

## Ökobilanzen zum Recyclingverfahren EcoBatRec für Lithium-Ionen-Batterien

Berlin, Darmstadt,  
16.11.2015

### **Autoren**

Matthias Buchert  
Jürgen Sutter

### **Geschäftsstelle Freiburg**

Postfach 17 71  
79017 Freiburg

#### **Hausadresse**

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

### **Büro Berlin**

Schicklerstraße 5-7  
10179 Berlin  
Telefon +49 30 405085-0

### **Büro Darmstadt**

Rheinstraße 95  
64295 Darmstadt  
Telefon +49 6151 8191-0

[info@oeko.de](mailto:info@oeko.de)  
[www.oeko.de](http://www.oeko.de)



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>1. Zusammenfassung</b>	<b>5</b>
<b>2. Hintergrund der Studie und Aufbau des Berichts</b>	<b>7</b>
<b>3. Ziele und Untersuchungsrahmen</b>	<b>8</b>
<b>3.1. Ziele und Anwendungen der Studie</b>	<b>8</b>
<b>3.2. Festlegung des Untersuchungsrahmens</b>	<b>9</b>
3.2.1. Funktion und funktionelle Einheit	9
3.2.2. Festlegung der Systemgrenzen	10
3.2.3. Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität	11
3.2.4. Allokation	13
3.2.5. End-of-Life Allokation	14
3.2.6. Berücksichtigte Wirkungskategorien	14
3.2.7. Methoden der Auswertung	18
3.2.8. Konformität und kritische Prüfung	18
3.2.9. Einschränkungen, Verwendung und Zielgruppen	18
3.2.10. Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts	19
<b>4. Sachbilanz</b>	<b>19</b>
<b>4.1. Prozessbeschreibung</b>	<b>19</b>
<b>4.2. Datengrundlage</b>	<b>20</b>
4.2.1. Spezifische Daten	20
4.2.2. Generische Datensätze	23
4.2.3. Modellierung der Transporte	24
4.2.4. Normierung	26
4.2.5. Modellierung der Gutschriften	26
<b>4.3. Einschätzung der Datenqualität</b>	<b>29</b>
<b>5. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung</b>	<b>30</b>
<b>5.1. NMC-Batterien mit Aluminium-Gehäuse</b>	<b>30</b>
5.1.1. Treihauspotenzial (GWP)	30

5.1.2.	Versauerungspotenzial (AP)	32
5.1.3.	Eutrophierungspotenzial (EP)	33
5.1.4.	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)	34
5.1.5.	Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP elem.)	35
5.1.6.	Kumulierter Energieaufwand (CED total)	36
5.1.7.	Normierte Darstellung	37
<b>5.2.</b>	<b>LFP-Batterien</b>	<b>38</b>
5.2.1.	Treibhauspotenzial (GWP)	38
5.2.2.	Versauerungspotenzial (AP)	39
5.2.3.	Eutrophierungspotenzial (EP)	39
5.2.4.	Photochemisches Ozonbildungspotenzial (POCP)	40
5.2.5.	Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP, elem)	41
5.2.6.	Primärenergieverbrauch, gesamt (CED, total)	42
5.2.7.	Normierte Darstellung	43
<b>6.</b>	<b>Auswertung</b>	<b>44</b>
<b>6.1.</b>	<b>Identifizierung der signifikanten Parameter</b>	<b>44</b>
<b>6.2.</b>	<b>Beurteilung</b>	<b>49</b>
6.2.1.	Vollständigkeitsprüfung	49
6.2.2.	Sensitivitätsprüfung	50
6.2.2.1.	NMC-Batterien mit CFK-Gehäuse	50
6.2.2.2.	NMC-Batterien mit Edelstahlgehäuse	58
6.2.2.3.	Vakuumverdampfung	64
6.2.2.4.	Cobalt-Datensatz	67
6.2.3.	Konsistenzprüfungen	68
<b>6.3.</b>	<b>Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen</b>	<b>68</b>
<b>7.</b>	<b>Literatur</b>	<b>71</b>
	<b>Annex 1: Verwendete generische Datensätze</b>	<b>75</b>
	<b>Annex 2: Externes kritisches Gutachten</b>	<b>78</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Systemgrenze des EcoBatRec-Prozesses, FU: Recycling von 1000 kg EoL-Batterien	11
Abbildung 5-1:	GWP: NMC Batterien mit Al-Gehäuse	30
Abbildung 5-2:	AP: NMC Batterien mit Al-Gehäuse	32
Abbildung 5-3:	EP: NMC Batterien mit Al-Gehäuse	33
Abbildung 5-4:	POCP: NMC Batterien mit Al-Gehäuse	34
Abbildung 5-5:	ADP, elem.: NMC Batterien mit Al-Gehäuse	35
Abbildung 5-6:	CED, total: NMC Batterien mit Al-Gehäuse	36
Abbildung 5-7:	Normierte Emissionen: NMC-Batterien mit Al-Gehäuse	37
Abbildung 5-8:	GWP: LFP-Batterien	38
Abbildung 5-9:	AP: LFP-Batterien	39
Abbildung 5-10:	EP: LFP-Batterien	40
Abbildung 5-11:	POCP: LFP-Batterien	41
Abbildung 5-12:	ADP, elem.: LFP-Batterien	42
Abbildung 5-13:	CED, total: LFP-Batterien	43
Abbildung 5-14:	Normierte Emissionen: LFP-Batterien	44
Abbildung 6-1:	GWP: NMC-Batterien mit CFK-Gehäuse	53
Abbildung 6-2:	AP: NMC Batterien mit CFK-Gehäuse	54
Abbildung 6-3:	EP: NMC-Batterien mit CFK-Gehäuse	55
Abbildung 6-4:	POCP: NMC-Batterien mit CFK -Gehäuse	56
Abbildung 6-5:	ADP, elem.: NMC-Batterien mit CFK -Gehäuse	57
Abbildung 6-6:	CED, total: NMC-Batterien mit CFK-Gehäuse	58
Abbildung 6-7:	GWP: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse	59
Abbildung 6-8:	AP: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse	60
Abbildung 6-9:	EP: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse	61
Abbildung 6-10:	POCP: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse	62
Abbildung 6-11:	ADP, elem.: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse	63
Abbildung 6-12:	CED, total: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse	64

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Charakterisierungsfaktoren für den $ADP_{elem}$	17
Tabelle 4-1:	Generische Zusammensetzung NMC-Batterien	21
Tabelle 4-2:	Generische Zusammensetzung LFP-Batterien	22
Tabelle 4-3:	Herkunft der prozessspezifischen Daten	23
Tabelle 4-4:	Annahmen bei der Modellierung der Transporte	25
Tabelle 4-5:	Verwendete Normierungsfaktoren	26
Tabelle 4-6:	Gegenüberstellung der rezyklierten Materialien, des angelasteten Recyclingprozesses sowie der für das Recyclingmaterial erteilten Gutschrift	28
Tabelle 6-1:	NMC-Batterien mit Al-Gehäuse: Einfluss der Recyclingstufen auf die Ergebnisse der Wirkungskategorien (getrennt nach Gut- und Lastschrift)	46
Tabelle 6-2:	LFP-Batterien mit Al-Gehäuse: Einfluss der Recyclingstufen auf die Ergebnisse der Wirkungskategorien (getrennt nach Gut- und Lastschrift)	48
Tabelle 6-3:	Generische Zusammensetzung NMC-Batterien (CFK, Stahl)	51
Tabelle 6-4:	Vergleich Vakuumverdampfung vs. Schleppegasverdampfung (NMC-Batterien mit Al-Gehäuse)	65
Tabelle A-1:	Für die Ökobilanz verwendete generische Datensätze	75

## 1. Zusammenfassung

### Hintergrund der Studie

Das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderte Projekt „EcoBatRec - Demonstrationsanlage für ein kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Li-Ion Batterien“ wurde zwischen Frühjahr 2012 und Frühjahr 2016 unter der Koordination der Accurec Recycling GmbH mit dem Verbundpartner RWTH Aachen durchgeführt.

Die Eigendarstellung von EcoBatRec findet sich unter:

<http://www.ecobatrec.de/>

Die Verfahren zur Rückgewinnung von Lithium, Kobalt und weiteren Rohstoffen sind sowohl von ökologischer als auch von strategischer Bedeutung für die Sicherung von Rohstoffen für die Batterieproduktion in Deutschland. Die Ökobilanz dient zur Unterstützung der Bewertung des sich in Entwicklung befindlichen Recyclingverfahrens im Rahmen des EcoBatRec-Projektes. Die vorliegende Bilanz bildet den Stand des Projekts im Herbst 2015 ab, eine Aktualisierung wird nach dem Bau und den ersten Testläufen einer Demonstrationsanlage bis Frühjahr 2016 erfolgen.

Das Öko-Institut war als assoziierter Partner für die Konzeption und Realisierung der LCA-Arbeiten und für die Koordination der Umbrellagruppe LCA verantwortlich.

### Recyclingroute und funktionelle Einheiten

Die Systemgrenzen für die Bilanzierung des EcoBatRec-Recyclingverfahrens umfassen die folgenden Module:

- Zerlegung der Batteriesysteme bis auf Zellebene
- Thermische Pyrolyse der Zellen
- Mechanische Zerlegung der pyrolysierten Zellen
- Gewinnung von metallischen Lithium in einem Verdampfungsschritt
- pyrometallurgische Aufbereitung des abgereicherten Elektrodenmaterials

Die funktionelle Einheit und der Referenzfluss für die Ökobilanzen des EcoBatRec-Verfahrens sind das Recycling von 1000 kg Batterien entsprechend dem Typ NMC (Nickel/Mangan/Kobalt) bzw. dem Typ LFP (Lithiumeisenphosphat).

### Ergebnisse

Die Gesamtauswertung der Ökobilanzergebnisse für das Recycling des Batterietyps NMC mit Aluminiumgehäuse ergibt für alle untersuchten Wirkungskategorien, d. h. Treibhauspotenzial (GWP), Kumulierter Energieaufwand (CED total), Versauerungspotenzial (AP), Verbrauch an abiotischen Ressourcen ( $ADP_{elem.}$ ), Eutrophierung (EP) und Bildung von Photooxidantien (POCP), z. T. deutliche Nettogutschriften. Zu diesem Ergebnis tragen vor allem die Schritte der Batterie-, Modul- und Zellzerlegung bei. Die pyrometallurgische

Aufbereitung des Aktivmaterials führt zumeist ebenfalls zu Netto-Gutschriften, beim Treibhauspotential und dem Primärenergiebedarf jedoch nicht. Nicht zuletzt die Ergebnisse bzgl. des Versauerungspotenzials und des Verbrauchs an abiotischen Ressourcen waren für ein Recyclingverfahren, welches primär auf die Gewinnung von Sekundärmetallen bzw. deren Verbindungen zielt, zu erwarten (Gutschriften bzgl. abiotischer Primärressourcen sowie Säurebildneremissionen aus der Erzaufbereitung). Die hohen Rückgewinnungsraten von batteriefähigen Kobalt- (98%), Nickel- (99%) und Manganverbindungen (99%) sowie metallischem Lithium (73%) aus dem Verdampfungsprozess tragen wesentlich zum guten Gesamtergebnis der Ökobilanz bei.

Die Ökobilanzergebnisse für das Recycling des Batterietyps LFP weisen in der Gesamtschau ähnliche Tendenzen aus. In allen untersuchten Wirkungskategorien werden über den gesamten Prozess Nettogutschriften erzielt. Zu diesem Ergebnis tragen aber fast nur die Schritte der Batterie-, Modul- und Zellzerlegung bei. Die pyrometallurgische Aufbereitung des Aktivmaterials führt zu vernachlässigbaren oder beim Treibhauspotential sogar negativen Beiträgen. Unterschiede zeigen sich auch in den Detailergebnissen bei den einzelnen Prozessschritten. So ist beim GWP im Schritt Pyrometallurgische Aufbereitung die Gutschrift geringer, da nur Eisen, jedoch keine batteriefähigen Kobalt-, Nickel- und Manganverbindungen zurückgewonnen werden können (da in diesem Kathodentyp nicht enthalten). Andererseits sind die Lasten bzgl. GWP in diesem Modul ebenso geringer im Vergleich zum gleichen Modul für den NMC-Typ.

Unabhängig vom Batterietyp ergeben sich positive Beiträge, d. h. deutliche Nettogutschriften, für alle untersuchten Wirkungskategorien aus dem ersten Schritt „Demontage“. Verantwortlich hierfür sind vor allem hohe Gutschriften für die Rückgewinnung von Wertstoffen wie z. B. Aluminium und Edelstahl aus dem Gehäuse, Kupfer aus diversen Komponenten und Edelmetalle aus dem Batteriemanagementsystem. Dies lässt die Bewertung zu, dass eine sorgfältige Zerlegung der Batterien essentiell für ein positives Gesamtergebnis des gesamten Recyclingprozesses sind. Die Zellmaterialien sind nicht zuletzt aufgrund ihrer wertvollen Metallverbindungen (Nickel-, Kobalt-, Lithiumverbindungen etc.) wichtig und interessant für die Recyclingwirtschaft und unter dem Gesichtspunkt der Ressourcenschonung. Die sonstigen Komponenten, die im 1. Schritt entnommen und in die Recyclingwirtschaft überführt werden, machen jedoch über die Hälfte des gesamten Batteriegewichts aus.

### Sensitivitätsanalysen

Die Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen bzgl. alternativer Gehäusematerialien (Edelstahl bzw. kohlefaserverstärkte Kunststoffe) unterstützen den Befund der Relevanz des 1. Schrittes „Demontage“. Die Gutschriften für die Entnahme und das Recycling des Gehäusematerials fallen bei Edelstahl moderat und bei den kohlefaserverstärkten Kunststoffen deutlich geringer aus.

Die Sensitivitätsanalyse eines alternativen Lithium-Verdampfungsverfahrens (Vakuumverdampfung) zeigt eine etwas höhere Nettogutschrift bei der Verwendung des Vakuumverfahrens.

## Einschränkungen

In den Systemgrenzen der vorliegenden Ökobilanz ist weder die Herstellung der Batterie noch die Nutzungsphase der Batterie im entsprechenden Fahrzeug bilanziert. Gerade die Leichtbaumaterialien Aluminium und kohlefaserverstärkte Kunststoffe (hier für das gewichtsrelevante Batteriegehäuse) wären für eine Bilanzierung der Nutzungsphase im Vergleich zu einer Batterie mit schwererem Edelstahlgehäuse von Interesse. Aussagen hierzu können jedoch im Rahmen dieser Ökobilanz aufgrund der gesetzten Systemgrenzen nicht getroffen werden. Weiterhin gelten alle Ergebnisse unter der Prämisse, dass die zu recycelnden Batterien keine Umweltlast tragen.

Die Ökobilanzergebnisse zum EcoBatRec-Recyclingverfahren müssen unter dem Vorbehalt bewertet werden, dass die Sachbilanzdaten teilweise auf Einzel- und Laborversuchen beruhen. Schließlich ist hervorzuheben, dass die Ergebnisse dieser Ökobilanz für das Batterierecycling nach dem EcoBatRec-Verfahren keinesfalls mit den Ökobilanzergebnissen anderer Batterierecyclingverfahren verglichen werden können. Es wurde in diesem Sinne keine vergleichende Ökobilanz durchgeführt.

## Fazit und Empfehlungen

Für das Recycling der untersuchten Batterietypen nach dem EcoBatRec-Verfahren ergeben die Ökobilanzergebnisse für alle Wirkungskategorien deutliche Nettogutschriften. Eine Realisierung des Gesamtprozesses im Rahmen einer Pilotanlage oder gar auf großtechnischer Ebene steht noch aus. Hier könnten in einigen Modulen größere Lasten auftreten, auf der anderen Seite wären durchaus noch Minderungspotenziale zu erwarten. Erneute LCA-Studien zur Validierung der Ergebnisse dieser Studie in einigen Jahren werden empfohlen, wenn das Recyclingverfahren nach EcoBatRec in die großtechnische Umsetzung gelangt ist.

## 2. Hintergrund der Studie und Aufbau des Berichts

Die Ökobilanz ist als begleitende Untersuchung für die Weiterentwicklung eines Recyclingverfahrens für Lithium-Ionen-Batterien aus dem Automobilssektor (hier nach dem Weg des EcoBatRec-Projektes) angelegt. Das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderte Projekt „EcoBatRec - Demonstrationsanlage für ein kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Li-Ion Batterien“ ist eines von zwei parallelen BMUB-Projekten, die die Entwicklung von Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Traktionsbatterien zum Gegenstand haben.

Das Projekt EcoBatRec wird zwischen Frühjahr 2012 und Frühjahr 2016 unter der Koordination der Accurec Recycling GmbH mit dem Verbundpartner RWTH Aachen durchgeführt.

Die Eigendarstellung von EcoBatRec findet sich unter:

<http://www.ecobatrec.de/>

Das EcoBatRec-Forschungsprojekt wurde 2012 vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit zur Förderung ausgewählt, um das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen im Maßstab einer Demonstrationsanlage

darzustellen. Das Verfahren zur Rückgewinnung von Lithium und weiteren Rohstoffen ist sowohl von ökologischer als auch von strategischer Bedeutung für die Sicherung von Rohstoffen für die Batterieproduktion in Deutschland.

Das Öko-Institut war als assoziierter Partner für die Konzeption und Realisierung der Ökobilanz-Arbeiten verantwortlich. Zusätzlich koordinierte das Öko-Institut die Arbeiten der Umbrellagruppe LCA, die sich aus ausgewählten Vertretern der beiden BMUB-Projekte EcoBatRec und LithoRec II zusammensetzte. Aufgabe dieser Umbrellagruppe war die Abstimmung methodischer Fragen (funktionelle Einheit, Systemgrenzen, Wirkungskategorien usw.) sowie die gemeinsame Diskussion der Ökobilanzergebnisse innerhalb eines Rahmens, der gleichzeitig den verschiedenen Geheimhaltungsvereinbarungen bzgl. EcoBatRec und LithoRec II und dem Interessenschutz einzelner Partner ohne Abstriche Rechnung trägt.

Die Ökobilanz bzgl. des EcoBatRec-Recyclingverfahrens wurde gemäß ISO 14040/14044 sowie ISO TS 14071 durchgeführt. Die Aufgabe des unabhängigen externen Critical Reviewers wurde von Prof. Dr. Matthias Finkbeiner von der TU Berlin, Department of Environmental Technology – Chair of Sustainable Engineering, ausgeführt. Die kritische Prüfung wurde als unabhängiger Gutachter und nicht als Vertreter oder im Auftrag der TU Berlin erstellt. Da sich alle Beteiligten auf einen begleitenden Critical-Review-Prozess verständigt hatten, nahm Herr Prof. Finkbeiner von Beginn an an den Treffen der Umbrellagruppe LCA teil.

Die nachfolgenden Abschnitte dieses Berichtes beschreiben die Ziele und den Untersuchungsrahmen (Abschnitt 3), umfassen die Sachbilanz (Abschnitt 4) und die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Abschnitt 5) sowie die Auswertung (Abschnitt 6) und die zitierten Referenzen (Abschnitt 7). Der Bericht wird durch mehrere Anhänge komplettiert: Annex 1 listet die verwendeten generischen Datensätze auf. Annex 2 umfasst die finale Prüfaussage des Critical Review (Prof. Finkbeiner).

### **3. Ziele und Untersuchungsrahmen**

#### **3.1. Ziele und Anwendungen der Studie**

Die Ökobilanz dient zur Unterstützung der Bewertung des sich in Entwicklung befindlichen Recyclingverfahrens im Rahmen des EcoBatRec-Projektes. Den beteiligten Verbundpartnern sollen damit zeitnah detaillierte Informationen bzgl. der ökologischen Vorteile und ggf. Schwachstellen zur Verfügung gestellt werden. Weiterhin dienen die Arbeiten zur Ökobilanz dazu, frühzeitig Optimierungspotenziale für die Verbesserung der Umweltperformance des Recyclingprozesses aufzuzeigen. Hierzu wurden nicht zuletzt auch Sensitivitätsanalysen bzgl. der Ökobilanz durchgeführt und bewertet. Die Funktion des in EcoBatRec entwickelten Recyclingverfahrens ist durch das Recycling von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien aus dem Automobilbereich definiert, wobei die Rückgewinnung von Lithium und Metallverbindungen (Kobalt-, Nickel- und Manganverbindungen) in batteriefähiger Qualität für die Elektrodenherstellung im Vordergrund steht. Aufgrund der komplexen Zusammensetzung der Lithium-Ionen-Traktionsbatterien war ebenso aber auch die werkstoffliche Rückgewinnung von weiteren Materialien (aus dem Gehäuse, der Elektronik etc.) sowie ggf. die energetische

Verwertung spezifischer Bestandteile der Batteriesysteme für die Ökobilanz zu betrachten und zu bilanzieren.

Es ist ausdrücklich nicht Ziel der Studie die im Rahmen des EcoBatRec-Projekts entwickelte Recyclingroute für Lithium-Ionen-Traktionsbatterien mit anderen sich in Entwicklung befindlichen Recyclingverfahren zu vergleichen. Die vorliegende Studie stellt in diesem Sinne keine vergleichende Ökobilanz dar. Entsprechend sind die Ergebnisse der Studie nur auf das Recyclingverfahren im Rahmen von EcoBatRec anzuwenden. Die Ergebnisse dieser Studie sind nicht für die Verwendung in zur Veröffentlichung vorgesehenen vergleichenden Aussagen bestimmt.

Eine wichtige Zielgruppe für die Ökobilanzstudie sind die Verbundpartner des EcoBatRec-Projektes selbst. Für die EcoBatRec-Verbundpartner sind die Teilergebnisse für die einzelnen Module des Recyclingverfahrens ebenso interessant wie die Gesamtergebnisse. Weiterhin sind mögliche Unterschiede in den Ergebnissen für das Recycling des NMC-Typs im Vergleich zum LFP-Typ von Interesse. Schließlich ist die Identifizierung möglicher ökologischer Optimierungspotenziale bzgl. des Recyclingprozesses von elementarer Bedeutung.

Eine weitere Zielgruppe für die Ergebnisse sind das fördernde BMUB selbst und die interessierte Fachöffentlichkeit. Für die Politik sind vor allem Erkenntnisse bzgl. noch offenen Forschungsbedarfs und ggf. weiterer Förder- und Entwicklungsprogramme wichtig.

## 3.2. Festlegung des Untersuchungsrahmens

### 3.2.1. Funktion und funktionelle Einheit

Die Funktion des in EcoBatRec entwickelten Recyclingverfahrens ist durch das Recycling von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien aus dem Automobilbereich definiert, wobei die Rückgewinnung von metallischem Lithium und Metallverbindungen (Kobalt-, Nickel- und Manganverbindungen) in batteriefähiger Qualität für die Elektrodenherstellung im Vordergrund steht. Aufgrund der komplexen Zusammensetzung der Lithium-Ionen-Traktionsbatterien war aber auch die werkstoffliche Rückgewinnung von weiteren Materialien (aus dem Gehäuse, der Elektronik etc.) sowie ggf. die energetische Verwertung spezifischer Bestandteile der Batteriesysteme für die Ökobilanz ebenfalls zu betrachten und zu bilanzieren.

