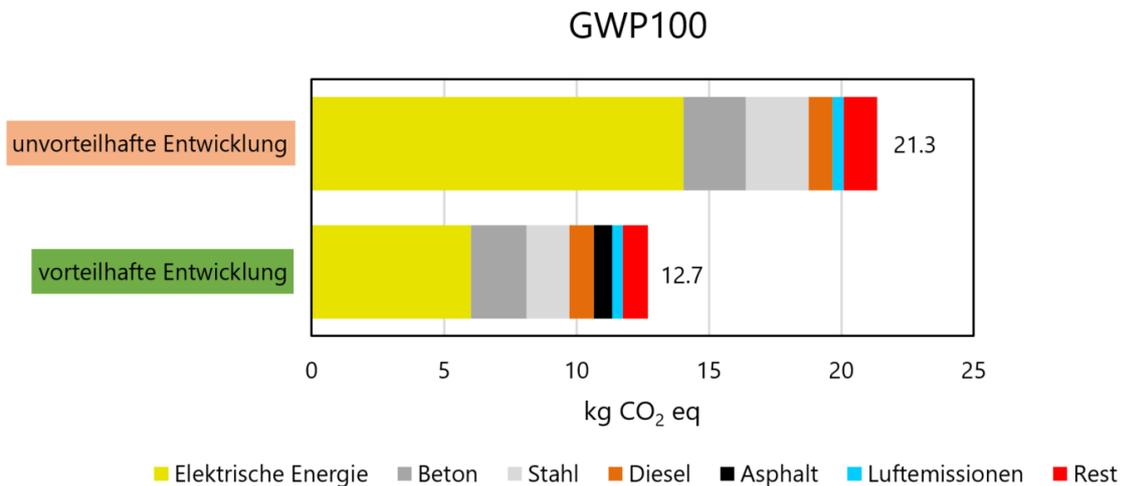
Zurückgewonnene Metalle	Einheit	unvorteilhafte Entwicklung	vorteilhafte Entwicklung
Ni	kg/t	15.8	36.6
Mn	kg/t	12.7	27.2
Co	kg/t	14.2	30.8
Li	kg/t	8.15	11.8
Cu	kg/t	76.1	79.1
Al	kg/t	53.79	59.4
Fe	kg/t	279	230

## 4.2 Wirkungsabschätzung

### 4.2.1 Potenzielle Umweltauswirkungen

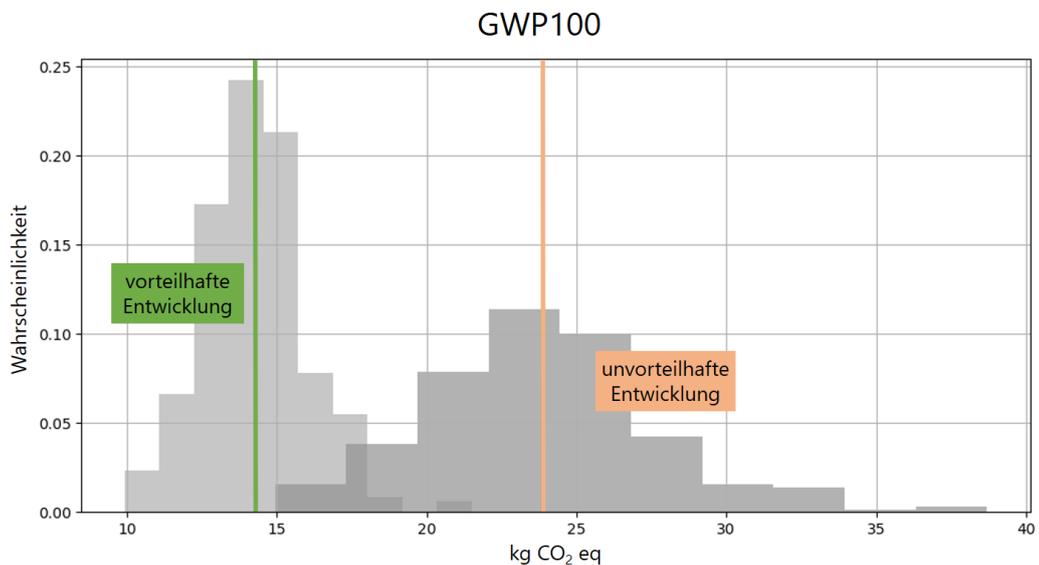
Multipliziert man die oben beschriebenen relativen Massen- und Energieflüsse mit den Charakterisierungsfaktoren der entsprechenden Materialien und Aktivitäten aus ecoinvent, erhält man die potenziellen Umweltauswirkungen der betrachteten Szenarien.

Für die Einflusskategorie GWP100, welche die Auswirkung auf den Klimawandel untersucht, zeigt sich, dass das Librec-Verfahren im Szenario *unvorteilhafte Entwicklung* 21.3 und im Szenario *vorteilhafte Entwicklung* 12.7 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Tonne prozessierter Batterien verursacht (Abbildung 11).



**Abbildung 11:** Potenzieller Klimawandelbeitrag des Prozessierens von einer Tonne Batterien im Librec-Verfahren.

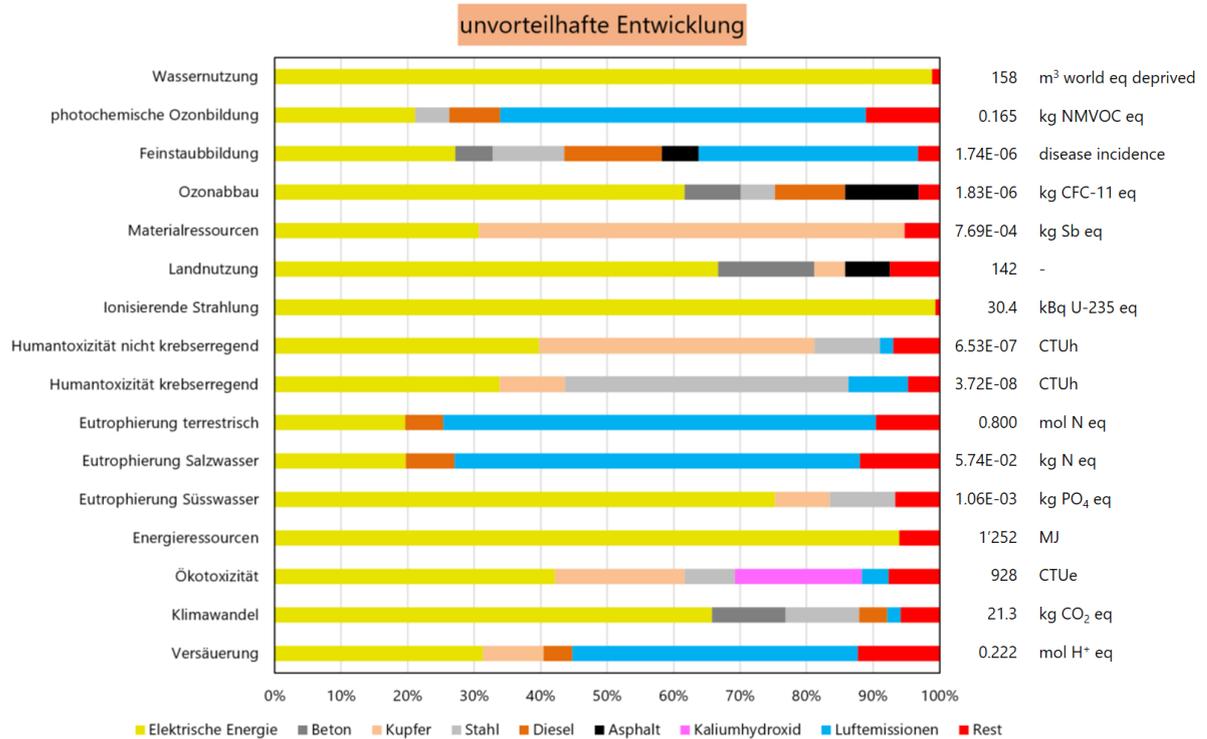
Die für die Berechnung benutzten Charakterisierungsfaktoren unterliegen einer gewissen Unsicherheit, welche in ecoinvent beschrieben wird. Diese kann mittels Durchführung einer Monte-Carlo-Simulation berücksichtigt werden. Das Resultat zeigt, dass im Librec-Verfahren voraussichtlich **ungefähr 10 bis 40 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Tonne prozessierter Batterien** verursacht werden (Abbildung 12).