Da im Bereich der Elektromobilität sowohl diverse alternative Zellmaterialien innerhalb der Familie Lithium-Ionen-Batterien zum Einsatz kommen bzw. entwickelt werden und weiterhin Traktionsbatterien hier ein Spektrum für den Einsatz für Hybridfahrzeuge (ab ca. 35 kg Gewicht) über Plug-in-Hybridfahrzeuge (ca. 100 – 150 kg Gewicht) bis hin zu vollelektrischen Fahrzeugen (Batteriegewichte bis 250 kg oder gar mehr) umfassen, wurden in der Umbrellagruppe LCA frühzeitig und einvernehmlich generische, aber repräsentative Durchschnittsgewichte und -zusammensetzungen der Batterien definiert, für deren Recycling die Ökobilanzen erstellt werden sollten. Dies war einerseits notwendig, da unmöglich Ökobilanzen für das Recycling aller in Frage kommender Zelltypen und Batteriegrößen geleistet werden konnten. Andererseits fallen für die zukünftige Recyclingwirtschaft auch entsprechend unterschiedliche Lithium-Ionen-Traktionsbatterien nach Gebrauch an, so dass

das im Rahmen von EcoBatRec entwickelte Recyclingverfahren diese Heterogenität adressieren muss.

Vor dem Hintergrund des Expertenwissens aus den EcoBatRec- und LithoRec II-Projektverbänden (Vertreter der Automobilindustrie, Materialforschung und -bereitstellung, Batterietechnik, Recyclingwirtschaft) bzgl. der Relevanz des Systems für den zukünftigen europäischen Markt wurde sich zunächst auf die folgenden Kathodentypen von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien verständigt:

- NMC (Nickel/Mangan/Kobalt),
- LFP (Lithiumeisenphosphat).

Weiterhin wurden nach Analysen von zurückgenommenen Lithium-Ionen-Batterien und Diskussion dieser Daten durch die Mitglieder der Umbrella-Gruppe die generische Zusammensetzung für jeden der zwei Kathodentypen festgelegt – dabei entspricht der generische Typ am ehesten jeweils den Batterien für Plug-in-Hybridfahrzeuge, die in Kapazität und Größe einem generischen Marktmix am nächsten kommen.

Die konkreten Daten bzgl. der zwei Batterietypen finden sich in Kapitel 4.2.2 dieses Berichts. Da der EcoBatRec-Ansatz auf einen separaten „Rückbau“ der Batterien bis hin zu den einzelnen Zellmaterialien setzt, wurde für die beiden unterschiedlichen Typen an Lithium-Ionen-Batterien jeweils eine Ökobilanz durchgeführt werden. Die funktionelle Einheit und der Referenzfluss für die Ökobilanzen des EcoBatRec-Verfahrens ist daher das zu batteriefähigen Produkten führende Recycling von 1000 kg Batterien entsprechend dem Typ NMC bzw. dem Typ LFP.

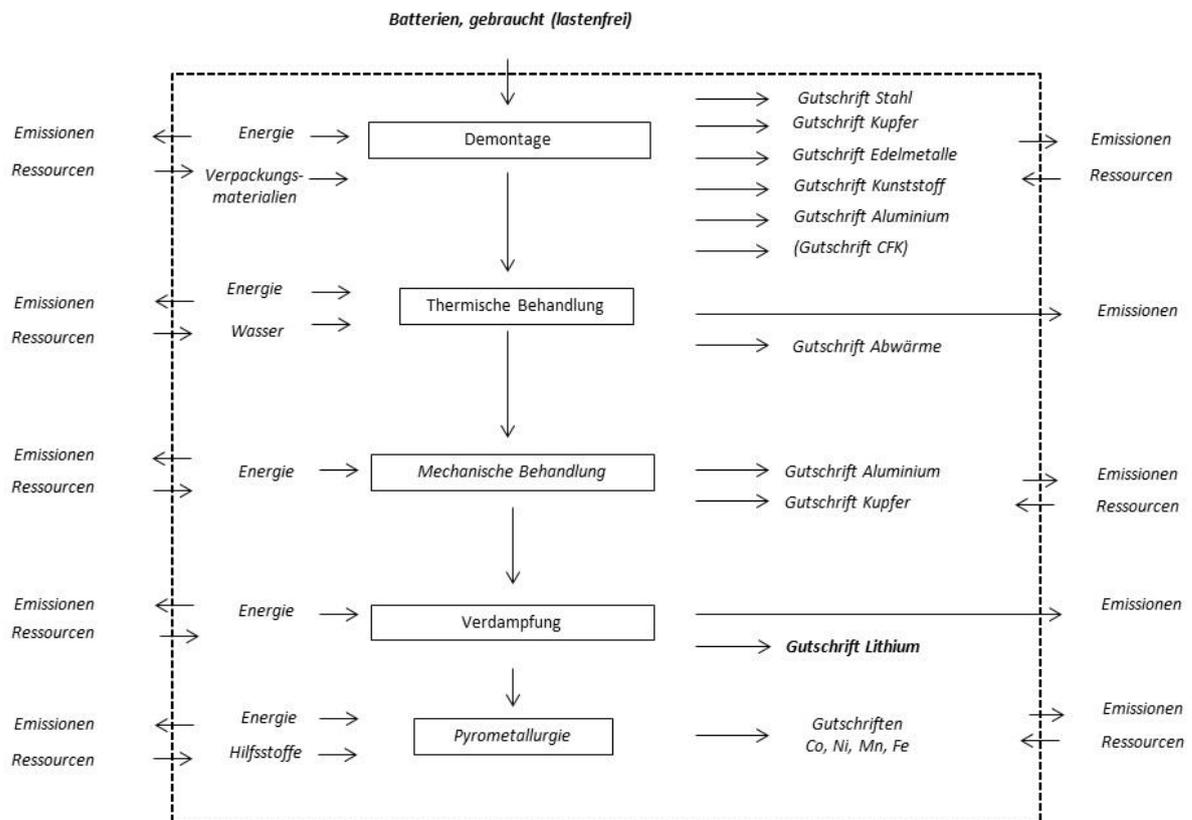
Die funktionelle Einheit wird auf die Inputseite gelegt, da für diese Ökobilanz der Fokus auf dem Recyclingverfahren liegt.

### **3.2.2. Festlegung der Systemgrenzen**

Die Systemgrenzen für die Bilanzierung des EcoBatRec-Recyclingverfahrens umfassen die folgenden Module:

- Demontage der Batteriesysteme bis auf Zellebene
- Thermische Behandlung
- Mechanische Behandlung
- Verdampfung

**Abbildung 3-1: Systemgrenze des EcoBatRec-Prozesses, FU: Recycling von 1000 kg EoL-Batterien**



Die Aufwendungen des Recyclingprozesses finden innerhalb der Systemgrenze statt. Sie werden einerseits mit den Gutschriften für die das System verlassenden batteriefähigen Metallverbindungen verrechnet. Hinzu kommen die Gutschriften für das Recycling der anderen Wertkomponenten (z. B. Gehäuse und Rahmen): die Nettogutschrift errechnet sich dabei aus der Bruttogutschrift für das gewonnene Recyclingmaterial abzüglich der Lasten des Recyclings aus Standardaufbereitungsverfahren. Zur Modellierung der Gutschriften siehe Kapitel 4.2.5.

Die Herstellungs- und Nutzungsphase der untersuchten Batterien sind nicht Gegenstand dieser Ökobilanz.

### 3.2.3. Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität

Die Datenerhebung für die Sachbilanzen wurde in Zusammenarbeit mit den EcoBatRec-Projektpartnern durchgeführt. Aufgrund des experimentellen Stadiums der Entwicklungsarbeiten beruht der überwiegende Teil der Sachbilanzdaten auf Labordaten bzw. Modellierungen.

Weitere Sachbilanzdaten werden aus Konsistenzgründen primär aus der GaBi- Datenbank (Version 6.0) entnommen. Für diese Ökobilanz werden die Datensätze aus der Professional Datenbank und der Zusatzdatenbank „Anorganische Vorprodukte“ verwendet. Für darin fehlende Datensätze, die für diese Ökobilanz notwendig sind, werden Daten aus der Datenbank ecoinvent v2.2 eingesetzt. Die neuere Version ecoinvent v3 wurde nicht verwendet, da diese zum Zeitpunkt der Modellierung noch nicht in GaBi verfügbar war und die neuen Allokationsansätze contributional und attributional modelling noch gewisse Inkonsistenzen beinhalten.

In der Datenerhebung wird als Abschneidekriterium in der Regel eine „1-Prozentregel“ bezüglich Masse verfolgt, das heißt, es werden z. B. entsprechende Hilfsstoffeinsätze bezogen auf den jeweiligen Gesamteinsatz vernachlässigt. Ausnahmen hierzu wurden gemacht, falls relevante Gründe die Einbeziehung in die Sachbilanz nahelegten. Ein Beispiel hierfür ist die Berücksichtigung der Verwertung des Batteriemanagementsystems, das trotz geringerer Masse aufgrund der zu erwartenden Gutschriften für die Rückgewinnung wertvoller Metalle relevant ist.

### Technologische Repräsentativität

Die Daten für das zu entwickelnde Recyclingverfahren für Lithium-Ionenbatterien entsprechen dem aktuellen Stand von Forschung und Entwicklung. Die Daten basieren auf Primärdaten der involvierten Projektpartner. Die Daten repräsentieren den Pilot-/ Labormaßstab und nicht einen großtechnischen Betrieb, da dieser zum Zeitpunkt der Erstellung der Ökobilanz noch nicht realisiert ist. Trotz dieser Einschränkungen sind die verfügbaren Daten nutzbar, da keine vergleichende Ökobilanz zwischen unterschiedlichen Recyclingverfahren intendiert ist.

### Geographische Repräsentativität

Die Ökobilanz der Recyclingrouten hat nach Abstimmung mit den Projektpartnern den geographischen Bezug Deutschland. Entsprechend wurden geeignete einschlägige externe Datensätze (Strommix Deutschland etc.) für die Sachbilanz herangezogen. Für die Bilanzierung eingesetzter Hilfsstoffe etc. wurde soweit wie möglich auf Datensätze mit Bezug auf deutsche und falls nicht vorhanden auf europäische Produktion zurückgegriffen.

Für die Gutschriften der Metalle werden weltweite bzw. generische LCA-Daten herangezogen, soweit es dem deutschen oder europäischen Metallbezug entspricht. Für Edelstahl wird demgegenüber die deutsche Edelstahlkette und für Aluminium die europäische Prozesskette verwendet.

### Zeitrepräsentativität

Die zeitliche Repräsentativität der Daten bezieht sich auf die letzten 5 Jahre; so wurde auf die aktuell verfügbaren Datensätze des verwendeten GaBi-Modells zurückgegriffen. Datensätze aus ecoinvent v2.2 stammen aus den letzten 10 Jahren. Alle internen Daten bzgl. der Recyclingrouten wurden im Jahr 2014 bzw. im 1. Halbjahr 2015 erhoben.

Diese LCA hat einen prospektiven Charakter, da sie zukünftige Prozesse abzubilden versucht, die so zurzeit nicht existieren. Aus den Laborergebnissen sind die Prozesse bekannt, die Ergebnisse aus ihren konkreten großtechnischen Umsetzungen hingegen nicht.

Theoretisch wäre für die gesamte Prozesskette ihre zukünftige Umweltwirkung zu modellieren. Auf diesen Ansatz musste verzichtet werden und es wird stattdessen für die Recyclingaktivitäten auf Laborergebnisse und für die Prozesskette auf existierende Datenbanken zurückgegriffen.

Die Unsicherheit der Daten bewegt sich im üblichen Rahmen und unterscheidet sich je nach Elementarfluss.

### 3.2.4. Allokation

Unter Allokation werden bei der Durchführung von Ökobilanzen Zuordnungsverfahren verstanden, die dann erforderlich sind, wenn bei Prozessen mehrere verwertbare Produkte erzeugt werden, aber nur ein Teil der Produkte in dem betrachteten ökobilanziellen System genutzt wird. Sie wird immer dann durchgeführt, wenn eine Systemerweiterung praktisch nicht mehr möglich ist. Allokationen führen immer zu einer eingegrenzten Betrachtungsweise. Klassische Beispiele für Allokationen sind der Chloralkaliprozess oder die Erdölraffination. So werden in der Erdölraffination aus dem Hauptinput Erdöl viele Raffinerieprodukte wie Benzin und Diesel, aber auch Naphtha, schweres Heizöl und andere erzeugt. Bei der Raffinerie werden aufgrund der Komplexität die gesamten ökologischen Aufwendungen auf die Gesamtprodukte anhand eines Kriteriums umgelegt, z. B. über den Heizwert. Dieses Verfahren ist allgemein akzeptiert und entspricht der ISO-Norm, indem einer Allokation nach physikalischen Größen der Vorzug gegeben wird.

Dieses Verfahren stößt allerdings bei Bunt- und Edelmetallen häufig an seine Grenze. So werden bei der Förderung und Herstellung von Edelmetallen (z. B. Platin, Palladium) auch andere Metalle (Kupfer, Nickel) produziert. Würde man für diese Prozesse eine Allokation nach einem physikalischen Kriterium (Masse) wählen, so würden die Aufwendungen gleichmäßig auf Edelmetalle und Begleitmetalle aufgeteilt. Diese Aufteilung widerspräche allerdings der Ökonomie des Verfahrens. Für dieses Verfahren steht daher entweder das Gutschriftenverfahren (meistens nicht praktikabel) oder eine Allokation nach Erlösen zur Verfügung. In diesen letztgenannten Verfahren werden die Umweltauswirkungen nach Erlösen den Produkten zugeordnet. Da die Metalle Preisschwankungen unterliegen, muss bei der Anwendung hier Vorsicht gelten.

In der vorliegenden Studie wurde wie folgt vorgegangen:

Die Bilanzierung innerhalb der Systemgrenzen „**Aufarbeitung von Lithiumbatterien**“ erfordert keine Allokation, da keine Einzelprodukte ausgewiesen werden, sondern nur das Ergebnis für das Gesamtsystem.

Die **Literaturdaten** bestehen aus von GaBi v6.0 bzw. ecoinvent v2.2 übernommenen Datensätzen, für die in einigen Fällen bereits Allokationen vorgenommen worden sind. Soweit diese keinen maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis haben, werden sie hier nicht explizit aufgeführt und können der entsprechenden Dokumentation in GaBi v6.0 bzw. ecoinvent v2.2 entnommen werden<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Siehe *GaBi 6 life cycle inventory data documentation*, <http://www.gabi-software.com/support/gabi/gabi-6-lci-documentation/>.

### 3.2.5. End-of-Life Allokation

Die Systemgrenzen dieser Ökobilanz sind so angelegt, dass alle Ströme, die das System verlassen, über Gutschriften bewertet werden. Der Auswahl und Modellierung der Gutschriftprozesse kommt daher bei dieser Ökobilanz eine zentrale Rolle zu.

Im Gegensatz zu anderen Metallen wie Aluminium oder Kupfer, bei denen Recyclingprozesse seit vielen Jahrzehnten etabliert sind, gibt es bisher bei Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland keine signifikante Rückgewinnung von Aktivmaterialien. Bei den untersuchten Verfahren handelt es sich durchwegs um völlig neue Prozesse, die noch nicht auf Industrieebene eingeführt sind. Auch Sammelsysteme für gebrauchte Batterien sind bisher nicht etabliert. Da im Rahmen dieser Studie keine Einschätzung vorgenommen werden kann, welchen Anteil gebrauchte Batterien an der Batterie-Produktion in Zukunft haben könnten, bleiben Aussagen zu möglichen Sekundäranteilen und zur Frage, wie viele Recyclingschleifen Lithium-Ionen-Batterien in künftigen Systemen durchlaufen könnte, bloße Spekulation. Aus diesem Grund wurde von einer Sensitivitätsrechnung mit der 50:50-Methode, wie sie das Umweltbundesamt empfiehlt [UBA 2002; Klöpffer 2009] abgesehen. Stattdessen gehen die gebrauchten Batterien in der Bilanzierung lastenfrei ins Recycling bzw. zur Wiederverwendung. Alle Ergebnisse dieser Studie gelten nur für diesen End-of-Life-Allokationsansatz. Für Studien, welche die Ergebnisse der Studie ggf. weiterverwenden, ist aus Konsistenzgründen zu beachten, dass das Sekundärmaterial nicht lastenfrei, sondern mit einer der in dieser Studie erteilten Gutschrift entsprechenden Lastschrift eingehen muss.

### 3.2.6. Berücksichtigte Wirkungskategorien

Von den einzelnen Schritten des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien können unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt ausgehen. Diese möglichen Auswirkungen sind bei der Schadstoffbewertung in der Wirkungsabschätzung zu berücksichtigen. Die Aufgabe der Wirkungsabschätzung ist es, die in der Sachbilanz erhobenen Daten in Hinblick auf bestimmte Umweltauswirkungen, sogenannte Wirkungskategorien, zu untersuchen und damit zusätzliche Informationen zu liefern, die in die Bewertung einfließen. Der PEF Guide [EC 2013] führt folgende Standardwirkungskategorien auf:

- Klimaänderung
- Abbau der Ozonschicht
- Ökotoxizität - Süßwasser
- Humantoxizität - kanzerogene Folgen
- Humantoxizität - nichtkanzerogene Folgen
- Feinstaub/anorganische Emissionen
- Ionisierende Strahlung - Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit
- Fotochemische Bildung von Ozon
- Versauerung
- Eutrophierung – Land
- Eutrophierung – Wasser
- Ressourcenerschöpfung – Wasser

- Ressourcenerschöpfung – mineralisch, fossil
- Landnutzungsänderungen

Das ILCD-Handbuch [ILCD 2010]. empfiehlt diese Wirkungskategorien:

*Climate change, (Stratospheric) Ozone depletion, Human toxicity, Respiratory inorganics, ionizing radiation, (Ground-level) Photochemical ozone formation, Acidification (land and water), Eutrophication (land and water), Ecotoxicity, Land use, Resource depletion (minerals, fossil and renewable energy resources, water).*

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

Bezüglich der zu betrachtenden Wirkungskategorien führt die Fachliteratur aus:

*Da ISO 14044 keine feste Liste von Wirkungskategorien vorgibt, nicht einmal eine Empfehlungsliste, obliegt die Auswahl der Kategorien den Erstellern der Ökobilanz. [Klöpffer 2009]*

Die Auswahl der Wirkungskategorien für die vorliegenden Ökobilanzen der Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien fand in Abstimmung mit den Mitgliedern der Umbrella-Gruppe ein einvernehmliches Ergebnis. In Anpassung an die Thematik und die bestehenden Fragestellungen bzgl. der Recyclingverfahren wurden die folgenden Wirkungskategorien als Grundlage der Ökobilanzierung verwendet: Kumulierter Energie-Aufwand (KEA), Verbrauch an abiotischen Ressourcen mineralischen Typs (ADP, elementar), Treibhauspotenzial (GWP), Eutrophierungspotenzial (EP), Versauerungspotenzial (AP), Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP).

Als optionale Bestandteile der Wirkungsabschätzung wurde nur eine Normierung mit globalen Jahresemissions- bzw. Verbrauchswerten durchgeführt [CML 2010]. Ordnungs- und Gewichtungsverfahren wurden nicht verwendet.

Zur Charakterisierung von human- und ökotoxischen Belastungen sind in den letzten Jahren eine Reihe von methodischen Konzepten erarbeitet worden. Neben klassischen Methoden wie CML [Guinée et al. 2002] und EDIP [Hauschild/Wenzel 1998], die potenzielle Wirkungen in der Mitte des Wirkungsmechanismus quantifizieren, versuchen andere Methoden potenzielle Schäden am Wirkungsendpunkt abzuschätzen, wie z. B. Eco-indicator 99 [Goedkoop/Spriensma 1999] oder EPS [Steen 1999] oder kombinieren beide Konzepte, wie z. B. ReCiPe [Goedkoop et al. 2009], IMPACT 2002+ [Humbert et al. 2012].

Mit dem USEtox Modell der UNEP/SETAC Life Cycle Initiative [Rosenbaum et al. 2011, Rosenbaum et al. 2008, Hauschild et al. 2008] wurde versucht, die verschiedenen Modelle zu harmonisieren. USEtox stellt ein Bewertungssystem dar für die Kategorien Humantoxizität und aquatische Ökotoxizität. Das Modell stellt sehr hohe Anforderungen an die Datenqualität und die Anzahl der zu betrachtenden Stoffe. Da die Datenlage zu zahlreichen human- und ökotoxischen Stoffen so schlecht ist, dass fundierte Aussagen nur schwer abzuleiten sind, wird in dieser Studie auf die Einbeziehung der Humantoxizität und Ökotoxizität anhand einer Wirkungsabschätzung verzichtet.

Die Wirkungskategorien „Respiratory inorganics“, „Flächenverbrauch“, „Geruchsbelästigungen/Lärm“, „Belastungen am Arbeitsplatz“ sowie „Bedrohung von Naturschönheit und –vielfalt“ werden für die Ökobilanz nicht berücksichtigt, da die entsprechenden großtechnischen Anlagen noch nicht realisiert sind und damit diese spezifischen Wirkungen heute nicht quantifiziert werden können.

Abwärme wird aus Gründen fehlender Relevanz für das untersuchte System nicht berücksichtigt. Das Abfallaufkommen wird als Flussgröße erfasst. Der anfallende Abfall wird behandelt und die resultierenden Umweltbelastungen in den entsprechenden Wirkungskategorien quantifiziert.

Nachfolgend werden die in der Ökobilanz verwendeten Wirkungskategorien vorgestellt.

Hinsichtlich des **Verbrauchs an Ressourcen** wird einerseits der **Verbrauch an energetischen Ressourcen** über den Kumulierten Energie-Aufwand (KEA, engl. *Cumulative Energy Demand, CED*) abgebildet. KEA ist ein Maß für den gesamten Verbrauch an energetischen Ressourcen, die für die Bereitstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung benötigt werden. Im KEA enthalten ist auch der Energiegehalt, der im Produkt selbst enthalten ist. Der KEA weist generell alle nicht erneuerbaren und erneuerbaren energetischen Ressourcen als Primärenergiewerte aus. In der vorliegenden Ökobilanz werden mit dem KEA gesamt sowohl die nicht erneuerbaren als auch die erneuerbaren energetischen Ressourcen berücksichtigt. Zur Berechnung wird der untere Heizwert der verschiedenen Energieträger angesetzt. Der Verbrauch an **abiotischen Ressourcen mineralischen Typs** ist bzgl. der betrachteten Recyclingverfahren ebenfalls eine wichtige Wirkungskategorie, da die betrachteten Recyclingverfahren auf die Rückgewinnung wertvoller Sekundärmetalle zielen und damit primäre Metallressourcen einsparen sollen. Hierfür wurde für Ökobilanzen der Wirkungsparameter ADP elementar (abiotic depletion potential,  $ADP_{elem.}$ ) entwickelt. In der vorliegenden Studie wird die Definition des  $ADP_{elem.}$  aus der Basismethode des Dutch LCA Handbook [Guinée et al. 2001] mit den Charakterisierungsfaktoren nach [CML 2010] verwendet. Das  $ADP_{elem.}$  berechnet sich dementsprechend als Quotient aus der Extraktionsrate einer Ressource und dem Quadrat der „ultimate reserve“<sup>2</sup> dieser Ressource ( $ADP_{elem,ur}$ ). Bezogen wird auf Antimonäquivalente.

Die Charakterisierungsfaktoren für die in dieser Studie relevanten Metalle sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

---

<sup>2</sup> Weitestgehende Definition von Reserve.

**Tabelle 3-1: Charakterisierungsfaktoren für den ADP<sub>elem</sub>**

Element	ADP (kg-Sb-eq. / kg)
Aluminium	1,09E-09
Chrom	4,43E-04
Kobalt	1,57E-05
Kupfer	1,37E-03
Gold	5,20E+01
Eisen	5,24E-08
Lithium	1,15E-05
Mangan	2,54E-06
Nickel	6,53E-05

Die Berechnung des **Treibhauspotenzials** (GWP) in Form von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten wird allgemein anerkannt. Mit dem Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) besteht zudem ein internationales Fachgremium, das sowohl die Methode als auch die entsprechenden Kennzahlen für klimawirksame Substanzen errechnet und fortschreibt. Bei der Berechnung von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten wird die Verweilzeit der Gase in der Troposphäre berücksichtigt; daher stellt sich die Frage, welcher Zeitraum der Klimamodellrechnung für die Zwecke der Ökobilanz verwendet werden soll. ISO TS 14067 [ISO 2013] legt die Modellierung auf der 100-Jahre-Basis fest. Die in den Berechnungen des Treibhauspotenzials berücksichtigten Substanzen werden mit ihren CO<sub>2</sub>-Äquivalenzwerten nach [IPCC 2007] bewertet. Die neueren Werte nach [IPCC 2013] wurden hier nicht angewendet, da die Werte von 2007 nach wie vor der Stand in [CML 2010] sind.

Die **Eutrophierung** steht für eine Nährstoffzufuhr im Übermaß, sowohl für Gewässer als auch für Böden. Im vorliegenden Projektzusammenhang wird der Nährstoffeintrag über Luft und Wasser (bzw. Boden) betrachtet. Das Eutrophierungspotenzial (EP) von Nährstoffemissionen wird hierbei durch die Aggregation von Phosphat-Äquivalenten nach [CML 2010] ermittelt.

Eine **Versauerung** kann ebenfalls sowohl bei terrestrischen als auch bei aquatischen Systemen eintreten. Verantwortlich sind die Emissionen säurebildender Abgase. Die Berechnung erfolgt in Form von Säurebildungspotenzialen (AP, [CML 2001]) mit den Charakterisierungsfaktoren nach [CML 2010].

Die Wirkungskategorie **Photooxidantien** (Photochemical Ozone Creation Potential, Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial, POCP) bildet die Entstehung von Sommersmog oder bodennahem Ozon ab. Ozon führt zu Wald- und Vegetationsschäden. In höheren Konzentrationen ist es humantoxisch (Reizung der Atmungsorgane, Asthma, Husten und Augenreizung) [Schmid 2006]. Die Ozonbildung ist ein komplexer Prozess, bei dem den Kohlenwasserstoffen ein Ozonbildungspotenzial zugewiesen werden kann. Genaue Potentiale gelten nur für eine definierte Umgebung mit einer bestimmten Lichtintensität, einer bestimmten NO<sub>x</sub>-Konzentration und definierten meteorologischen Bedingungen. In der Ökobilanzierung werden als Mittelwerte die Wirkfaktoren nach [CML 2010] angesetzt, die auf 1 kg Ethylen-Äquivalent bezogen werden.

Die von der EU-Kommission vorgeschlagenen Indikatoren und Methoden zum Product and Organisation Environmental Footprint [EC 2014] wurde in dieser Studie nicht angewendet, da bei PEF/OEF derzeit noch Widersprüche zur ISO-Norm 14044 bestehen (siehe [Lehmann 2015]).

### 3.2.7. Methoden der Auswertung

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

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

### 3.2.8. Konformität und kritische Prüfung

Die vorliegende Ökobilanz wurde entsprechend den einschlägigen Vorgaben der ISO 14040/14044 sowie ISO TS 14071 durchgeführt. Wie in Abschnitt 3.1 ausgeführt, entfallen die spezifischen Anforderungen an vergleichende Ökobilanzen, da Vergleiche unterschiedlicher Recycling-verfahren nicht intendiertes Ziel der vorliegenden Ökobilanzstudie ist. Die Arbeiten zur Ökobilanz wurden durch einen unabhängigen, externen Critical Reviewer (Prof. Dr. Finkbeiner), der auf einschlägige und umfassende Kenntnisse und Erfahrungen der methodischen Anforderungen an Ökobilanzen und deren Weiterentwicklung verweisen kann, begleitet und mit Empfehlungen unterstützt. Die Prüfung erfolgte gemäß Abschnitt 6.2 der ISO 14044 begleitend zur Studie. Eine Validierung des LCI-Modells oder die Verifizierung der verwendeten Daten war nicht Gegenstand der Prüfung. Das die Prüfaussage enthaltende Gutachten wird in den Anhang des Berichtes aufgenommen.

### 3.2.9. Einschränkungen, Verwendung und Zielgruppen

Als wesentliche Einschränkung bzgl. der Ergebnisse der vorliegenden Ökobilanzstudie ist darauf zu verweisen, dass es sich um in Entwicklung befindliche Recyclingverfahren handelt

und demnach die Mehrzahl der Sachbilanzdaten aus Laborversuchen abgeleitet wurde und somit Daten aus industriellem Betrieb noch fehlen. Eine weitere Einschränkung besteht in der Vielfalt in der Zusammensetzung der in Frage kommenden Lithium-Ionen-Batterien und der auf die Zukunft nicht einfach zu prognostizierenden Marktentwicklungen hierzu. Nichtsdestoweniger wurde in konstruktiver und gemeinsamer Arbeit der Partner der beiden Projekte EcoBatRec und Lithorec II diese Einschränkung durch die Abstimmung auf eine geeignete generische Zusammensetzung der Lithium-Ionen-Batterien soweit wie möglich adressiert.

Die Ergebnisse der Ökobilanz gelten nur für den gewählten EoL-Ansatz, dass die gebrauchten Lithium-Ionen-Batterien lastenfrei ins Recycling gehen.

Die Sachbilanzdaten werden aus Konsistenzgründen primär aus der GaBi- Datenbank (Version 6.0) entnommen. Für diese Ökobilanz werden die Datensätze aus der Professional Datenbank und der Zusatzdatenbank „Anorganische Vorprodukte“ verwendet. Für darin fehlende Datensätze, die für diese Ökobilanz notwendig sind, werden Daten aus der Datenbank ecoinvent v2.2 eingesetzt:

Eine wichtige Zielgruppe für die Ökobilanzstudie sind die Verbundpartner des LCA-Li-Bat-Recycling-Projekts selbst, die sowohl Recycler als auch Anwender von Lithium-Ionen-Batterien umfassen.

Eine weitere Zielgruppe für die Ergebnisse stellen das fördernde Bundesministerium für Bildung und Forschung selbst und die interessierte Fachöffentlichkeit dar. Für die Politik sind vor allem Erkenntnisse bzgl. noch offenen Forschungsbedarfs und ggf. entsprechend weiterer Förder- und Entwicklungsprogramme zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien wichtig.

### **3.2.10. Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts**

Wie in Abschnitt 2 beschrieben, orientiert sich die Art und der Aufbau des Berichts (Abschnitte 3, 4, 5 und 5.2) konsequent an den vier Phasen einer Ökobilanz.

Nach Absprache mit den Projektpartnern soll dieser Bericht als Ganzes publiziert werden.

## **4. Sachbilanz**

### **4.1. Prozessbeschreibung**

Das EcoBatRec-Verfahren gliedert sich in vier Hauptprozessschritte:

- Demontage
- Thermische Behandlung
- Mechanische Behandlung
- Verdampfung

Im **Demontageschritt** werden die Batterien zunächst von Hand nach Batterietyp sortiert.

Die Module werden sodann in Einzelkomponenten zerlegt. Als Output, der zum nächsten Prozessschritt weitergeleitet wird, fallen hier die geschlossenen Zellen an. Die anderen Wertkomponenten (Batterie- und Modulgehäuse, Rahmen, Kabel) werden dem Recycling zugeführt.

Die Zellen werden einer **autothermen Vakuumpyrolyse** unterzogen, wobei die gewonnenen Pyrolyseöle zur Gewinnung von Wärme genutzt werden.

In einer **mechanischen Aufbereitung** werden anschließend weitere Materialien aus den pyrolysierten Zellen separiert, neben dem Aktivmaterial vor allem Kupfer und Aluminiumbestandteile.

Aus dem abgetrennten Aktivmaterial wird im Rahmen eines Verdampfungsschrittes (Schleppgasverdampfung (mit Stickstoff als Schleppgas) bzw. Vakuumverdampfung) Lithiumoxid (Schleppgasverdampfung) bzw. Lithium in metallischer Form (Vakuumverdampfung) gewonnen. Als Standardverfahren ist eine Schleppgasverdampfung angesetzt, die Vakuumverdampfung wird in einer Sensitivität betrachtet.

Das verbliebene abgereicherte Elektrodenmaterial wird schließlich einer externen Verwertung zugeführt. Hierfür wird in der vorliegenden Ökobilanz eine **pyrometallurgische Aufarbeitung** des Materials nach dem LiBRi-Verfahren angenommen.

## 4.2. Datengrundlage

### 4.2.1. Spezifische Daten

Eine wesentliche Festlegung bezüglich der verwendeten spezifischen Daten war die Einigung auf eine **generische Batteriezusammensetzung durch die LCA-Umbrellagruppe** (siehe auch Kapitel 3.2.1, funktionelle Einheit). Die generische Batteriezusammensetzung wird als Eingangsstrom für die Bilanzierung des Batterierecyclings in beiden Verbänden (EcoBatRec und LithoRec II) zugrunde gelegt. Für zwei unterschiedliche Kathodentypen (NMC und LFP) wurde jeweils ein Mittelwert aus Batterien stark unterschiedlicher Größe und Formen (Batterien für Hybrid-, Plug-in-Hybrid- und vollelektrische Fahrzeuge) abgeleitet, die als Lithium-Ionen-Traktionsbatterien in Frage kommen. An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Batteriezusammensetzungen, die in der folgenden Tabelle aufgeführt sind, **nicht die Zusammensetzung definierter Batterien eines entsprechenden Herstellers** wiedergeben. Die diversen unterschiedlichen Formen und Größen der real am Markt oder in Entwicklung befindlichen Batterien bestärkten das Projektteam in Abstimmung mit den Mitgliedern der Umbrellagruppe LCA, vielmehr generische Durchschnittsdatensätze zu bilden.

Die Zusammensetzung der NMC-Batterien ist in Tabelle 4-1 dargestellt, die der LFP Batterien in Tabelle 4-2.

**Tabelle 4-1: Generische Zusammensetzung NMC-Batterien**

<b>Gehäuse</b>	<b>Aluminium</b>	
<b>Batterie</b>	<b>Gesamt</b>	<b>100%</b>
<b>Pack + Modul</b>	Stahl (inkl. Schrauben)	7,3%
	Kabel	1,1%
	Elektronikbauteile (WEEE)	2,1%
	Kunststoffe	5,7%
	CFK	0%
	Aluminium	18,5%
	<b>Zellgehäuse</b>	Al
<b>Anode</b>	Kohlenstoff	9,5%
	Cu	10,1%
	Sonstige	0,8%
<b>Kathode</b>	Mn	7,4%
	Li	1,2%
	Co	1,0%
	Ni	2,0%
	Al	6,2%
	Sauerstoff	5,5%
	Sonstige	1,9%
<b>Separatoren</b>	Kunststoffe	4,4%
<b>Tabs</b>	Cu	0,5%
	Al	0,1%
	Sonstige	0,1%
<b>Electrolyt</b>	Lösungsmittel	9,6%

Festlegung nach Umbrella-Meeting 1.10.2014

**Tabelle 4-2: Generische Zusammensetzung LFP-Batterien**

Typ		LFP
Batterie	Gesamt	100%
Pack + Modul	Stahl (inkl. Schrauben)	7,3%
	Kabel	1,1%
	Elektronikbauteile (WEEE)	2,1%
	Kunststoffe	5,7%
	Aluminium	22,2%
Zellgehäuse	Al	8,1%
Anode	Kohlenstoff	10,9%
	Cu	10,5%
Kathode	Li	0,4%
	Al	6,1%
	Fe	3,1%
	P	1,7%
	Sauerstoff	3,5%
Separatoren	Kunststoffe	9,7%
Tabs	Cu	0,6%
	Al	0%
	Sonstige	0%
Electrolyt	Lösungsmittel	7%

Festlegung nach Umbrella-Meeting 1.10.2014

Für die Zusammensetzung der Elektronikbestandteile (vor allem des Batteriemanagementsystems, BMS) wurden Analysen aus dem Vorgängerprojekt LithoRec I verwendet, insbesondere zu den Gehalten an Kupfer, Nickel, Gold und Silber.

Die prozessspezifischen Daten für die bilanzierten Prozessschritte wurden von den jeweils dafür zuständigen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Tabelle 4-3 zeigt die Datenherkunft im Überblick.

**Tabelle 4-3 Herkunft der prozessspezifischen Daten**

Prozessschritt	Datenquelle	Maßstab des Prozesses
Demontage	Accurec	Labormaßstab
Thermische Behandlung	Accurec	Labormaßstab
Mechanische Behandlung	Accurec	Labormaßstab
Verdampfung	RWTH Aachen	Labormaßstab

#### 4.2.2. Generische Datensätze

Eine Übersicht über die verwendeten generischen Datensätze gibt Annex 1.

Aufgrund des Wunsches von Projektteilnehmern wurde als Bilanzierungswerkzeug die Bilanzierungssoftware „GaBi“ eingesetzt, um Projektergebnisse auch „in-house“ weiterverwenden zu können. Diese Vorgehensweise hat aus pragmatischen Gründen zu folgender Auswahl der Datensätze geführt:

In der Regel werden Datensätze aus GaBi v6.0 verwendet, wobei diese sich teilweise auf Industriedaten stützen. Für diese Ökobilanz werden die Datensätze aus der Professional Datenbank und der Zusatzdatenbank „Anorganische Vorprodukte“ aus GaBi v6.0 verwendet. Für darin fehlende Datensätze, die für diese Ökobilanz notwendig sind, werden Daten aus der Datenbank ecoinvent v2.2 eingesetzt: Dies gilt insbesondere für die Datensätze zum Metallrecycling (z. B. Kupfer), teilweise auch für die Primärgewinnung. Aus Gründen der Konsistenz wird daher für Metalle stets die ecoinvent-Datenbank verwendet.

Deswegen wird das Basisszenario mit der Gutschrift für die Primärgewinnung von Kobalt aus der ecoinvent-Datenbank modelliert, obgleich dieser Datensatz ausweislich als Hilfsprozess, d. h. mit geringer Qualität, gekennzeichnet ist.

Der geographische Bezug der Datensätze wird nach Möglichkeit landesspezifisch, sonst europäisch oder global (in dieser Priorisierung) gewählt. Hierbei ist zu beachten, dass, obwohl z. B. die Buntmetallproduktion die globalen Prozesse beinhaltet, landestypische Import-Mixe verwendet werden.

Für die Hilfsstoffe wird mit Datensätzen „Produktionsmix ab Hersteller“ gearbeitet und jeweils ein Transport zum Einsatzort vorgesehen.

Für den Transport der Hilfsstoffe, der Wertstoffe aus der Batteriezerlegung zum Recycling und der Zellen wird ein LKW mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) von größer 34-40 t angenommen. Für den Antransport der Batterien wird ein geringeres zGG (12-14 t) verwendet, da die Batterien möglicherweise noch geladen sind und dezentral anfallen. Der Transport der festen Rückstände aus den Prozessen zur Deponie wird mit einem LKW mit einem zGG von 14-20 t modelliert. Alle LKW werden als dieselbetrieben, Euro 3

angenommen. Weitere Ausführungen zur Modellierung der Transporte können Kapitel 4.2.3 entnommen werden.

Für die Energieversorgung (Strom, Prozessdampf, Erdgas) werden Datensätze „Verbrauchsmix, beim Verbraucher“ zugrunde gelegt. Druckluft wird mit „Produktionsmix, ab Werk“ beschrieben, da davon ausgegangen werden kann, dass sie vor Ort erzeugt wird. Bei der Stromversorgung wird für Industriebetriebe eine Spannungsebene von 1kV-60kV angenommen. Für die Stromgutschrift wird ebendiese Spannungsebene verwendet.

Für Diesel wird ein Datensatz „Verbrauchsmix, ab Raffinerie“ verwendet, der Transport zum Verbraucher wird vernachlässigt. Es wird von einem Schwefelanteil von 50 ppm ausgegangen.

#### **4.2.3. Modellierung der Transporte**

Die Transporte werden analog zum Partnerprojekt LithoRec II modelliert.

Für alle Güterbewegungen wird ausschließlich der Transport per LKW (dieselbetrieben, EURO 3) angesetzt, wofür Datensätze aus GaBi v6 verwendet werden. Die wesentlichen Annahmen sind für die einzelnen Transportgüter in Tabelle 4-4 aufgelistet.

**Tabelle 4-4: Annahmen bei der Modellierung der Transporte**

Transportgut	zGG / Nutzlast (t)	Beladung (%)	Distanz, einfach (km)	Leerfahrten-Anteil (%)
Ganze Batterien	12-14 / 9,3	70	300	100
Wertstoffe zum Recycling	> 34-40 / 27	100	250 <sup>3</sup> /500 <sup>4</sup>	15
Hilfsstoffe (als Bulkgüter)	> 34-40 / 27	63	200	60
Flüssige Rückstände zur SMV	> 34-40 / 27	75	50	100
Feste Rückstände zur SMV	> 34-40 / 27	100	50	100
Feste Rückstände zur Deponie	14-20 / 11,4	100	30	100

Quelle: CML, 2010

Die Batterien müssen aus Sicherheitsgründen in Absorptionsmaterial verpackt transportiert werden (Massenanteil kalkuliert mit 25 %). Da ein weiterer Abschlag für nicht vollständige Auslastung vorgesehen, ergibt sich daraus die Beladung von 70 %. Die Distanzen sind jeweils ein Schätzwert für den mittleren Transport aus einer dezentralen Autowerkstatt zur Recyclinganlage. Da es sich vermutlich um speziell ausgerüstete Fahrzeuge handelt, wird in beiden Fällen von einer leeren Rückfahrt ausgegangen. Das Absorptionsmaterial ist in dieser Studie nicht mitbilanziert worden, eine Analyse hierzu wird nach dem Bau und den ersten Testläufen einer Pilotanlage bis Frühjahr 2016 in einem Update der Ökobilanz erfolgen. Die Transporte der Zellen nach dem Entfernen des Gehäuses, der aus den Zellen ausgelösten Kathode sowie der Transport der Kathodenbeschichtung werden für die Bilanzierung vernachlässigt, da davon ausgegangen wird, dass Zerlegung, Kathodenseparation und hydrometallurgische Aufbereitung am gleichen oder zumindest an sehr nahegelegenen Standorten durchgeführt werden.

Für die Hilfsstoffe wird mit einer pauschalen Transportdistanz von 200 km gerechnet. Beladung und Leerfahrtenanteil werden nach den Angaben von Ecotransit für Bulkchemikalien angesetzt [Ecotransit, 2010]. Für den Transport von Rückständen zur Sondermüll-

<sup>3</sup> Für Aluminium und Edelstahl

<sup>4</sup> Für Kupfer, BMS, Kunststoff (PA 6)

verbrennung werden eine Transportdistanz von 50 km sowie eine leere Rückfahrt zugrunde gelegt. Für flüssige Rückstände wird die Beladung mit nur 75 % angenommen, um dem besonderen Aufbau des LKW Rechnung zu tragen. Der Transport von festen Rückständen zur Deponie erfolgt angennommenerweise über 30 km Entfernung in einem vollen LKW mit leerer Rückfahrt.

Die Gutschriften erfolgen ab Werk, das heißt, dass in den Gutschriften keine Transporte von der Produktionsstätte zum Verbraucher enthalten sind wird.

**4.2.4. Normierung**

Für die Normierung der Bilanzergebnisse des rohstofflichen Recyclings wurden die Lasten und die Gutschriften jeweils aufsummiert und mit globalen Jahresemissions- bzw. Verbrauchswerten normiert. Die verwendeten Normierungsfaktoren sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Für GWP, AP und EP beziehen sich die Werte auf das Jahr 2000, für ADP<sub>elem.</sub> und POCP wird auf Werte von 1995 zurückgegriffen, da für diese Kategorien die Werte für das Jahr 2000 unterschätzt wurden [CML 2010].

**Tabelle 4-5: Verwendete Normierungsfaktoren**

Wirkungs- Kategorie	GWP	ADP <sub>elemt</sub>	AP	EP	POCP
	kg-CO <sub>2</sub> -eq/a	kg-Sb-eq/a	kg-SO <sub>2</sub> -eq/a	kg-PO <sub>4</sub> -eq/a	kg-C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> -eq/a
<b>Bezugsraum</b>					
Welt	4,18E+13	3,6E+08	2,39E+11	1,58E+11	9,6E+10

Quelle: CML, 2010

**4.2.5. Modellierung der Gutschriften**

Für das Gesamtergebnis der Ökobilanz ist die Bewertung des Materialrecyclings entscheidend. Daher kommt der Modellierung des Recyclings, d. h. der Gutschriften, eine sehr hohe Bedeutung zu. Dies betrifft sowohl die ingenieurmäßige Entscheidung der „Äquivalenz“ von Rezyklat und Primärmaterial als auch die Auswahl der entsprechenden Ökobilanzprozesse aus den Ökobilanzierungsdatenbanken.

Das Recycling von Lithiumbatterien nach dem EcoBatRec-Verfahren wird in vier Schritten vollzogen. Im ersten Schritt wird die Batterie in Gehäuse, Elektronik und Zellen zerlegt. Im zweiten Schritt werden die Zellen pyrolisiert, im dritten Schritt die pyrolisierten Zellen mechanisch separiert. Im vierten Schritt wird in einem Verdampfungsschritt Lithium aus dem Aktivmaterial gewonnen. Das verbleibende Elektrodenpulver wird sodann pyrometallurgisch weiterverarbeitet.

Die aus den Operationen erhaltenen Materialien werden konfektioniert, d. h. sie werden in verschiedenen Prozessen so behandelt, dass ihre chemisch-physikalischen Eigenschaften den Eigenschaften von Primärmaterialien entsprechen. Sind diese Eigenschaften nur partiell

gegeben, kann ein Bewertungsabschlag vorgenommen werden. Für die thermische Verwertung werden die Energieträger (Strom etc.) gutgeschrieben.

In der vorliegenden Tabelle werden die rezyklierten Materialien (Materialien), der Recyclingprozess (Recyclingprozess) und der zur Gutschrift herangezogene Primärprozess (Primärprozess) aufgeführt. In einer zusätzlichen Spalte (Bemerkung) wird vermerkt, ob der angeführte Prozess aus der Ökobilanzierungsdatenbank unverändert (ohne Zusatz) oder adaptiert worden ist.

Die eingesetzten Prozesse aus der Ökobilanzierungsdatenbank sind im Annex 1 dokumentiert.