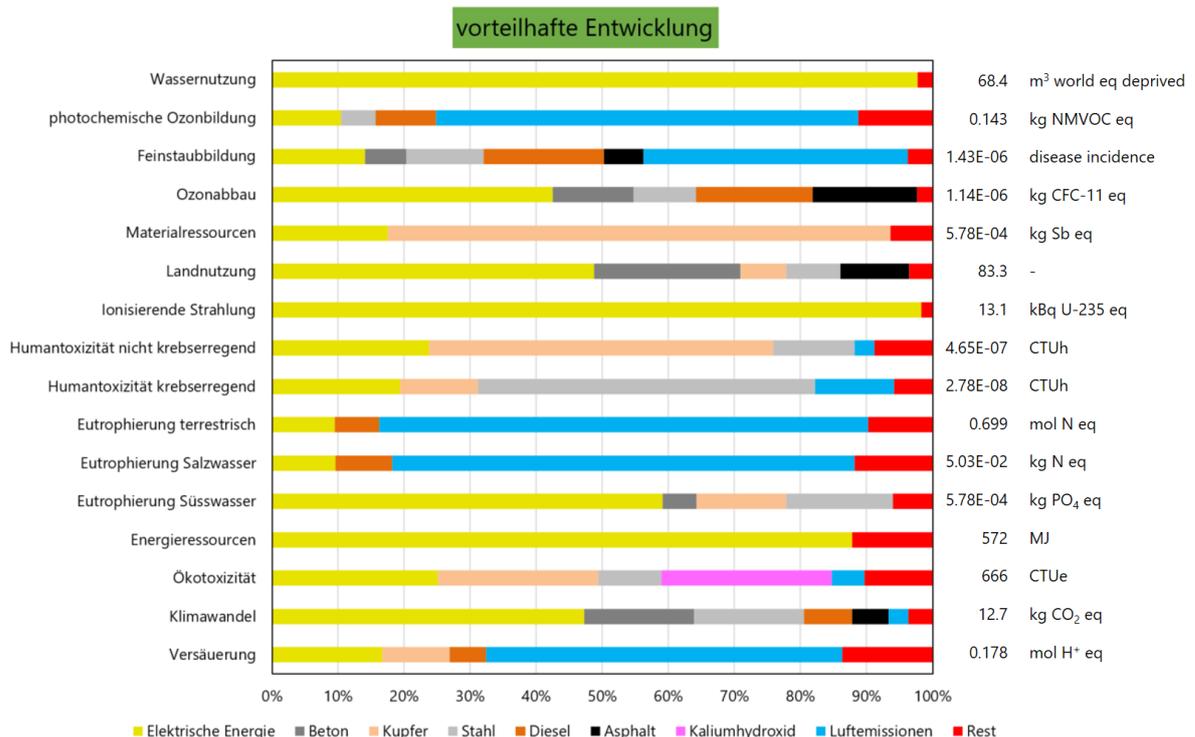
**Abbildung 12:** Monte-Carlo-Simulation mit 300 Iterationen für die Berechnung der Umweltauswirkungen auf den Klimawandel.

## Ökobilanzierung des Batterierecyclungsverfahrens der Librec AG

Eine Übersicht der abgeschätzten potenziellen Umweltauswirkungen von allen untersuchten Umweltkategorien ist in Abbildung 14 und 15 aufgeführt. Wie die aufgeführten Werte rechts der Diagramme zeigen, sind die potenziellen Umweltauswirkungen des Szenarios *vorteilhafte Entwicklung* je nach Umweltkategorie ungefähr 10 % bis 50 % tiefer als diejenigen des Szenarios *unvorteilhafte Entwicklung*.



**Abbildung 13:** Potenzielle Umweltauswirkungen des Prozessierens von einer Tonne Batterien im Librec-Verfahren im Szenario *unvorteilhafte Entwicklung*.