**Tabelle 4-6 Gegenüberstellung der rezyklierten Materialien, des angelasteten Recyclingprozesses sowie der für das Recyclingmaterial erteilten Gutschrift**

Materialien	Recyclingprozess	Gutschrift	Bemerkung
Aluminium	Sekundäraluminium (Aufarbeitung und Umschmelzen)	EU-Verwendungsmix Primäraluminium	Datensätze nach EAA [EAA 2008]
BMS (Elektrik/Elektronik)	Leiterplattenrecycling auf Kupfer, Nickel, Gold, Silber	Primärgewinnung der Metalle	(1): Adaption des Metallgehaltes nach eig. Laboruntersuchung
Kupfer	Sekundärkupfer	Primärkupfer	(2) Adaption des Primärkupferprozesses
Edelstahl	Elektro-Edelstahl	Edelstahl aus Blaswerk	(3) Adaption Elektrostahl auf 100 % Edelstahlinput
Kunststoffhalterungen PA 6	Kunststoffaufbereitung PA 6	Primärkunststoffherstellung PA 6	(4) Modellierung Rezyklat nach IFEU [IFEU 2002]
Kobaltsulfat in Mischsalzlösung	Primärdaten des Projekttes	Primärgewinnung: Kobalt + Umsetzung mit H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> zu CoSO <sub>4</sub>	(5) Stöchiometrische Umsetzung
Nickelsulfat in Mischsalzlösung	Primärdaten des Projekttes	Primärgewinnung: Nickel + Umsetzung mit H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> zu NiSO <sub>4</sub>	(5) Stöchiometrische Umsetzung
Mangansulfat in Mischsalzlösung	Primärdaten des Projekttes	Primärgewinnung: Mangan + Umsetzung mit H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> zu MnSO <sub>4</sub>	(5) Stöchiometrische Umsetzung
Lithium	Primärdaten des Projekttes	Primärgewinnung: Lithium	Brines (Chile)

Das **Edelstahl**gehäuse kann als hochwertiger Schrott eingestuft werden. Der vorhandene Edelstahl-Elektrostahlprozess ist aber untauglich, da er wie der Blasstahlprozess auf primäres Nickel-/Chromerz zurückgreift. Um den Schrottprozess zu modellieren, wird daher auf den klassischen, schrottbasierten Elektrostahl zurückgegriffen.

**Kupfer** fällt beim Dismantling der Batterie als metallisches Kupfer an. Die Modellierung sieht hier den Sekundärkupferprozess vor. Für die Gutschrift werden die Primärkupferprozesse

aus dem ecoinvent-Datensatz „RER: Kupfer, ab Regionallager“, bereinigt um ihre Sekundärkupferanteile, genutzt.

Die nasschemische Aufbereitung von **Kobalt, Mangan und Nickel** aus dem Altelektrodenmaterial führt zu den Sulfaten der Metalle. Nach Reinigung liegen die drei Metalle in der Sulfatlösung vor und können ohne weitere Behandlung (allerdings unter Zugabe von Frischmaterial) in der Neuelektrodenmaterialherstellung genutzt werden. Für alle drei Metalle gelten normalerweise die Sulfate als Einsatzmaterial, die auch industriell durch Auflösung in Schwefelsäure gewonnen werden. Zur Gutschrift dieser Metallsulfate werden die Metalle aus ihrer primären Herstellung durch Umsetzung mit stöchiometrischen Mengen an Schwefelsäure berechnet. Aus Konsistenzgründen wird die Kobalt-Gutschrift mit der Primärgewinnung von Kobalt aus der ecoinvent-Datenbank modelliert, obgleich dieser Datensatz ausweislich als Hilfsprozess, d. h. mit geringer Qualität, gekennzeichnet ist.

Die Aufwendungen für das Recycling von **PA 6** sind mit Daten zum PS-Recycling von Produktionsabfällen modelliert, die aus einer Studie von IFEU stammen [IFEU 2002]. Die Gutschrift erfolgt auf Basis von Virgin-PA 6.

Die **Elektronikbauteile der Batterie (BMS)** bestehen aus Leiterplatten mit messtechnischen und elektrischen Einheiten. Beispielhafte BMS wurden im Vorgängerprojekt LithoRec I auf gewinnbare Metalle beprobt. Die zur Verfügung stehenden Daten wurden genutzt, um den Prozess „Leiterplattenrecycling/ecoinvent“ zu kalibrieren. Der Prozess umfasst die Aufbereitung/Abtrennung. Als Herstellungsprozesse der Metalle wurden die entsprechenden Sekundärprozesse ausgewählt.

Bei **CFK** wird die thermische Verwertung als Ersatzbrennstoff im Zementwerk modelliert. Hier wird davon ausgegangen, dass es dort Steinkohle substituiert. Die Substitution erfolgt über Heizwertäquivalente (1,15 kg-Steinkohle/kg-CFK). Gutgeschrieben werden die vermiedenen Kohlendioxidemissionen aus der Steinkohleverbrennung sowie die Vorkette der Steinkohle. Als Last aus der CFK-Verbrennung wird nur der stöchiometrische CO<sub>2</sub>-Ausstoß angerechnet, wobei von einer vollständigen Verbrennung ausgegangen wird.

### 4.3. Einschätzung der Datenqualität

Die Datenqualität kann aufgrund der Datenherkunft näher diskutiert werden. Dazu können die eingesetzten Daten klassifiziert werden:

- Sekundärdaten aus validierten Datenbanken (Strom, Hilfsstoffe, Metalle etc.),
- Primärdaten von Projektteilnehmern auf Basis von etablierten Prozessen,
- Primärdaten von Projektteilnehmern auf Basis von eigenen Untersuchungen anhand von Labordaten.

Die Datenqualität von Sekundärdaten ist im Allgemeinen angemessen, wenngleich für Buntmetalle hier Einschränkungen vorliegen. Die Abdeckung der weltweiten Produktion ist

nicht vollständig und Emissionen, insbesondere von Luftschadstoffen, können lokal deutliche Unterschiede aufweisen.

Primärdaten auf Basis von etablierten Prozessen sind im Allgemeinen ebenfalls als gut zu bezeichnen.

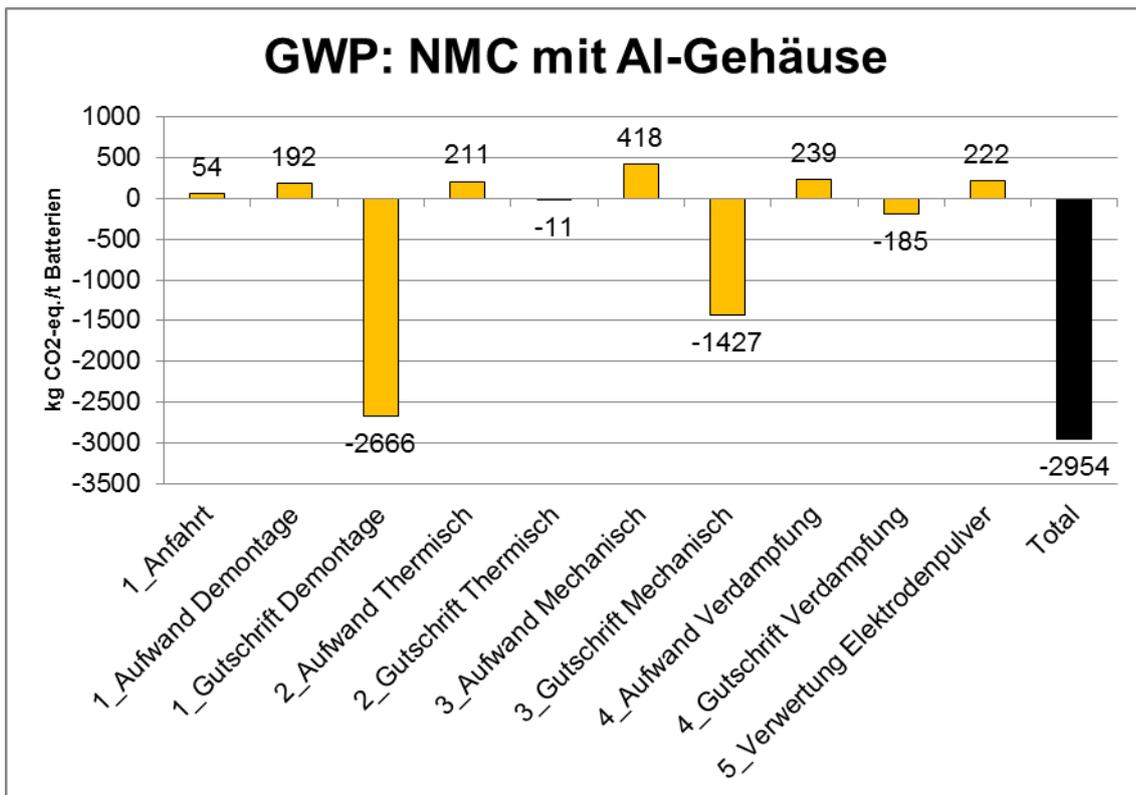
## 5. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse werden nach den vorherigen beschriebenen Routen geordnet. Die berücksichtigten Wirkungskategorien umfassen: GWP, AP, EP, POCP, ADP elem., CED total. Neben den absoluten Ergebnissen in den genannten Wirkungskategorien werden auch normierte Ergebnisse gezeigt.

### 5.1. NMC-Batterien mit Aluminium-Gehäuse

#### 5.1.1. Treihauspotenzial (GWP)

Abbildung 5-1: GWP: NMC Batterien mit Al-Gehäuse



Im ersten Schritt des EcoBatRec-Verfahrens, der Batterie- und Modulzerlegung, entsteht durch die Demontage selbst ein geringer Beitrag zum GWP durch den Strombedarf. Sehr

große Effekte zeigen sich beim Recycling der Wertmetalle und des Kunststoffes, wobei die Gutschriften für das Recyclingmaterial die Lastschriften für die Recyclingprozesse deutlich überwiegen (siehe Abbildung 5-1). Insbesondere treten hier hohe Gutschriften für Aluminium, Edelstahl und Kunststoff auf. Dies ist zum einen durch die mengenmäßig hohen Beiträge der Materialien begründet, zum anderen spiegelt sich darin der Aufwand wider, der für die primäre Herstellung von Aluminium, Edelstahl und Polyamid (hier PA 6) nötig ist. In der Gesamtheit ergibt sich dadurch für den ersten Recyclingschritt eine deutliche Nettogutschrift.

Bei der thermischen Behandlung resultieren die wesentlichen Treibhausgasemissionen aus den direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Prozessschritt, eine kleine Gutschrift entsteht hier durch die Nutzung der Abwärme. Insgesamt entsteht jedoch in diesem Schritt netto eine negative GWP-Bilanz.

Im dritten Schritt, der mechanischen Weiterzerlegung des Materials, entstehen Lasten durch den Stromverbrauch und durch die Recyclingprozesse, vor allem durch das Kupferrecycling. Hohe Gutschriften für das wiedergewonnene Kupfer und Aluminium führen aber auch hier zu einer Nettogutschrift für den Prozessschritt.

Bei der Verdampfung führt der Stromverbrauch wiederum zu einer Last, die durch die Gutschrift für das rückgewonnene Lithium nicht ausgeglichen werden kann.

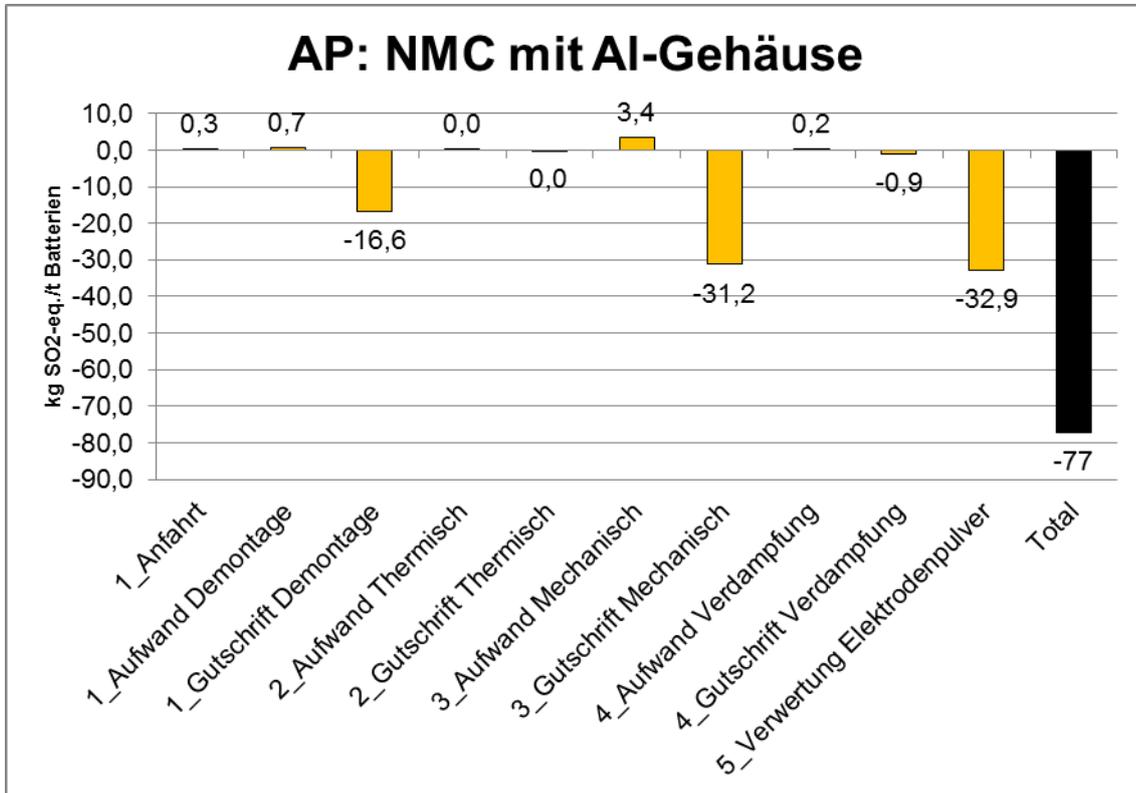
Bei der pyrometallurgischen Aufbereitung des Elektrodenpulvers entstehen Nettoemissionen aus direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen und dem Energie- und Hilfsstoffeinsatz. Die Lastschriften liegen deutlich höher als die Gutschriften durch die Rückgewinnung von Cobalt und Nickel.

Insgesamt überwiegen beim EcoBatRec-Verfahren die Gutschriften bei den Treibhausgasemissionen aber deutlich.

Das Treibhauspotenzial wird zu 79% von CO<sub>2</sub>, zu 5% von Lachgas und zu 6% von Methan bestimmt.

5.1.2. Versauerungspotenzial (AP)

Abbildung 5-2: AP: NMC Batterien mit Al-Gehäuse



Beim Versauerungspotenzial entstehen die wesentlichen Gutschriften im Demontageschritt durch das Recycling des Aluminiums, des Kupfers, des Edelstahl und des Kunststoffes (siehe Abbildung 5-2). Das Recycling des BMS hat hier einen geringeren Einfluss.

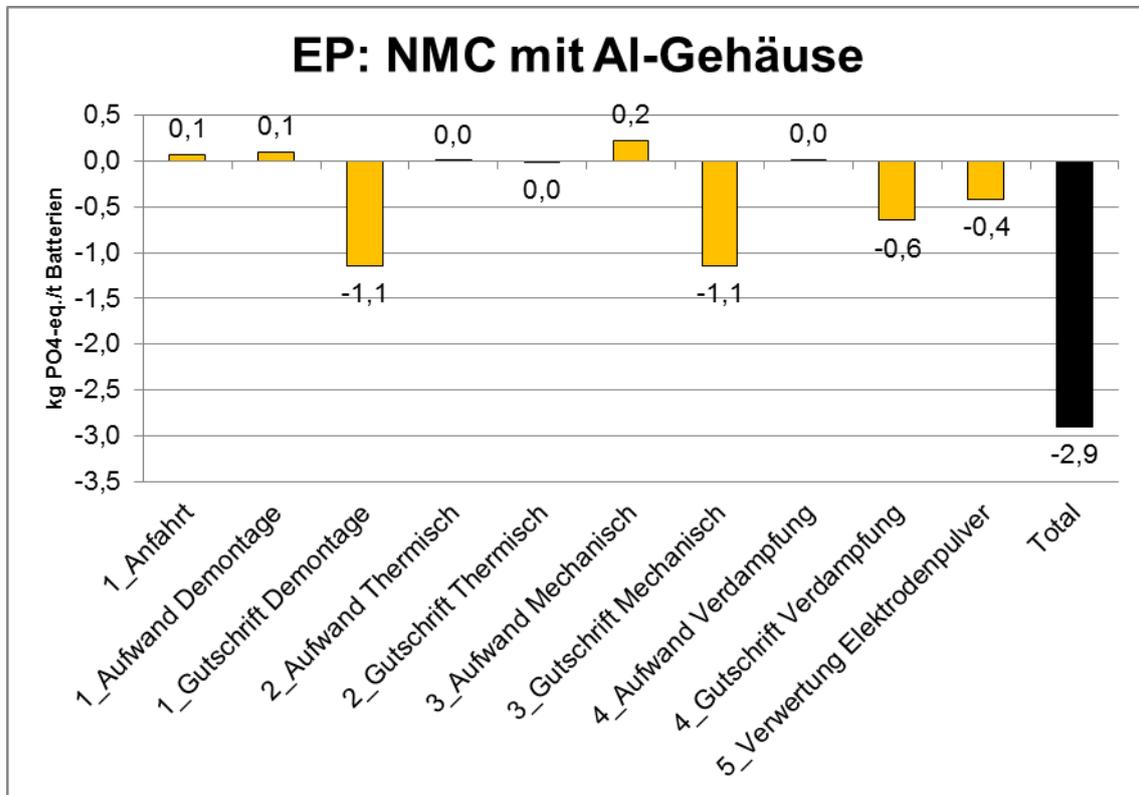
Die merklichen Gutschriften für Kupfer in dieser Wirkungskategorie zeigen sich auch bei der mechanischen Aufbereitung.

Deutliche Gutschriften treten auch bei der pyrometallurgischen Aufbereitung auf. Diese sind insbesondere auf das Nickelrecycling zurückzuführen, da dieses in der Primärherstellung aus sulfidischen Erzen gewonnen wird, wobei ein hohes Versauerungspotenzial besteht.

Das Versauerungspotenzial zu 91% von SO<sub>2</sub> und zu 6% von NO<sub>x</sub> bestimmt.

### 5.1.3. Eutrophierungspotenzial (EP)

Abbildung 5-3: EP: NMC Batterien mit Al-Gehäuse

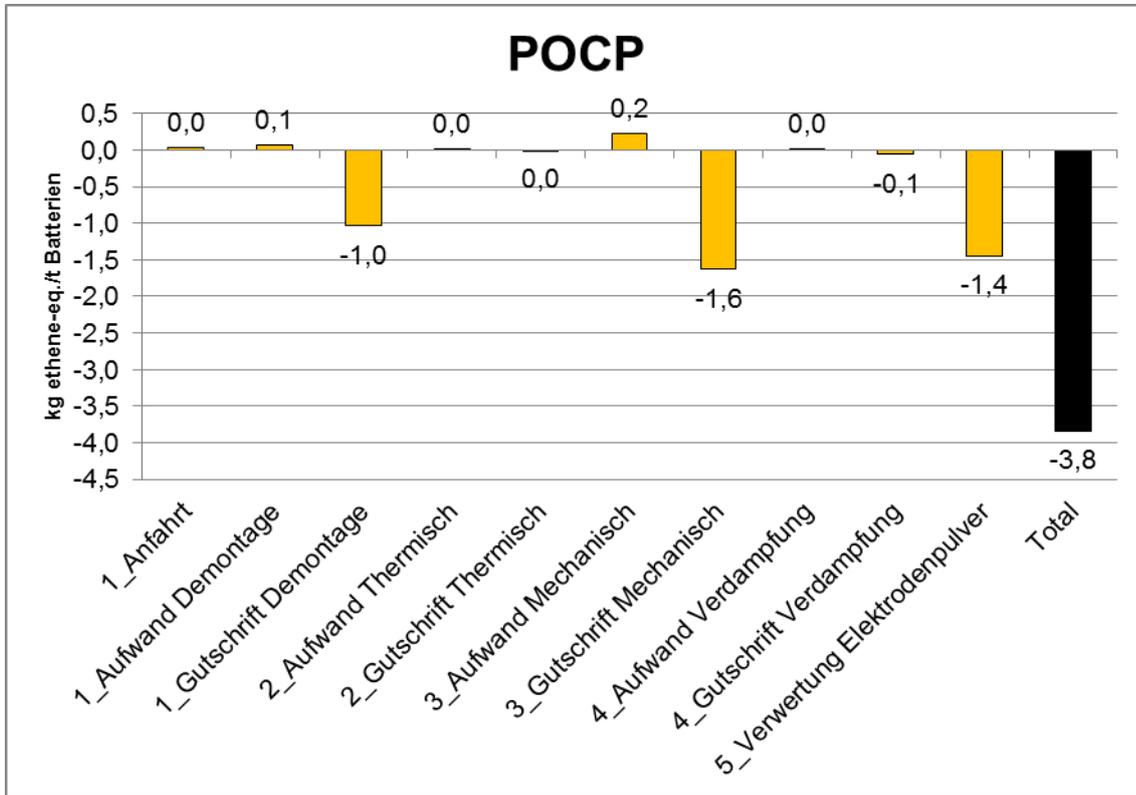


Ähnliche Effekte wie beim Versauerungspotenzial zeigen sich auch beim Eutrophierungspotenzial (EP, Abbildung 5-3). Die deutlichen Gutschriften stammen aus dem Recycling von Aluminium, Kupfer und Edelstahl. Bei der pyrometallurgischen Aufbereitung resultieren beim EP wie bei GWP und AP, Umweltlasten aus dem Hilfsstoff- und Energieinput, die aber durch die Gutschriften aus der Cobalt- und Nickelrückgewinnung kompensiert werden können.

Das Eutrophierungspotenzial zu 41% von NO<sub>x</sub>, zu 20% von Phosphat und zu 10% von Ammoniak bestimmt.

5.1.4. Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)

Abbildung 5-4: POCP: NMC Batterien mit Al-Gehäuse

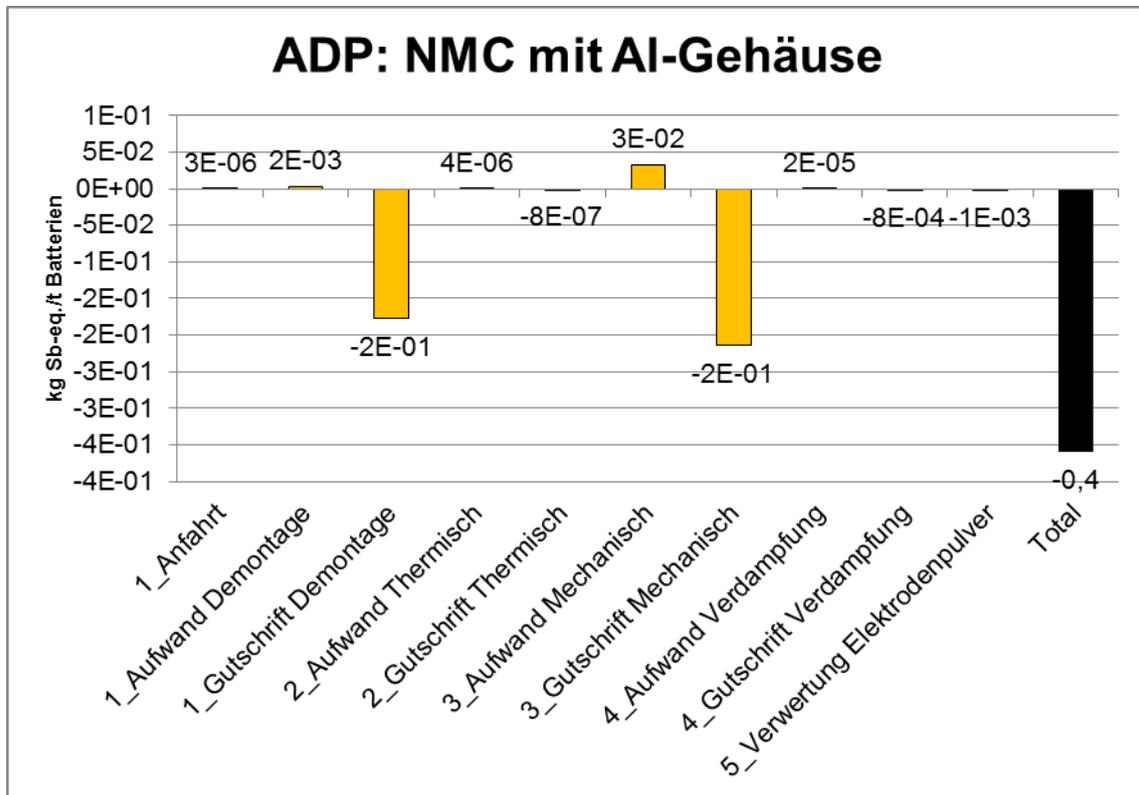


Auch beim Bildungspotenzial photochemischer Oxidantien (POCP, siehe Abbildung 5-4) resultieren aus dem Recyclingprozess deutliche Gutschriften aus dem Metallrecycling, denen deutlich geringere Lasten gegenüberstehen. Die Lasten bei der pyrometallurgischen Aufbereitung kommen aus dem Hilfsstoff- und Energieinput, durch die Gutschriften aus der Cobalt- und Nickelrückgewinnung gibt es aber auch für diesen Schritt eine Nettogutschrift.

Das Photochemische Ozonbildungspotenzial zu 73% von Schwefeldioxid, zu 12% von NMVOC und zu 3% von Kohlenmonoxid bestimmt.

5.1.5. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP elem.)

Abbildung 5-5: ADP, elem.: NMC Batterien mit Al-Gehäuse



Bei der Batterie- und Moduldemontage fallen Wertschrotte an (z. B. Kupfer, Nickel, Gold, Silber aus dem BMS, Kupfer aus Kabeln, Edelstahl aus dem Gehäuse), die nach dem Recycling durch die dadurch bedingte Vermeidung der Primärextraktion zu hohen Gutschriften beim elementaren Ressourcenverbrauch führen (siehe Abbildung 5-5). Dabei sind die Gutschriften für die Metalle aus dem BMS sehr deutlich, da es sich insbesondere bei Gold und Silber um in dieser Wirkungskategorie hochbewertete Metalle handelt. Im Vergleich zu den Gutschriften fallen bei der Demontage keine relevanten Lastschriften an, was insgesamt zu einer deutlichen Nettogutschrift führt.

Bei der mechanische Zerlegung gibt es eine Last durch den Sekundärkupferprozess, die allerdings durch die recht hohen Gutschriften für das zurückgewonnen Kupfer deutlich kompensiert werden.

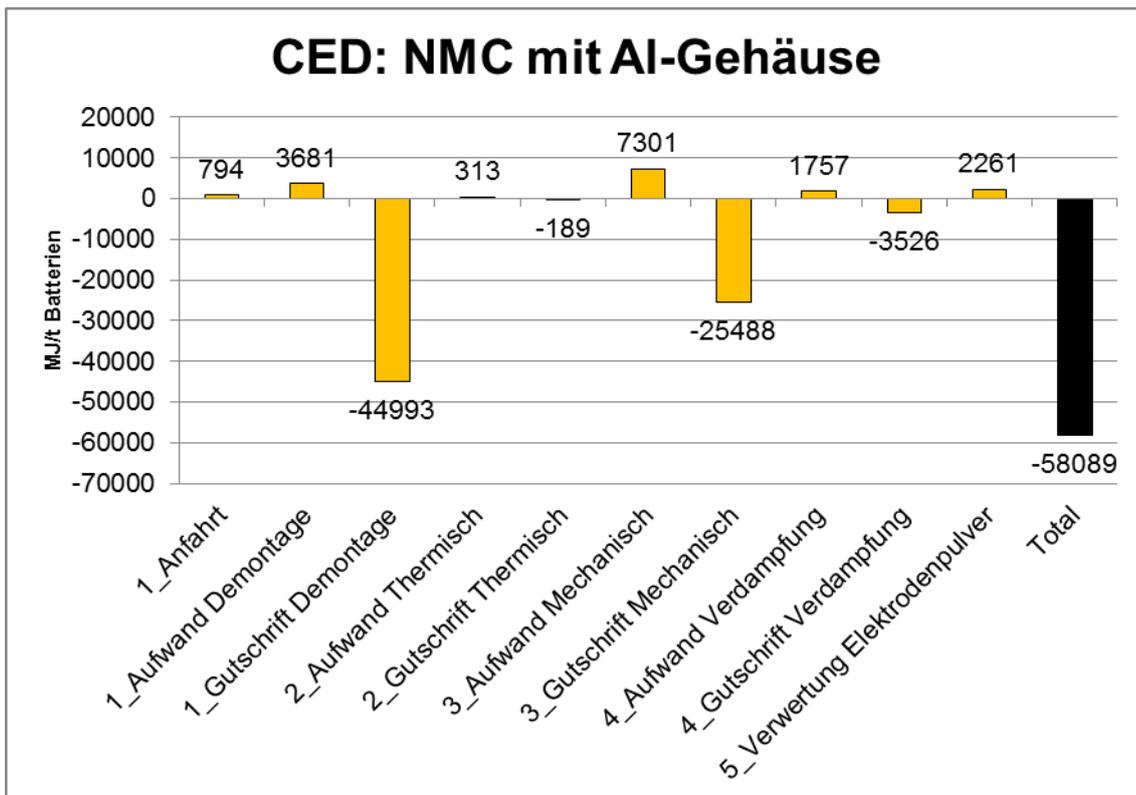
Trotz der Rückgewinnung der Aktivmaterialien sind in den Schritten Lithium-Verdampfung und pyrometallurgische Aufbereitung die Gutschriften beim  $ADP_{elem.}$  nicht signifikant. Dies liegt daran, dass Kobalt, Nickel, Mangan und Lithium z. B. im Vergleich zum Kupfer in dieser Wirkungskategorie niedriger bewertet sind. Der wesentliche Beitrag zur Nettogutschrift in

diesem Prozessschritt entsteht durch die Rückgewinnung von Kobalt- und Nickelverbindungen.

Der Verbrauch elementarer Ressourcen wird zu 48% vom Verbrauch an Kupfer, zu 13% von Verbrauch an Gold und zu 10% von Silberverbrauch bestimmt.

**5.1.6. Kumulierter Energieaufwand (CED total)**

**Abbildung 5-6: CED, total: NMC Batterien mit Al-Gehäuse**



Bei der Demontage stammen beim Kumulierte Energieaufwand (CED, siehe Abbildung 5-6) wie beim GWP die wesentlichen Gutschriften aus dem Aluminium-, Edelstahl- und Kunststoffrecycling. Die Lastschriften aus dem Aluminiumrecycling sind geringer, so dass eine hohe Nettogutschrift resultiert.

Bei der mechanischen Zerlegung zeigt der CED<sub>total</sub> deutliche Beiträge aus dem Aluminium- und Kupferrecycling, aber auch Gutschriften durch die zurückgewonnenen Metalle.

Im Schritt Lithium-Verdampfung gibt es eine Nettogutschrift durch die Lithiumrückgewinnung.

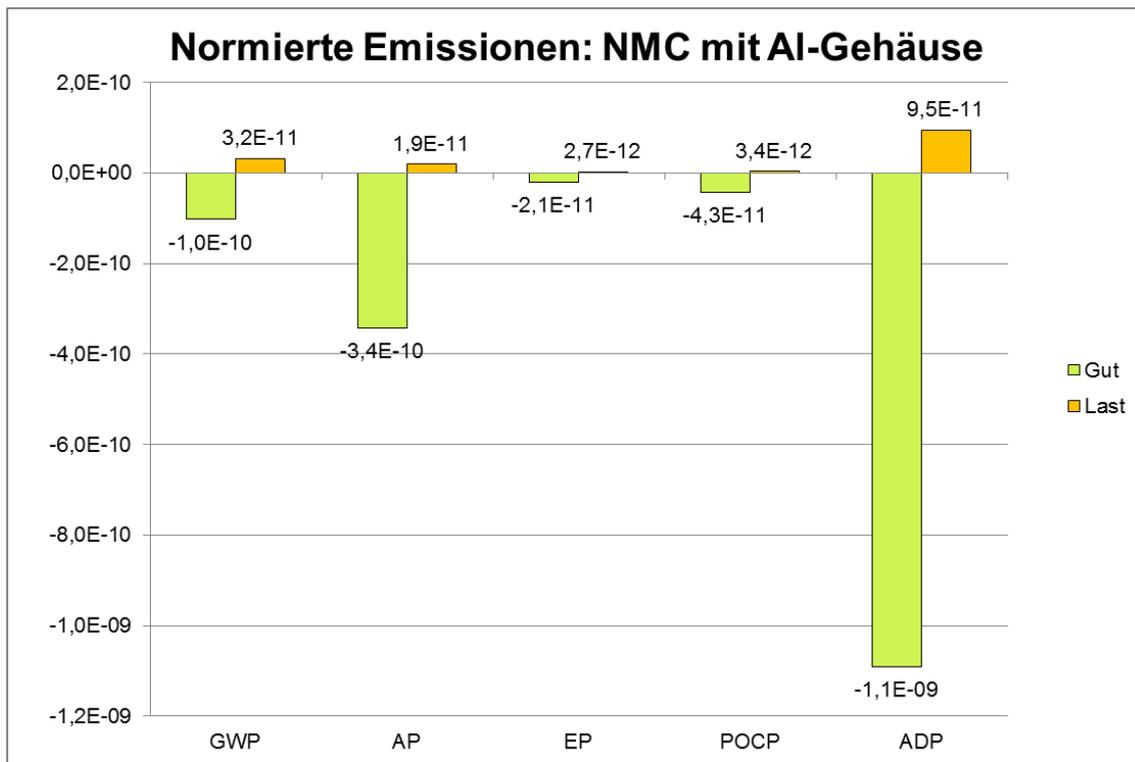
Bei der pyrometallurgischen Aufbereitung resultieren Umweltlasten aus dem Hilfsstoff- und Energieinput, die nicht durch die Gutschriften aus der Cobalt- und Nickelrückgewinnung kompensiert werden können.

Der Primärenergieverbrauch zu 17% Erdgas-, zu 23% Erdöl- und zu 17% vom Steinkohleverbrauch bestimmt.

### 5.1.7. Normierte Darstellung

Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Wirkungskategorien in einer normierten Darstellung.

**Abbildung 5-7: Normierte Emissionen: NMC-Batterien mit Al-Gehäuse**



Es zeigt sich, dass die normierten Ergebnisse stark dominiert werden von der ADP-Gutschrift für die zurückgewonnenen Metalle, vor allem für Kupfer, Nickel, Gold und Silber.

Die Gutschriften in den Kategorien  $ADP_{elem.}$  und AP fallen am deutlichsten ins Gewicht. Beim  $ADP_{elem.}$  ist dies insbesondere durch die hohen Gutschriften aus Kupfer-, Gold-, Nickel-, und Silberrecycling begründet. Beim AP entstehen die höchsten Gutschriften beim Nickel- sowie beim Kupfer- und Aluminiumrecycling.

Bei den Lastschriften sind  $ADP_{elem.}$  und GWP am ausgeprägtesten.

Generell überwiegen in der Gesamtkette – trotz des nicht immer vorteilhaften Beitrages der hydrometallurgischen Aufbereitung selbst – die Gutschriften die Lastschriften deutlich, was in einem Recyclingprozess zu erwarten ist, der ausgehend von einem lastenfreien Eingang der zu verwertenden Stoffströme bilanziert wurde.

## 5.2. LFP-Batterien

### 5.2.1. Treibhauspotenzial (GWP)

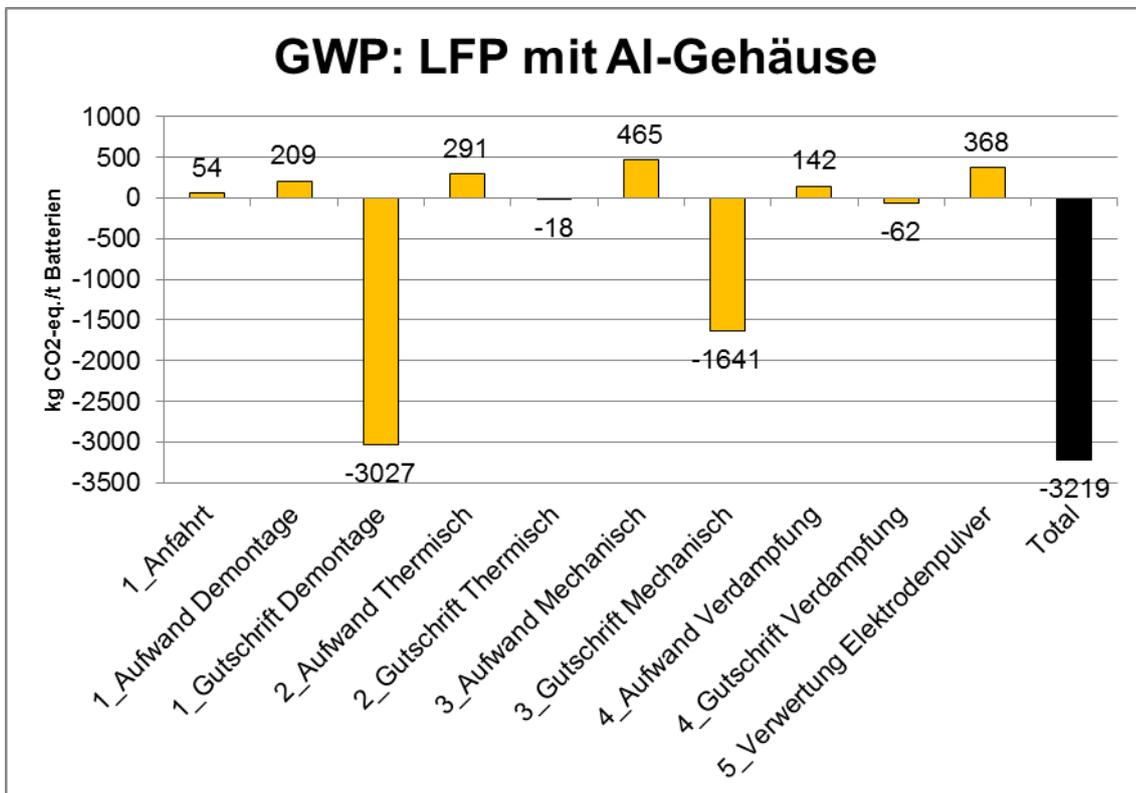
Wie bei den NMC-Batterien entsteht auch bei den Batterien mit LFP-Kathode im ersten Schritt des EcoBatRec-Verfahrens, der Batterie- und Modulzerlegung, durch die Demontage selbst ein geringer Beitrag zum GWP durch den Strombedarf (siehe Abbildung 5-8). Wesentliche Unterschiede zeigen sich zum einen beim Recycling der Gehäusematerialien, bei dem die unterschiedliche Zusammensetzung je FU (vor allem im Aluminiumgehalt) zu deutlich höheren Gutschriften bei den LFP-Batterien führt. Ähnliche Effekte durch höheren Aluminiumgehalt treten auch in den weiteren Schritten (thermische Pyrolyse und mechanische Auftrennung) auf. Bei der Verdampfung wirkt sich der deutlich niedrigere Lithiumgehalt aus, der zu geringerem Aufwand, aber auch geringeren Gutschriften führt.

Da bei der LFP-Kathode nur Eisen, hingegen kein Cobalt bzw. Nickel zurückgewonnen wird, ist die Nettolast im pyrometallurgischen Schritt etwas höher als bei den NMC-Batterien.

Insgesamt ergibt sich bei LFP-Batterien aber eine höhere Nettogutschrift beim GWP.

Das Treibhauspotenzial wird zu 79% von CO<sub>2</sub>, zu 5% von Lachgas und zu 6% von Methan bestimmt.

Abbildung 5-8: GWP: LFP-Batterien

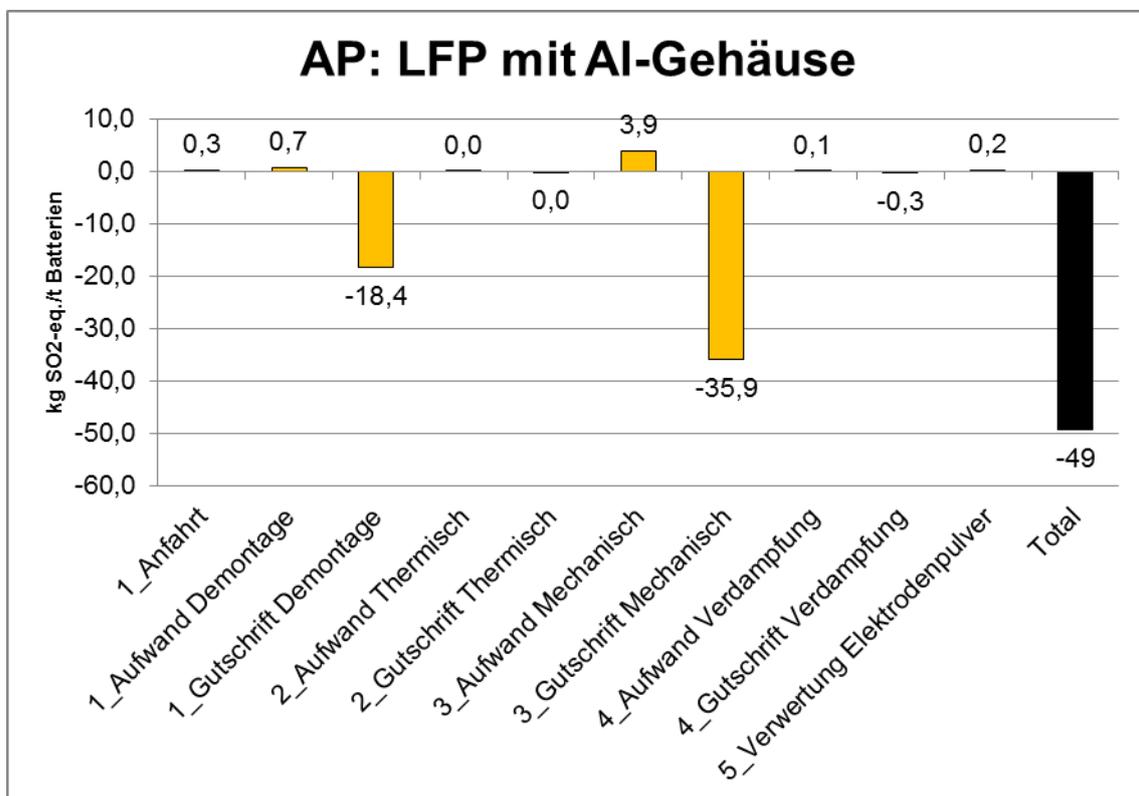


### 5.2.2. Versauerungspotenzial (AP)

Beim Versauerungspotenzial unterscheiden sich die Schritte Demontage, thermische Pyrolyse, mechanische Separation und Lithium-Verdampfung bei den LFP-Batterien kaum von den Ergebnissen der NMC-Batterien. Große Unterschiede treten hingegen bei der pyrometallurgischen Aufbereitung des Aktivmaterials auf (siehe Abbildung 5-9). Bei den LFP-Batterien liefert dieser Schritt keinen wesentlichen Beitrag, während bei den NMC-Batterien durch die Rückgewinnung des in der Primärproduktion aus sulfidischen Erzen gewonnenen Nickels in dieser Wirkungskategorie der wesentlichste Beitrag zum Gesamtprozess entsteht (vgl. Abbildung 5-2).

Das Versauerungspotenzial zu 87% von SO<sub>2</sub> und zu 9% von NO<sub>x</sub> bestimmt.

Abbildung 5-9: AP: LFP-Batterien



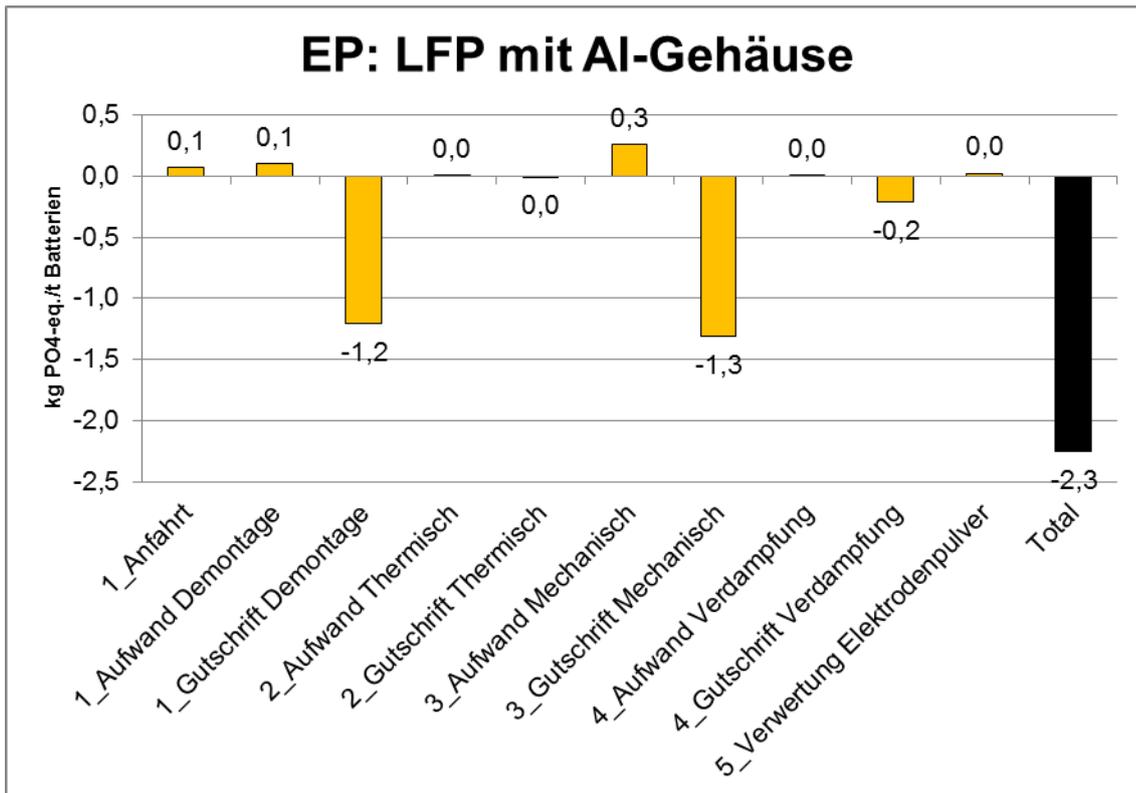
### 5.2.3. Eutrophierungspotenzial (EP)

Auch beim Eutrophierungspotenzial zeigen sich bei den Schritten Demontage, thermische Pyrolyse und mechanische Separation und kaum Unterschiede zu den NMC-Batterien (siehe Abbildung 5-10). Bei der Lithium-Verdampfung gibt es eine etwas höhere Gutschrift. Unterschiede treten wiederum bei der pyrometallurgischen Aufbereitung des Aktivmaterials auf. Bei den LFP-Batterien liefert dieser Schritt keinen wesentlichen Beitrag, während bei den NMC-Batterien durch die Rückgewinnung von weiteren Metallen neben Lithiumhydroxid

wesentliche Beiträge zum Gesamtprozess in dieser Wirkungskategorie entstehen (vgl. Abbildung 5-3).

Das Eutrophierungspotenzial zu 50% von NO<sub>x</sub>, zu 6% von Lachgas und zu 11% von Ammoniak bestimmt.