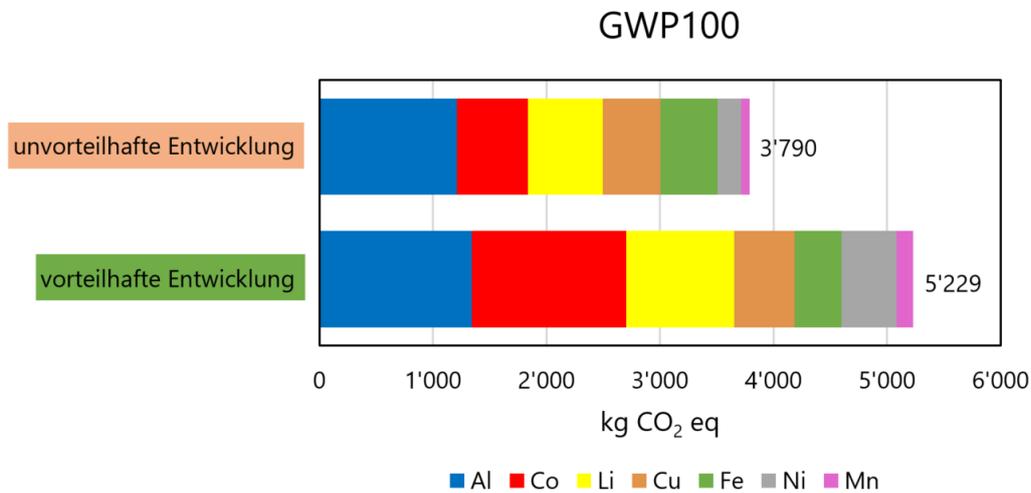


**Abbildung 14:** Potenzielle Umweltauswirkungen des Prozessierens von einer Tonne Batterien im Librec-Verfahren im Szenario *vorteilhafte Entwicklung*.

#### 4.2.2 Potenzielle vermeidbare Umweltauswirkungen

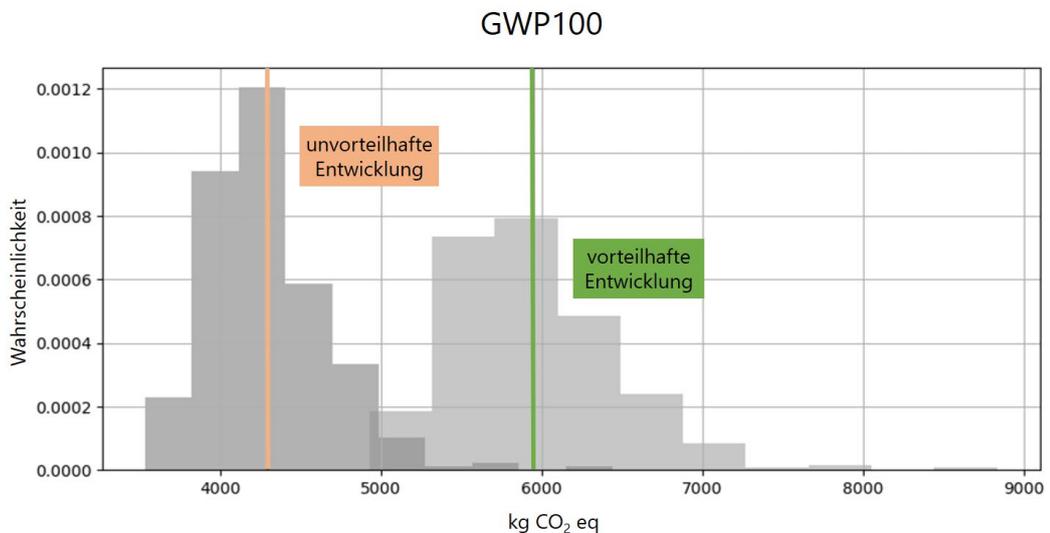
In der gleichen Art wie man die potenziellen Umweltauswirkungen berechnet, lassen sich auch grob die potenziellen Umweltauswirkungen abschätzen, die durch die Rückgewinnung von Metallen vermieden werden (da diese Metalle nicht primär abgebaut werden müssen).