Abbildung 5-10: EP: LFP-Batterien



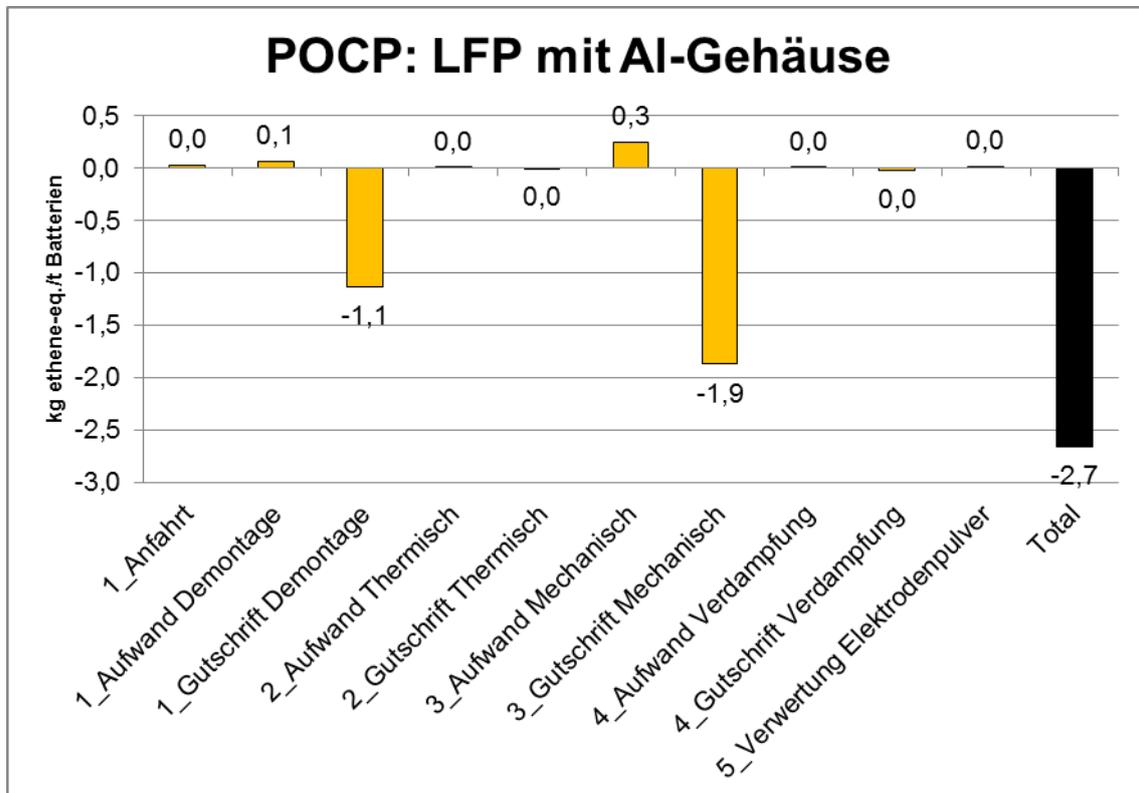
#### 5.2.4. Photochemisches Ozonbildungspotenzial (POCP)

Ein ähnliches Bild wie in den Wirkungskategorien AP und EP zeigt sich auch beim POCP (siehe Abbildung 5-11): die Schritte bis einschließlich der Lithium-Verdampfung unterschieden sich nur unwesentlich von denen bei den NMC-Batterien (vgl. Abbildung 5-4).

Die pyrometallurgische Aufbereitung des Elektrodenmaterials liefert auch beim POCP keinen wesentlichen Beitrag bei den LFP-Batterien, während bei den NMC-Batterien durch die Rückgewinnung von weiteren Metallen neben Lithiumhydroxid wesentliche Beiträge zum Gesamtprozess in dieser Wirkungskategorie entstehen.

Das Photochemische Ozonbildungspotenzial zu 65% von Schwefeldioxid, zu 14% von NMVOC, zu 9% von NO<sub>x</sub> und zu 4% von Kohlenmonoxid bestimmt.

Abbildung 5-11: POCP: LFP-Batterien

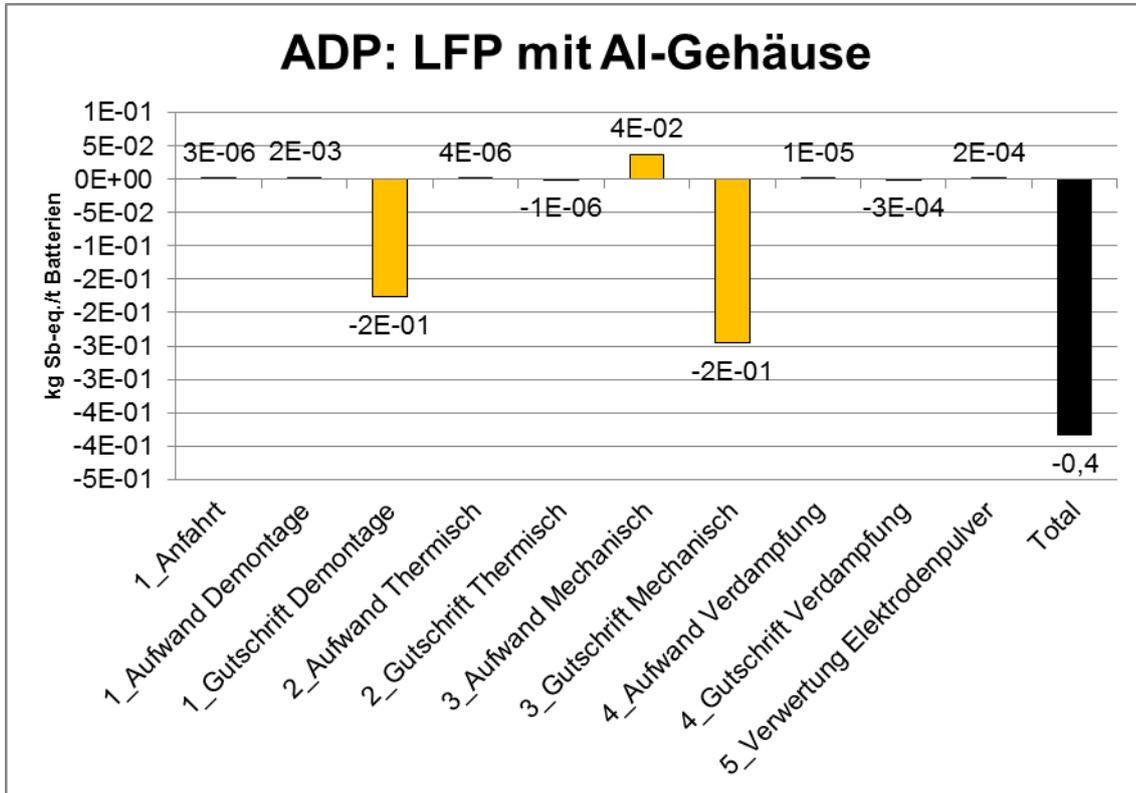


### 5.2.5. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP, elem)

Beim Verbrauch elementarer Ressourcen zeigen sich wegen der ähnlichen Gehalts an Kupfer und Edelmetallen nur geringe Unterschiede zu den Ergebnissen bei den NMC-Batterien. Auch bei den LFP-Batterien werden die Ergebnisse dominiert von den Gutschriften für die zurückgewonnen Metalle (siehe Abbildung 5-12).

Der Verbrauch elementarer Ressourcen wird zu 50% vom Verbrauch an Kupfer, zu 12% von Verbrauch an Gold und zu 9% von Silberverbrauch bestimmt.

Abbildung 5-12: ADP, elem.: LFP-Batterien

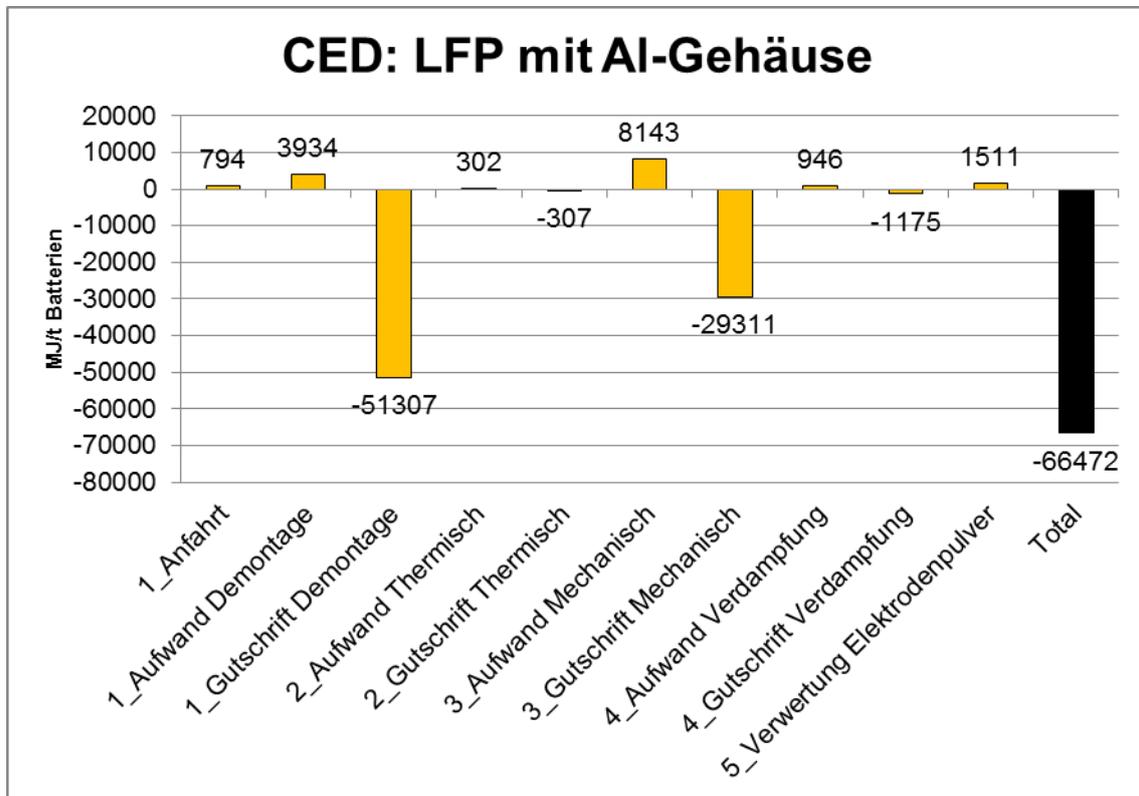


### 5.2.6. Primärenergieverbrauch, gesamt (CED, total)

Beim Kumulierten Energieaufwand ( $CED_{total}$ ) zeigen sich Unterschiede zu den Ergebnissen bei den NMC-Batterien zum sowohl im Demontageschritt wie auch in der mechanischen Separation, bei denen der höhere Aluminiumgehalt zu höheren Lasten durch das Recycling aber auch deutlich höheren Gutschriften bei den LFP-Batterien führt (siehe Abbildung 5-13). Durch den geringeren Lithiumgehalt sind beim Verdampfungsschritt sowohl die Lasten wie auch die Gutschriften geringer. Bei der pyrometallurgischen Verarbeitung des Elektrodenmaterials weisen die LFP-Batterien durch den geringeren Hilfsstoff- und Energiebedarf eine geringere Lastschrift auf, zum anderen aber geringere Gutschriften, da nur Eisen zurückgewonnen wird.

Der Primärenergieverbrauch zu 19% Erdgas-, zu 20% Erdöl- und zu 16% vom Steinkohleverbrauch bestimmt.

Abbildung 5-13: CED, total: LFP-Batterien



### 5.2.7. Normierte Darstellung

Abbildung 5-14 zeigt die Ergebnisse der Wirkungskategorien in einer normierten Darstellung.

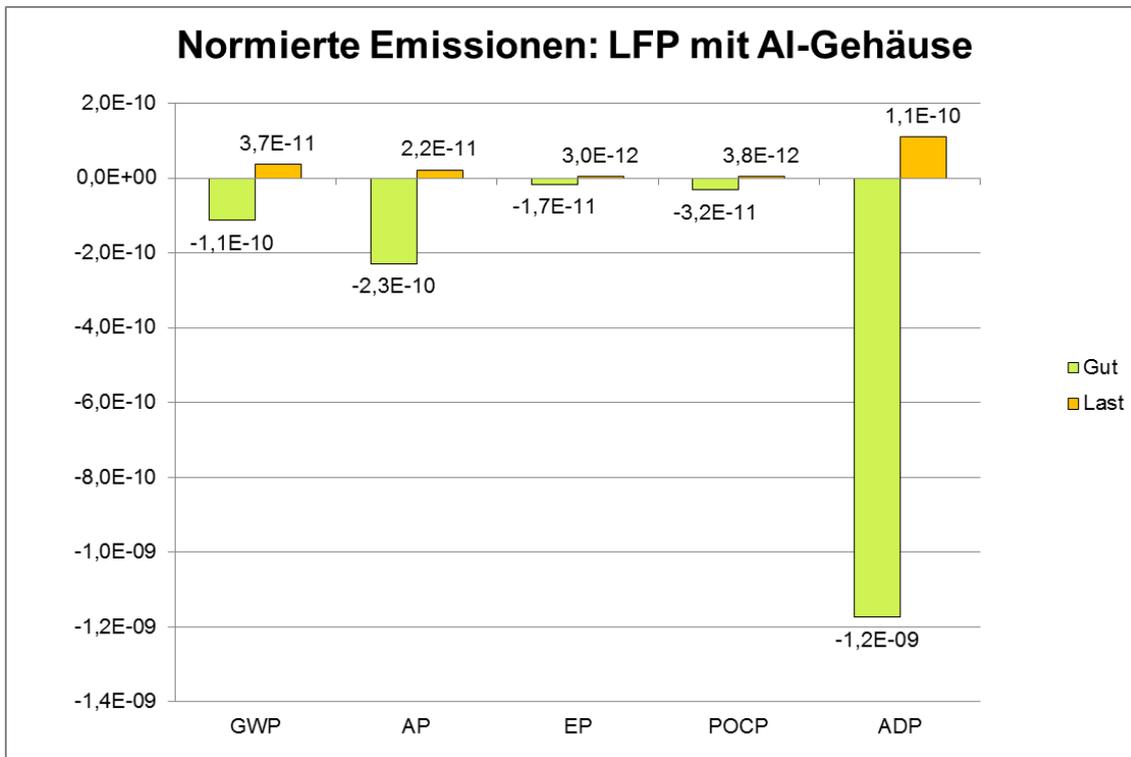
Wie schon bei den NMC-Batterien werden auch bei den LFP-Batterien die Ergebnisse von den ADP-Gutschriften für die zurückgewonnenen Metalle dominiert, vor allem für Kupfer, Nickel, Gold und Silber.

Es zeigt sich, dass auch bei den LFP-Batterien die Gutschriften in den Kategorien  $ADP_{elem.}$  und AP am deutlichsten ins Gewicht fallen. Beim  $ADP_{elem.}$  ist dies wiederum durch die hohen Gutschriften aus Kupfer-, Gold-, und Silberrecycling begründet. Beim AP sind die Gutschriften bei den LFP-Batterien etwas geringer, da hier kein Nickel zurückgewonnen wird,

Bei den Lastschriften sind auch hier  $ADP_{elem.}$  und GWP am ausgeprägtesten.

Generell überwiegen auch bei den LFP-Batterien in der Gesamtkette – trotz des bei allen untersuchten Wirkungskategorien neutralen oder gar nachteiligen Beitrages der pyrometallurgischen Aufbereitung – die Gutschriften die Lastschriften deutlich, was in einem Recyclingprozess zu erwarten ist, der ausgehend von einem lastenfreien Eingang der zu verwertenden Stoffströme bilanziert wurde.

Abbildung 5-14: Normierte Emissionen: LFP-Batterien



## 6. Auswertung

Das folgende Kapitel wertet die in Kapitel 4 und 5 dargestellten Ergebnisse aus. Hierzu werden zunächst Parameter und Annahmen, die die Ergebnisse der Ökobilanzen wesentlich beeinflussen, herausgearbeitet und diskutiert (Kapitel 6.1). Davon ausgehend wird die Relevanz der Aussagen der Ökobilanzen beurteilt: Hierfür erfolgt zunächst die Prüfung der Vollständigkeit (Kapitel 6.2.1), darauf folgend die Analyse der Beeinflussung des Ergebnisses durch variierte Einflussgrößen (Sensitivitätsanalysen, Kapitel 6.2.2) und eine Erörterung der Konsistenz der Ergebnisse (Kapitel 6.2.3). Abschließend geht Kapitel 6.3 zusammenfassend auf Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen ein, die sich aus den Ökobilanzen ergeben.

### 6.1. Identifizierung der signifikanten Parameter

In allen Wirkungskategorien zeigen die Gutschriften für die zurückgewonnenen Metalle (Aluminium, Edelstahl, Kupfer, Edelmetalle, Nickel) einen signifikanten Einfluss auf das Gesamtergebnis. Dies gilt sowohl für die NMC als auch die LFP-Batterien.

Die Normierung der Wirkungskategorien zeigt für den Verbrauch elementarer Ressourcen ( $ADP_{elem.}$ ) die höchsten Beiträge. In dieser Wirkungskategorie hat die Definition zur Berechnung der Charakterisierungsfaktoren einen hohen Einfluss, einerseits auf die absolute

Höhe der Werte, andererseits auf das Verhältnis der Knappheit einzelner Metalle untereinander [CML 2002].

Den Einfluss der Recyclingstufen auf die untersuchten Wirkungskategorien zeigen, jeweils berechnet für die Last- und die Gutschriften Tabelle 6-1 für NMC-Batterien bzw. Tabelle 6-2 für LFP-Batterien.

**Tabelle 6-1: NMC-Batterien mit Al-Gehäuse: Einfluss der Recyclingstufen auf die Ergebnisse der Wirkungskategorien (getrennt nach Gut- und Lastschrift)**

Wirkungskategorie		Lastschrift	Gutschrift
<b>GWP</b>	Anfahrt	4%	
	Demontage	14%	62%
	Thermisch	16%	0%
	Mechanisch	31%	33%
	Verdampfung	18%	4%
	Pyrometallurgie	17%	0%
<b>AP</b>	Anfahrt	6%	
	Demontage	14%	20%
	Thermisch	1%	0%
	Mechanisch	75%	38%
	Verdampfung	4%	1%
	Pyrometallurgie	0%	40%
<b>EP</b>	Anfahrt	17%	
	Demontage	24%	34%
	Thermisch	1%	0%
	Mechanisch	53%	34%
	Verdampfung	5%	19%
	Pyrometallurgie	0%	12%
<b>POCP</b>	Anfahrt	8%	
	Demontage	19%	25%
	Thermisch	1%	0%
	Mechanisch	67%	39%
	Verdampfung	5%	1%

	Pyrometallurgie	0%	35%
<b>ADP elem.</b>	Anfahrt	0%	
	Demontage	7%	45%
	Thermisch	0%	0%
	Mechanisch	93%	54%
	Verdampfung	0%	0%
	Pyrometallurgie	0%	0%
<b>CED total</b>	Anfahrt	5%	
	Demontage	23%	61%
	Thermisch	2%	0%
	Mechanisch	45%	34%
	Verdampfung	11%	5%
	Pyrometallurgie	14%	0%

**Tabelle 6-2: LFP-Batterien mit Al-Gehäuse: Einfluss der Recyclingstufen auf die Ergebnisse der Wirkungskategorien (getrennt nach Gut- und Lastschrift)**

Wirkungskategorie		Lastschrift	Gutschrift
<b>GWP</b>	Anfahrt	4%	
	Demontage	14%	38%
	Thermisch	19%	0%
	Mechanisch	30%	21%
	Verdampfung	9%	1%
	Pyrometallurgie	24%	40%
<b>AP</b>	Anfahrt	5%	
	Demontage	13%	18%
	Thermisch	1%	0%
	Mechanisch	76%	35%
	Verdampfung	2%	0%
	Pyrometallurgie	3%	48%
<b>EP</b>	Anfahrt	15%	
	Demontage	22%	24%
	Thermisch	1%	0%
	Mechanisch	54%	26%
	Verdampfung	2%	4%
	Pyrometallurgie	5%	45%
<b>POCP</b>	Anfahrt	8%	
	Demontage	18%	20%
	Thermisch	1%	0%
	Mechanisch	68%	33%
	Verdampfung	2%	0%

	Pyrometallurgie	4%	47%
<b>ADP elem.</b>	Anfahrt	0%	
	Demontage	6%	22%
	Thermisch	0%	0%
	Mechanisch	93%	30%
	Verdampfung	0%	0%
	Pyrometallurgie	1%	48%
<b>CED total</b>	Anfahrt	5%	
	Demontage	25%	35%
	Thermisch	2%	0%
	Mechanisch	52%	20%
	Verdampfung	6%	1%
	Pyrometallurgie	10%	45%

Ein wichtiger Parameter ist zudem der gewählte EoL-Allokationsansatz. Dieser sieht vor, dass die gebrauchten Batterien in die Bilanzierung als lastenfreier Input in das Recycling gehen. Da nach heutigem Stand praktisch noch kein Recycling in nennenswertem Umfang stattfindet, wurde von einer Sensitivitätsrechnung mit einer anderen Methode abgesehen.

## 6.2. Beurteilung

Um die Aussagekraft der erstellten Ökobilanzen zu prüfen, werden in den folgenden Abschnitten die Bilanzergebnisse nach den Kriterien Vollständigkeit, Sensitivität gegenüber der Variation von Einflussgrößen (siehe auch Kapitel 6.1) und Konsistenz untersucht und ausgewertet.

### 6.2.1. Vollständigkeitsprüfung

Für die vorliegende Ökobilanz wurden Daten zu allen für das Batterierecycling relevanten Prozessschritten erhoben. Alle Materialströme aus den Batterien wurden vollständig erfasst und über die beschriebenen Prozessschritte verfolgt. Für die Prozessschritte Demontage und hydrometallurgische Aufbereitung ist die Datenlage als befriedigend bis gut zu betrachten, da sie sich auf Verfahren im Pilotmaßstab stützt. Die Prozessschritte Zellzerlegung und Separation des Aktivmaterials sind aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums zukünftig noch vertieft zu untersuchen und konnten in dieser Ökobilanz möglicherweise nur unzureichend beschrieben werden:

## 6.2.2. Sensitivitätsprüfung

Im Folgenden wird die Sensitivität der Ergebnisse der Ökobilanz gegenüber einer Variation von ausgewählten, ergebnisrelevanten Einflussgrößen dargestellt und diskutiert.

### 6.2.2.1. NMC-Batterien mit CFK-Gehäuse

Im Basisszenario dieser Studie wird als Material für das NMC-Batteriegehäuse Aluminium angenommen. Andere mögliche Materialien sind Edelstahl oder Carbon-fibre Composites (CFK). In zwei Sensitivitäten wird der Effekt der Wahl eines anderen Gehäusematerials auf das Ergebnis der Ökobilanz des Batterierecyclings untersucht. CFK ist deutlich leichter als Stahl oder Aluminium, was die Nutzung im Automobilbau interessant macht.

Für die Interpretation der Bilanzergebnisse muss beachtet werden, dass sich durch die leichteren Gehäusematerialien die Zusammensetzung der Batterien ändert. Dass die FU (1000 kg Batterien) konstant gehalten wird, sich das Gehäusematerial jedoch ändert, ändern sich auch die Anteile der Zellen am Gesamtgewicht. Die Zusammensetzung der eigentlichen Zellen bleibt konstant. Eine andere Möglichkeit wäre, das Gewicht der Zellen konstant zu halten und nur das Gehäuse zu ändern, so dass sich der Wert der FU (1000 kg) ändern würde, bei einem Stahlgehäuse wäre das Gewicht höher, bei einem CFK-Gehäuse niedriger. Da aber schon bei den unterschiedlichen Batterietypen (NMC und LFP) deutliche Unterschiede im Verhältnis Gehäuse zu Zellen bestehen, wird hier aus Gründen der Einfachheit auch in den Sensitivitätsrechnungen die Gesamtmasse der FU konstant gehalten.

Die generische Zusammensetzung der NMC-Batterien mit CFK- bzw. Stahlgehäuse ist in Tabelle 6-3 aufgeführt.

**Tabelle 6-3: Generische Zusammensetzung NMC-Batterien (CFK, Stahl)**

<b>Gehäuse</b>		<b>CFK</b>	<b>Stahl</b>
<b>Batterie</b>	<b>Gesamt</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
<b>Pack + Modul</b>	Stahl (inkl. Schrauben)	8%	39%
	Kabel	1%	1%
	Elektronikbauteile (WEEE)	2%	2%
	Kunststoffe	6%	4%
	CFK	10%	0%
	Aluminium	4%	3%
	<b>Zellgehäuse</b>	Al	5%
<b>Anode</b>	Kohlenstoff	10%	7%
	Cu	11%	8%
	Sonstige	1%	1%
<b>Kathode</b>	Mn	8%	6%
	Li	1%	1%
	Co	1%	1%
	Ni	2%	2%
	Al	7%	5%
	Sauerstoff	6%	4%
	Sonstige	2%	1%
<b>Separatoren</b>	Kunststoffe	5%	3%
<b>Tabs</b>	Cu	1%	0%
	Al	0%	0%
	Sonstige	0%	0%
<b>Electrolyt</b>	Lösungsmittel	10%	7%

Stand: nach Umbrella-Meeting 1.10.2014

Bei CFK wird die thermische Verwertung als Ersatzbrennstoff im Zementwerk modelliert. Hier wird davon ausgegangen, dass es dort Steinkohle substituiert. Die Substitution erfolgt über Heizwertäquivalente (1,15 kg-Steinkohle/kg-CFK). Gutgeschrieben werden die vermiedenen Kohlendioxidemissionen aus der Steinkohleverbrennung sowie die Vorkette der Steinkohle. Als Last aus der CFK-Verbrennung wird nur der stöchiometrische CO<sub>2</sub>-Ausstoß angerechnet, wobei von einer vollständigen Verbrennung ausgegangen wird.

Beim CFK-Gehäuse macht sich in den Ergebnissen vor allem die Reduktion der Gutschriften aus dem Aluminiumrecycling bemerkbar. Aus der thermischen Verwertung des CFK-Gehäuses als Ersatzbrennstoff in einem Zementwerk ergeben sich keine nennenswerten Gutschriften (Abbildung 6-1 bis Abbildung 6-6). Allerdings ist aufgrund der Steinkohle-Substitution die Verbrennung des CFK auch nicht mit GWP-Lasten verbunden.

Die Aluminiumgutschrift reduziert sich beim GWP deutlich, was zu einer Halbierung der Nettogutschrift führt. Auch beim AP, EP, POCP und CED ist ein Rückgang zu sehen. Aus der thermischen Verwertung des CFK resultieren in diesen Wirkungskategorien Gutschriften, die auf der Substitution der Vorkette der Steinkohle beruhen. Bei der Verrechnung der Emissionen aus der CFK- und der Steinkohleverbrennung wurde nur Kohlendioxid berücksichtigt, so dass hieraus für diese Kategorien kein Effekt entsteht. Hingegen ist beim ADP eine größere Nettogutschrift zu verzeichnen aufgrund des höheren Anteils der Zellen an den Batterien, da sich hier die höheren Gutschriften aus den zurückgewonnenen Materialien aus den Zellen bemerkbar machen.

Die Nettogutschrift verringert sich am deutlichsten in den Kategorien GWP und KEA n.e. (um rund 40 % bzw. 30 % geringer). In den anderen Kategorien schwankt die Minderung um 10 %, beim ADP ist die Nettogutschrift dagegen um ca. 5 % höher.

Allerdings muss sowohl bei CFK-Gehäusen berücksichtigt werden, dass sie durch ihre geringere Dichte während der Nutzungsphase zu reduzierten Umweltwirkungen führen (Treibstoffeinsparung durch Gewichtsreduzierung).

Abbildung 6-1: GWP: NMC-Batterien mit CFK-Gehäuse

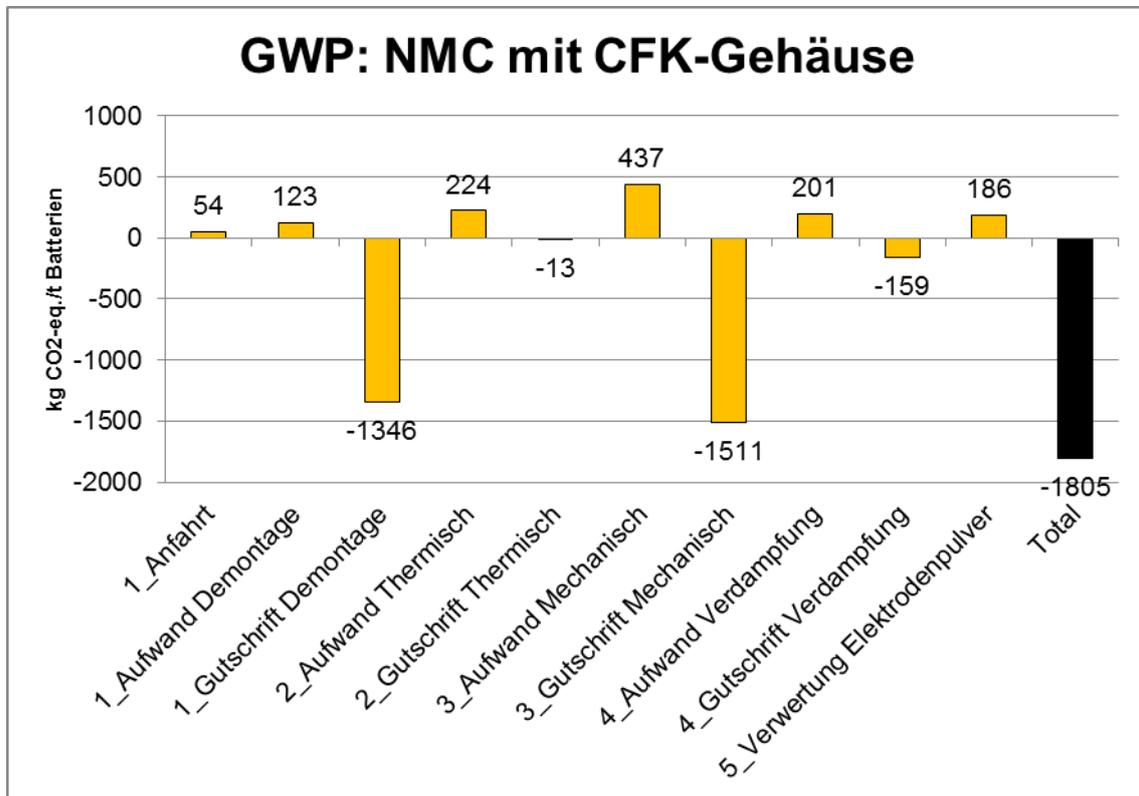


Abbildung 6-2: AP: NMC Batterien mit CFK-Gehäuse

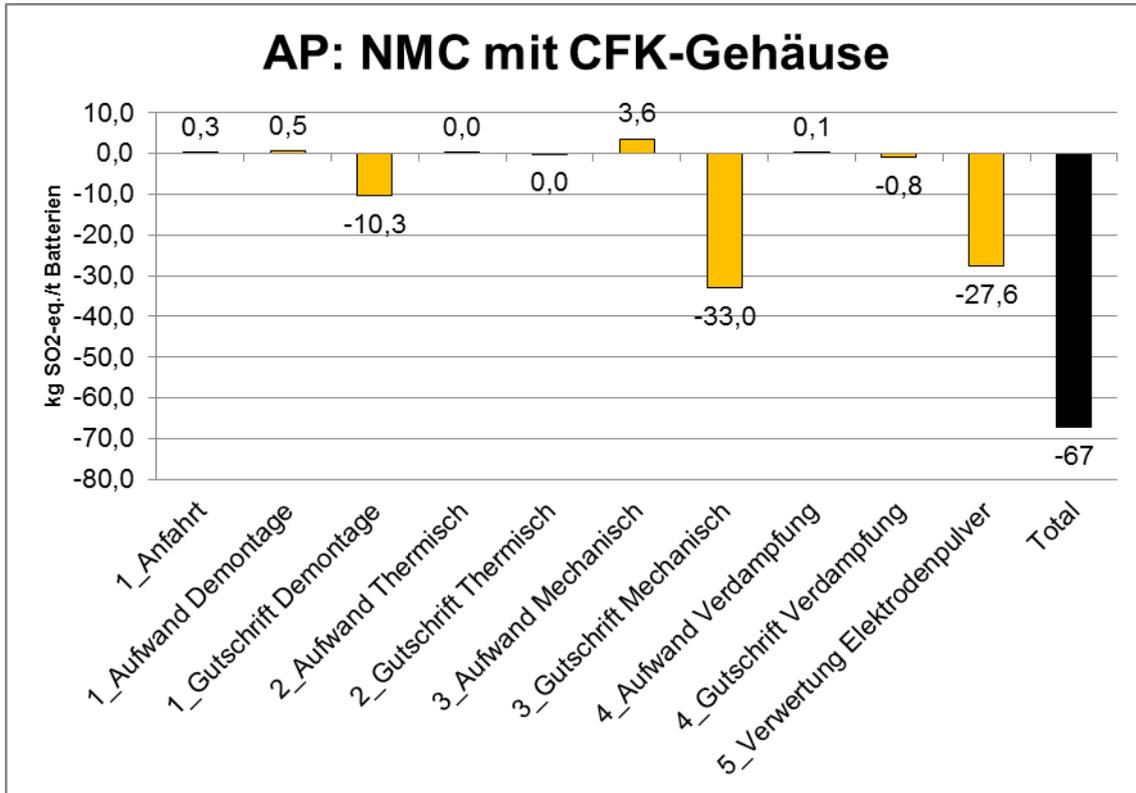


Abbildung 6-3: EP: NMC-Batterien mit CFK-Gehäuse

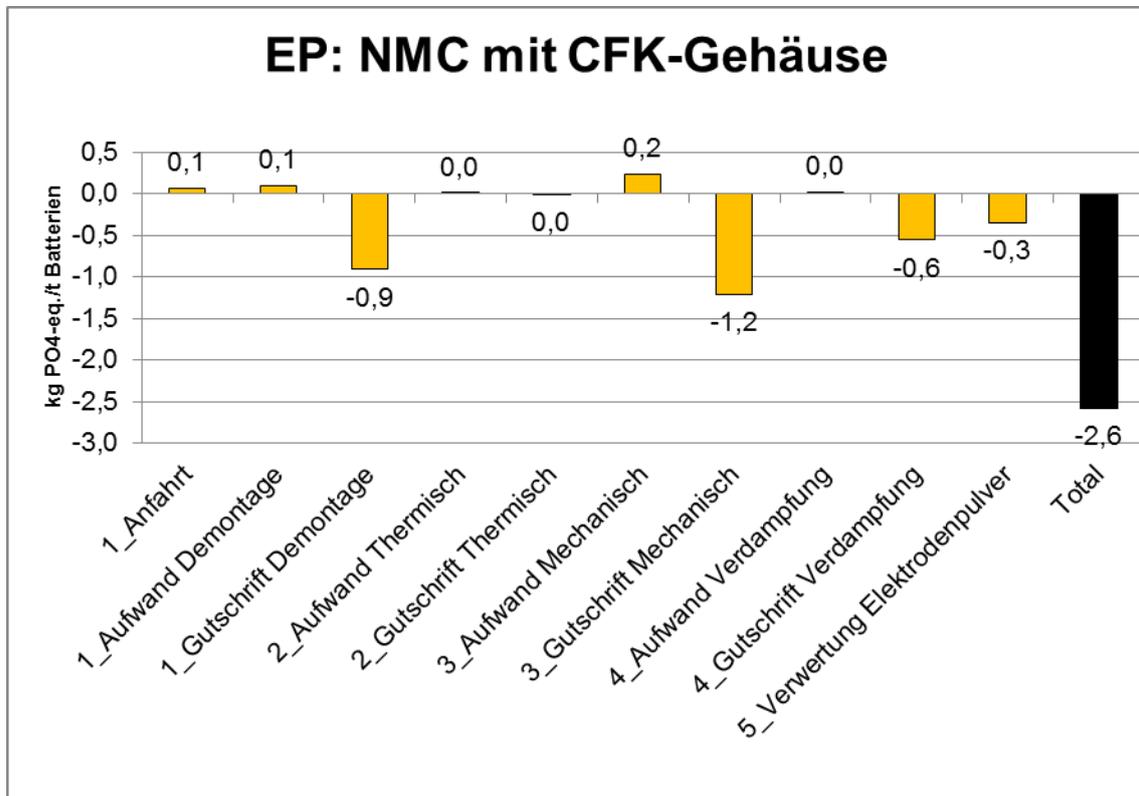


Abbildung 6-4: POCP: NMC-Batterien mit CFK -Gehäuse

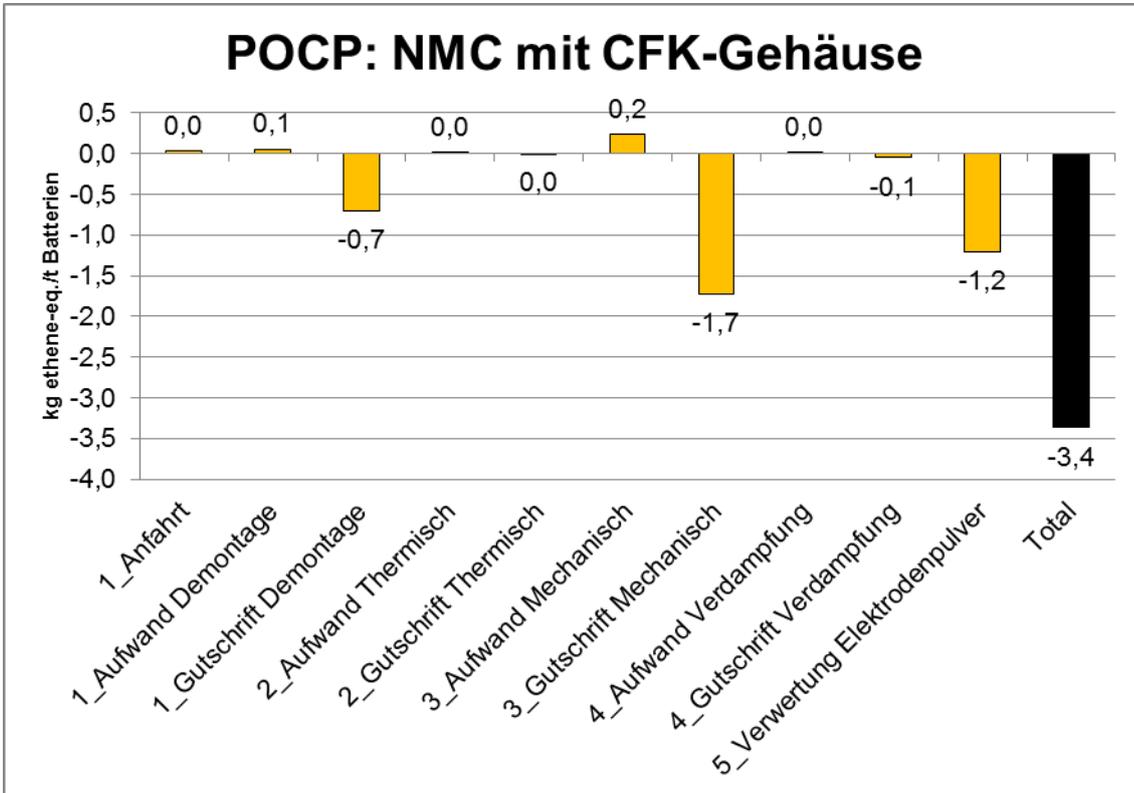


Abbildung 6-5: ADP, elem.: NMC-Batterien mit CFK -Gehäuse

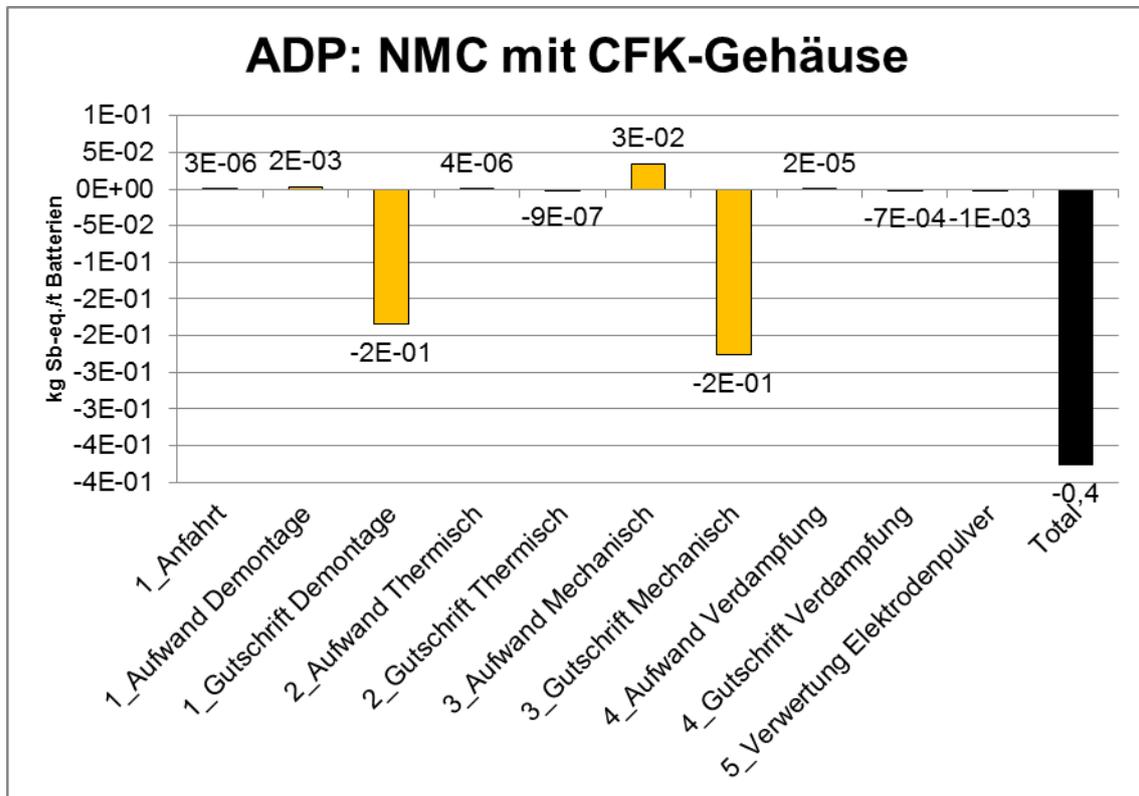
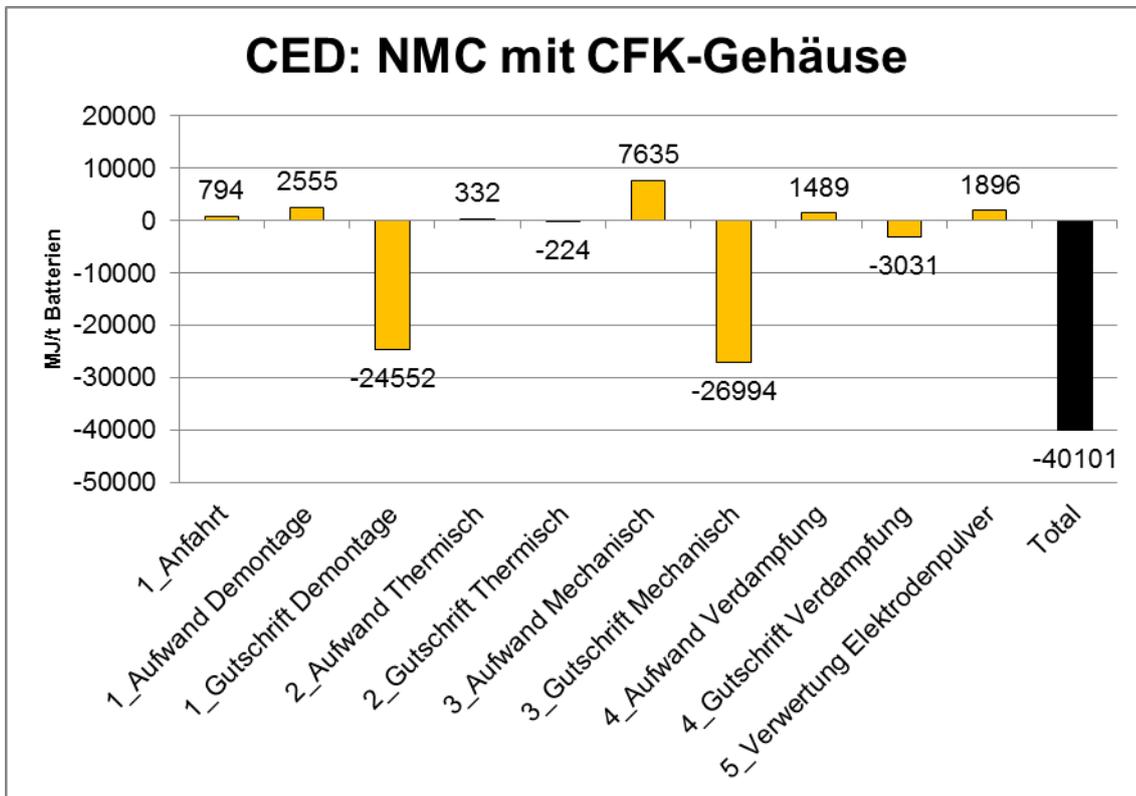


Abbildung 6-6: CED, total: NMC-Batterien mit CFK-Gehäuse



### 6.2.2.2. NMC-Batterien mit Edelstahlgehäuse

Im Wesentlichen findet hier aufgrund des erhöhten Edelstahlanteils und des niedrigeren Aluminiumanteils eine Verschiebung der Gutschriften vom Aluminium zum Edelstahl statt. Weiterhin ist der Anteil der Zellen am Gesamtgewicht deutlich niedriger, so dass sich die Lasten und Gutschriften jeweils geringer sind als im Basisszenario (vgl. Abbildung 6-7 bis Abbildung 6-12). Bei GWP, AP, POCP, ADP und CED ist eine Reduktion der Nettogutschrift um bis zu 25 % festzustellen, während die Nettogutschrift beim EP um rund 3 % höher ist.