Für die Einflusskategorie GWP100 und das Szenario *unvorteilhafte Entwicklung* betragen diese potenziell vermeidbaren Umweltauswirkungen 3'790 und im Szenario *vorteilhafte Entwicklung* 5'229 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Tonne prozessierter Batterien (Abbildung 16).



**Abbildung 15:** Potenziell vermeidbarer Klimawandelbeitrag des Prozessierens von einer Tonne Batterien entlang der gesamten mechanisch-hydrometallurgischen Aufbereitungskette. Das Librec-Verfahren deckt hierbei die mechanische Vorbehandlung ab.

Auch hier kann die Unsicherheit mittels Durchführung einer Monte-Carlo-Simulation berücksichtigt werden. Das Resultat zeigt, dass die potenziell vermeidbaren Umweltauswirkungen **ungefähr zwischen 3'500 bis 8'000 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Tonne prozessierter Batterien entlang der mechanisch-hydrometallurgischen Aufbereitungskette** liegen (Abbildung 17).



**Abbildung 16:** Monte-Carlo-Simulation mit 300 Iterationen für die Berechnung der potenziell vermeidbaren Umweltauswirkungen auf den Klimawandel.

## 5 Diskussion

### 5.1 Auswertung

Abbildung 11 zeigt, dass in beiden betrachteten Szenarien der Bezug von elektrischer Energie gut die Hälfte der modellierten potenziellen Klimawandelbeiträge verursacht. Für die übrigen Umweltkategorien macht der Beitrag der Elektrizität zwischen 10 % und 90 % aus. Im Szenario *unvorteilhafte Entwicklung* ist der Bezug von Elektrizität in 7 von 16 untersuchten Umweltkategorien für mehr als die Hälfte der Auswirkungen verantwortlich, im Szenario *vorteilhafte Entwicklung* in 4 Kategorien (Abbildung 14 und 15). Bei der Modellierung des Netzbezugs für das Librec-Verfahren wurde die werkseigene Produktion von Elektrizität bereits abgezogen. Der Betrieb der PV-Anlage und die Entladung der angelieferten Batterien leisten somit einen wichtigen Beitrag, damit die potenziellen Umweltauswirkungen minimiert werden können. Insbesondere, zumal der durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Gehalt im Schweizer Strom in letzter Zeit weiter gestiegen ist (VSE, 2023). Langfristig sollte der Ausbau an erneuerbaren Energien voraussichtlich zu einem Rückgang der durch die Elektrizität verursachten Klimabeiträge führen. Kurz- und mittelfristig können durch den Bezug von Elektrizität aus zertifizierter Herkunft die betriebseigenen Umweltauswirkungen in diesem Bereich weiter gesenkt werden.

Was die Kategorien Klimawandel, Feinstaubbildung und Ozonabbau angehen, ist die Verwendung von Diesel für die Gabelstapler in der Wirkungsabschätzung gut sichtbar (Abbildung 14 und 15). Diese Beiträge können durch die Verwendung von elektrischen Gabelstaplern eliminiert werden, was den elektrischen Energiebedarf nur leicht erhöhen würde.

Beton und Stahl haben bedeutende Anteile an den totalen Klimawandelbeiträgen der betrachteten Szenarien (Abbildung 11). Stahl und Kupfer sind zudem für grosse Anteile in den Kategorien Human- und Ökotoxizität verantwortlich (Abbildung 14 und 15). Bei Beton sind die Beiträge in erster Linie auf die CO<sub>2</sub>-intensive Herstellung von Zement zurückzuführen, bei den Metallen auf die umfassenden Bergbauarbeiten, die energieintensive Raffination und die dabei freigesetzten Luftemissionen. Beton, Stahl, Kupfer, aber auch anderen Baumaterialien, wie Asphalt, gilt es nach Ende der Anlagenlebensdauer fachgerecht zu recyceln, um möglichst viele Umweltauswirkungen die bei der Erstproduktion auftreten zu vermeiden.

Die Bereitstellung von Kaliumhydroxid ist für ca. 15 % bis 20 % der totalen potenziellen Umweltauswirkung in der Kategorie Ökotoxizität verantwortlich, fällt in anderen Umweltkategorien aber kaum ins Gewicht.

Die modellierten Luftemissionen aus der Abgasbehandlung, sind insbesondere für die Kategorien photochemische Ozonbildung, Feinstaubbildung, Eutrophierung und Versäuerung relevant – bezüglich dem Klimawandelbeitrag ist ihr Einfluss gering. Insbesondere betreffend den Luftemissionen ist die Aktualisierung des Modells mit gemessenen Werten besonders interessant.

### 5.2 Einordnung der Resultate

Gemäss obiger Wirkungsabschätzung stehen 10 bis 40 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Tonneprozessierter Batterien im Librec-Verfahren einem potenziell vermeidbaren Klimabeitrag von 3'500 bis 8'000 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalenten aus der Rückgewinnung von Metallen gegenüber. Hierbei ist jedoch essenziell zu betonen, dass dies eine hydrometallurgische Aufbereitung voraussetzt, welche nicht Bestandteil der Untersuchung dieser Ökobilanzierung war. Eine solche Aufbereitung beinhaltet weitere mechanische Aufbereitungsschritte, z. T. thermische Vorbehandlungen, Löse- und Flotationsverfahren und den Einsatz von grösseren Mengen an verschiedenen Chemikalien. Gemäss Literaturwerten liegt der Klimabeitrag eines solchen Verfahrens bei ungefähr 1'900 (Kallitsis et al., 2022)

bzw. 2'700 bis 3'300 (Abdelbaky et al., 2023) Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Tonne prozessierter Batterien.

Diese Grössenordnungen relativieren das Ausmass der potenziell vermeidbaren Umweltauswirkungen durch die Rückgewinnung von Metallen etwas und zeigen das Verhältnis der potenziellen Umweltauswirkungen in der Aufbereitungskette von Batterien (mechanische + hydrometallurgische Verfahren) auf. Hierbei ist festzuhalten, dass das Librec-Verfahren einen wichtigen Anteil an dieser Aufbereitung trägt, jedoch sich diese potenziell vermiedenen Umweltauswirkungen bei weitem nicht alle selbst zuschreiben kann. Das Recycling von Batterien ist ein Zusammenspiel aus Sammlung, Transport, mechanischer und hydrometallurgischer Aufbereitung.

## 6 Fazit

Der Zuwachs an batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen wird mittel- und langfristig zu grossen Mengen an Altbatterien führen. Vor diesem Hintergrund baut die Librec Batterierecycling AG in Biberist momentan eine Anlage auf, in welcher Elektroautoaltbatterien mittels mechanischen Prozessen zerkleinert und in ihre Bestandteile separiert werden. Die dabei abgesonderte Schwarzmasse wird in einem anschliessenden hydrometallurgischen Verfahren bei externen Partnerfirmen weiter aufgetrennt.

Das Librec-Verfahren benötigt bedeutende Mengen an elektrischer Energie, Betriebsmitteln und Baumaterialien (für die Errichtung der Anlage). Zudem werden durch das Prozessieren von Batterien Luftemissionen freigesetzt und Abwässer produziert. Im Rahmen der vorliegenden Ökobilanzierung wurden das Ausmass der potenziellen Umweltauswirkungen des Librec-Verfahrens abgeschätzt und ökologische Hotspots identifiziert.

Die Abschätzung zeigt, dass insbesondere Anstrengungen zur Reduktion des Energieverbrauchs, zur Nutzung von Stromquellen mit geringem CO<sub>2</sub>-Gehalt und zur stetigen Optimierung der Abgasbehandlung einen signifikanten Beitrag zur ökologischen Optimierung des Librec-Verfahrens leisten.

Das Ausmass der potenziellen Umweltauswirkungen des Librec-Verfahrens ist im Vergleich zum nachfolgenden hydrometallurgischen Verfahren gering. Trotzdem resultieren am Ende der Aufbereitungskette von Altbatterien beachtliche Mengen an potenziell vermeidbaren Umweltauswirkungen, da durch die Rückgewinnung von Metallen weniger Primärmaterialabbau benötigt wird.

Die hier durchgeführte zukunftsorientierte Betrachtung ist mit Unsicherheiten verbunden. Es macht deshalb Sinn, in Zukunft die Sachbilanz mit gemessenen Werten zu aktualisieren und weitere Bilanzierungen durchzuführen, um zu überprüfen, wie sich der Umwelteinfluss des Prozesses entwickelt. Für zukünftige Untersuchungen wären zudem Vergleiche mit anderen mechanischen Vorbehandlern von LIB interessant.

## 7 Quellen

- Abdelbaky, M., Schwich, L., Henriques, J., Friedrich, B., Peeters, J. R., & Dewulf, W. (2023). Global warming potential of lithium-ion battery cell production: Determining influential primary and secondary raw material supply routes. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 9, 100130. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2023.100130>
- ADAC. (2023, Juni 16). *Wann wird welcher Hersteller elektrisch?* <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/auto/ausstieg-verbrennungsmotor/>
- Buchert, M., Jenseit, W., Merz, C., & Schüler, D. (2011). *Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec).pdf*. Öko-Institut.
- Europäisches Parlament. (2022, November 3). *EU-Verkaufsverbot für neue Benzin- und Dieselfahrzeuge ab 2035 – Was bedeutet das?* Themen | Europäisches Parlament. <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20221019STO44572/verkaufsverbot-fur-neue-benzin-und-dieselfahrzeuge-ab-2035-was-bedeutet-das>
- Kallitsis, E., Korre, A., & Kelsall, G. H. (2022). Life cycle assessment of recycling options for automotive Li-ion battery packs. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133636. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133636>
- Kwade, A., & Diekmann, J. (Hrsg.). (2018). *Recycling of Lithium-Ion Batteries*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70572-9>
- Swiss eMobility. (2023). *Zahlen und Analysen zur Marktentwicklung der Elektromobilität in der Schweiz*. <https://www.swiss-emobility.ch/de/Aktuell/Statistiken/>
- VSE. (2023, April 28). *Der CO<sub>2</sub>-Gehalt im Schweizer Strom steigt*. <https://www.strom.ch/de/pressemitteilung/der-co2-gehalt-im-schweizer-strom-steigt>
- Zheng, X., Zhu, Z., Lin, X., Zhang, Y., He, Y., Cao, H., & Sun, Z. (2018). A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium Ion Batteries. *Engineering*, 4(3), 361–370. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.018>

## 8 Anhang

**Tabelle 3:** Gesetzlich vorgeschriebenen Luftemissionsgrenzwerte und die davon abgeleiteten Parameter, welche für die Modellierung der Sachbilanz der zwei betrachteten Szenarien benutzt wurden.

Schadstoff	Einheit	LRV-Grenzwert	unvorteilhafte Entwicklung	vorteilhafte Entwicklung
Ni	g/h	5	4.5	0.5
Mn	g/h	25	22.5	2.5
Co	g/h	5	4.5	0.5
Cu	g/h	25	22.5	2.5
Feinstaub	g/h	25	22.5	2.5
HF	g/h	50	45	5
NH <sub>3</sub>	g/h	300	270	30
Dimethylkarbonat	g/h	500	450	50
Diethylkarbonat	g/h	500	450	50
Ethylenkarbonat	g/h	200	180	20
Ethylmethylkarbonat	g/h	500	450	50
Propylenkarbonat	g/h	500	450	50
NO <sub>x</sub>	g/h	2'500	2'250	250

**Tabelle 4:** Festgelegte Rückgewinnungsfaktoren von Metallen für die zwei betrachteten Szenarien.

	Metall	2024 - 2034	2035 - 2044	2045 - 2054
unvorteilhafte Entwicklung	Ni	0.70	0.75	0.78
	Mn	0.70	0.75	0.78
	Co	0.70	0.75	0.78
	Li	0.70	0.75	0.78
	Cu	0.80	0.85	0.88
	Al	0.80	0.85	0.88
	Fe	0.90	0.95	0.98
vorteilhafte Entwicklung	Ni	0.95	0.97	0.98
	Mn	0.95	0.97	0.98
	Co	0.95	0.97	0.98
	Li	0.85	0.90	0.93
	Cu	0.90	0.95	0.98
	Al	0.90	0.95	0.98
	Fe	0.95	0.95	0.98