Abbildung 6-7: GWP: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse

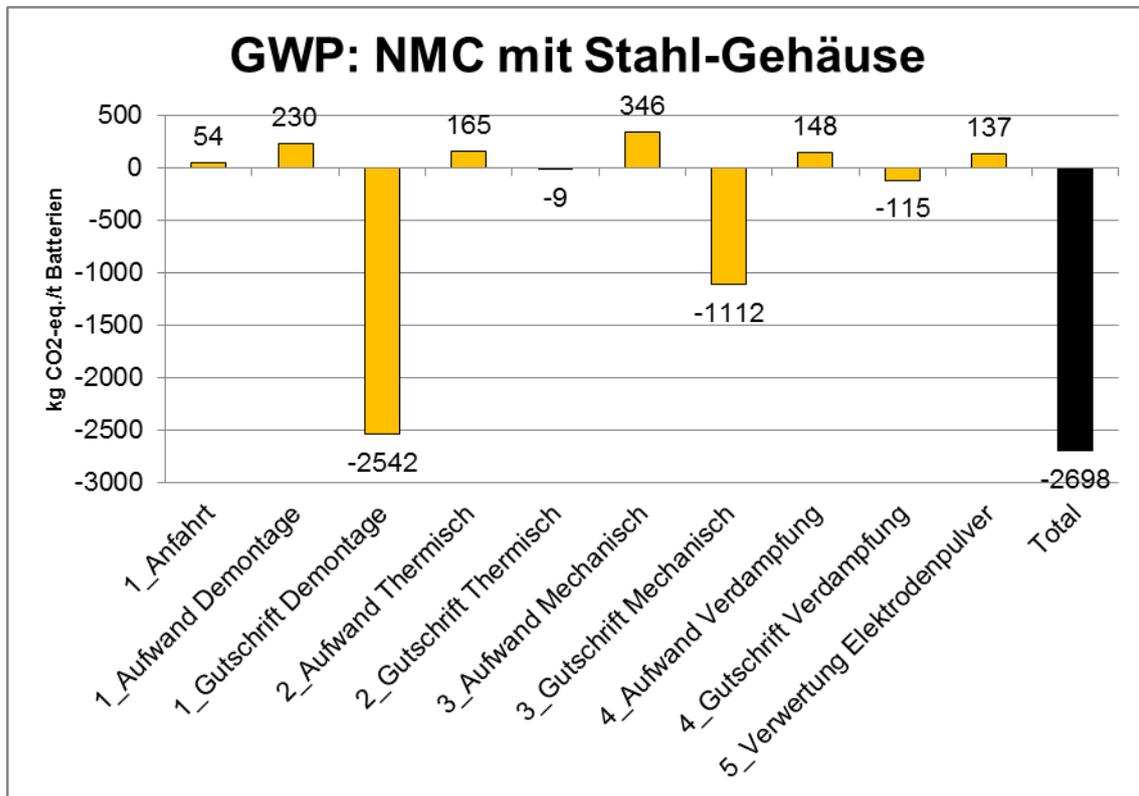


Abbildung 6-8: AP: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse

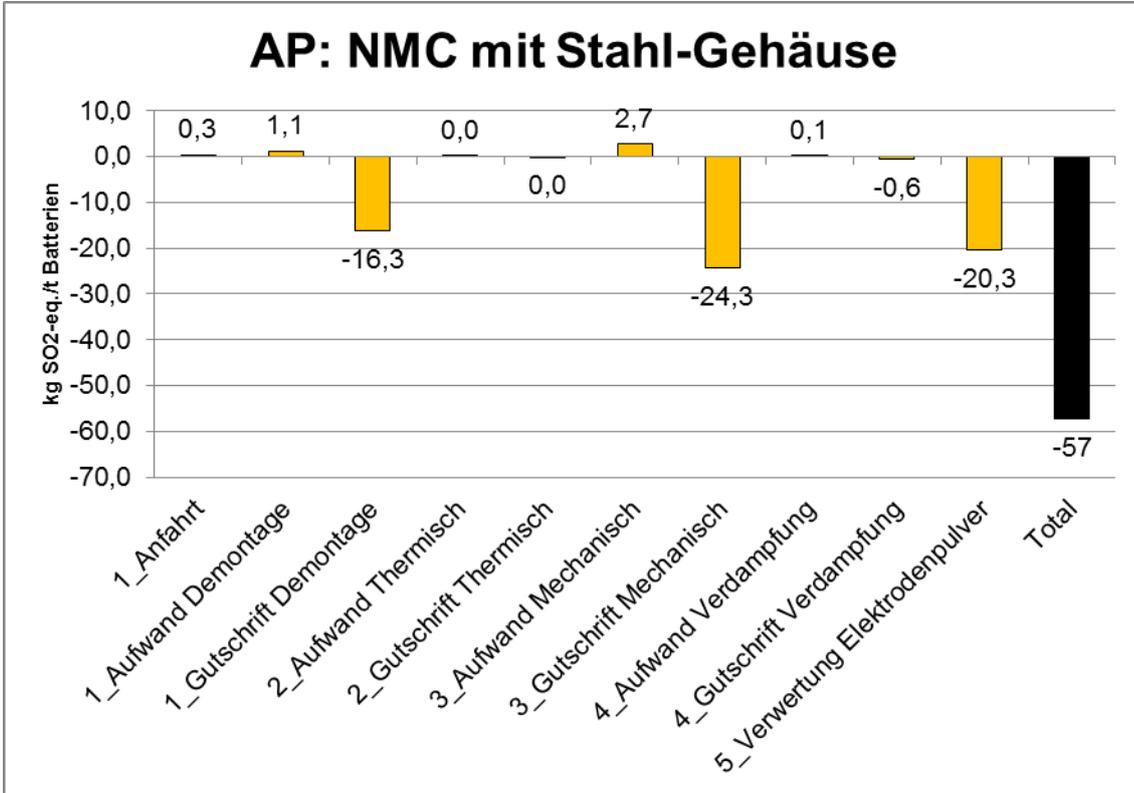


Abbildung 6-9: EP: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse

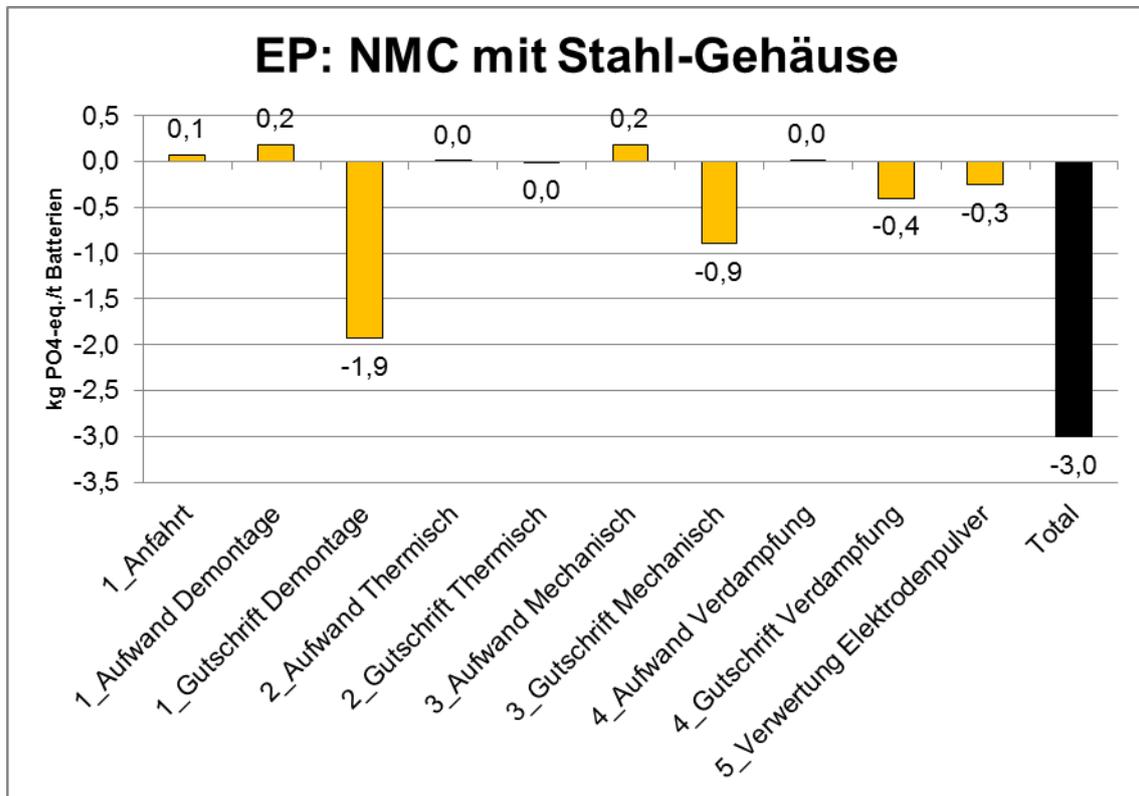


Abbildung 6-10: POCP: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse

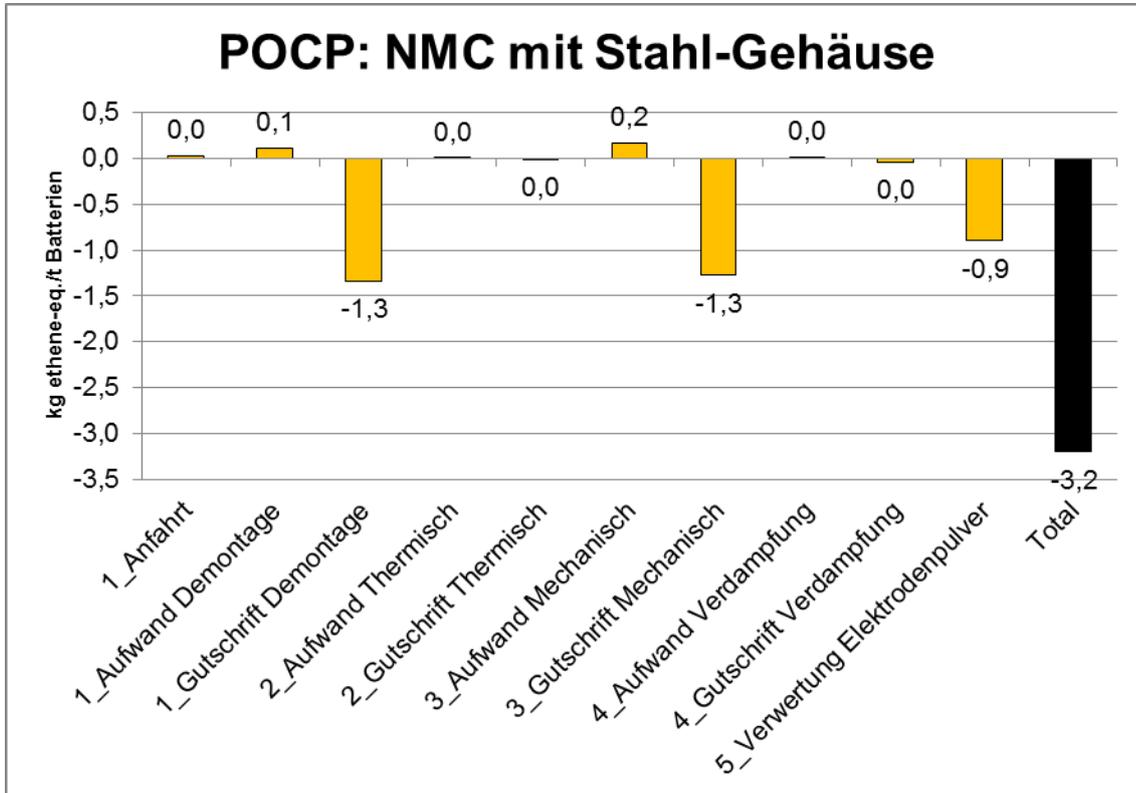


Abbildung 6-11: ADP, elem.: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse

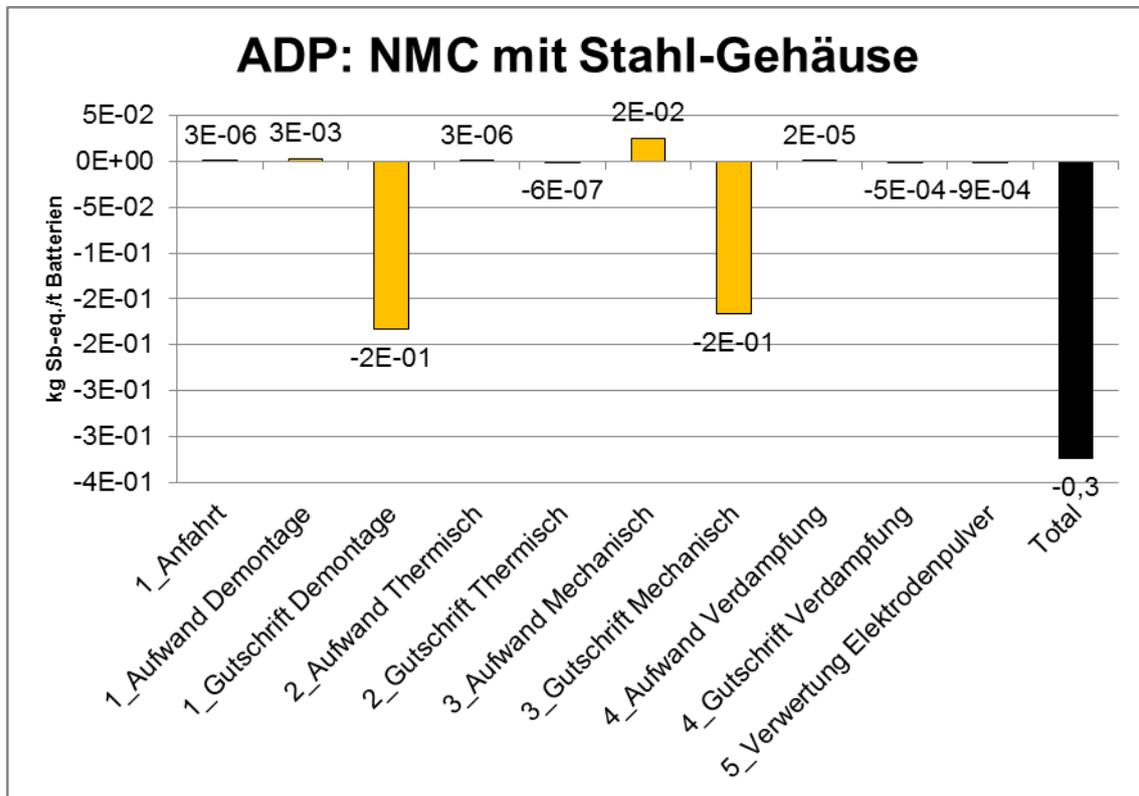
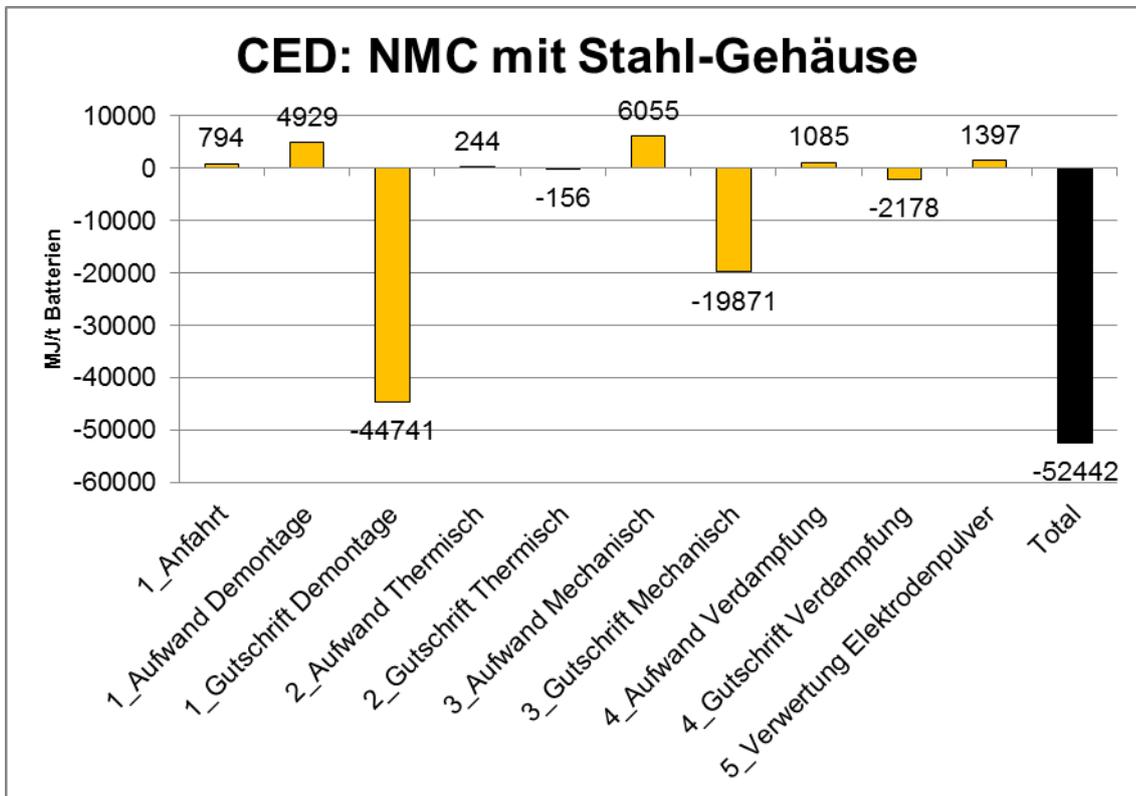


Abbildung 6-12: CED, total: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse



### 6.2.2.3. Vakuumverdampfung

In einer weiteren Sensitivität wird ein alternatives Verfahren der Lithium-Verdampfung untersucht. Statt der Schlepplgasverdampfung kann das metallische Lithium auch mittels einer Vakuumverdampfung abgetrennt werden. Hierbei wird zum einen mehr Lithium gewonnen, zum anderen wird auch das Mangan verdampft, so dass das verbleibende abgereicherte Elektrodenpulver, das in die Pyrometallurgie weitergeleitet wird, in deutlich geringeren Mengen anfällt. Die Lasten und Gutschriften aus den Schritten Demontage, Pyrolyse und mechanische Separation sind identisch wie im Basisszenario (vgl. Tabelle 6-4). Der Aufwand für die Vakuumverdampfung ist ähnlich wie der bei der Schlepplgasverdampfung, hingegen ist die Gutschrift aus dem Verdampfungsschritt durch die größere Lithiummenge höher. Die deutlichsten Unterschiede findet man bei der pyrometallurgischen Aufbereitung des Elektrodenmaterials aufgrund der geringeren Masse und des in Relation höheren Anteils an wertvollen Metallen (Cobalt und Nickel). Hier ist die Nettolast dieses Schrittes deutlich geringer als im Basisszenario. Insgesamt erhöht sich in allen Wirkungskategorien die Nettogutschrift um wenige Prozent.

**Tabelle 6-4: Vergleich Vakuumverdampfung vs. Schleppegasverdampfung (NMC-Batterien mit Al-Gehäuse)**

Wirkungs- kategorie	Schritt	Schleppegas- verdampfung	Vakuumver- dampfung
<b>GWP [kg CO2-eq.]</b>	1_Anfahrt	54	54
	1_Aufwand Demontage	192	192
	1_Gutschrift Demontage	-2666	-2666
	2_Aufwand Thermisch	211	211
	2_Gutschrift Thermisch	-11	-11
	3_Aufwand Mechanisch	418	418
	3_Gutschrift Mechanisch	-1427	-1427
	4_Aufwand Verdampfung	239	238
	4_Gutschrift Verdampfung	-185	-219
	5_Verwertung Elektrodenpulver	222	173
	<b>Total</b>	<b>-2954</b>	<b>-3037</b>
<b>AP [kg SO2-eq.]</b>	1_Anfahrt	0,3	0,3
	1_Aufwand Demontage	0,7	0,7
	1_Gutschrift Demontage	-16,6	-16,6
	2_Aufwand Thermisch	0,0	0,0
	2_Gutschrift Thermisch	0,0	0,0
	3_Aufwand Mechanisch	3,4	3,4
	3_Gutschrift Mechanisch	-31,2	-31,2
	4_Aufwand Verdampfung	0,2	0,2
	4_Gutschrift Verdampfung	-0,9	-1,1
	5_Verwertung Elektrodenpulver	-32,9	-33,0
	<b>Total</b>	<b>-77</b>	<b>-77</b>

<b>EP [kg PO4-eq.]</b>	1_Anfahrt	0,1	0,1
	1_Aufwand Demontage	0,1	0,1
	1_Gutschrift Demontage	-1,1	-1,1
	2_Aufwand Thermisch	0,0	0,0
	2_Gutschrift Thermisch	0,0	0,0
	3_Aufwand Mechanisch	0,2	0,2
	3_Gutschrift Mechanisch	-1,1	-1,1
	4_Aufwand Verdampfung	0,0	0,0
	4_Gutschrift Verdampfung	-0,6	-0,8
	5_Verwertung Elektrodenpulver	-0,4	-0,4
	<b>Total</b>	<b>-2,9</b>	<b>-3,0</b>
	<b>POCP [kg ethylene-eq.]</b>	1_Anfahrt	0,0
1_Aufwand Demontage		0,1	0,1
1_Gutschrift Demontage		-1,0	-1,0
2_Aufwand Thermisch		0,0	0,0
2_Gutschrift Thermisch		0,0	0,0
3_Aufwand Mechanisch		0,2	0,2
3_Gutschrift Mechanisch		-1,6	-1,6
4_Aufwand Verdampfung		0,0	0,0
4_Gutschrift Verdampfung		-0,1	-0,1
5_Verwertung Elektrodenpulver		-1,4	-1,5
<b>Total</b>		<b>-3,8</b>	<b>-3,9</b>
<b>ADP elem. [kg Sb-eq.]</b>		1_Anfahrt	3E-06
	1_Aufwand Demontage	2E-03	2E-03
	1_Gutschrift Demontage	-2E-01	-2E-01
	2_Aufwand Thermisch	4E-06	4E-06

	2_Gutschrift Thermisch	-8E-07	-8E-07
	3_Aufwand Mechanisch	3E-02	3E-02
	3_Gutschrift Mechanisch	-2E-01	-2E-01
	4_Aufwand Verdampfung	2E-05	2E-05
	4_Gutschrift Verdampfung	-8E-04	-9E-04
	5_Verwertung Elektrodenpulver	-1E-03	-2E-03
	<b>Total</b>	<b>-0,4</b>	<b>-0,4</b>
<b>CED total [MJ]</b>	1_Anfahrt	794	794
	1_Aufwand Demontage	3681	3681
	1_Gutschrift Demontage	-44993	-44993
	2_Aufwand Thermisch	313	313
	2_Gutschrift Thermisch	-189	-189
	3_Aufwand Mechanisch	7301	7301
	3_Gutschrift Mechanisch	-25488	-25488
	4_Aufwand Verdampfung	1757	1757
	4_Gutschrift Verdampfung	-3526	-4166
	5_Verwertung Elektrodenpulver	2261	1244
	<b>Total</b>	<b>-58089</b>	<b>-59746</b>

#### 6.2.2.4. Cobalt-Datensatz

Der verwendete Cobaltdatensatz aus ecoinvent 2.2 ist lediglich als Hilfsprozess gekennzeichnet, mit entsprechenden Abstrichen bei der Datenqualität und einer nur sehr kurzen Dokumentation. Der Datensatz für Primärkobalt in ecoinvent fußt auf dem entsprechendem Datensatz von Nickel mit einigen spezifischen Modifizierungen. Der Nickeldatensatz bildet die Primärnickelgewinnung (Nickel Class I) aus sulfidischen, auch kupferhaltigen Erzen ab. Es werden die fünf größten Nickelproduktionsrouten erfasst. Die Datenqualität wird für die Bereiche Abbau, Anreicherung, Metallurgie und Refining als „befriedigend“ bezeichnet.

Aktuelle Daten, die vom Cobalt-Institut angekündigt wurden, sind bisher nicht veröffentlicht worden, und konnten aus diesem Grund nicht für diese Studie verwendet werden.

Im Rahmen eines der Vorgängerprojekte (LithoRec I, siehe [Buchert et al. 2011b]) wurde bereits eine umfangreiche Sensitivität berechnet mit einem nicht-öffentlichen Datensatz von PE International (heute thinkstep). Die Verwendung des PE-Datensatzes würde in der vorliegenden Ökobilanz zu höheren Gutschriften aus der Cobalt-Verwertung führen. Da dadurch das Recycling tendenziell noch besser abschneiden würde, wurde hier als konservative Annahme ausschließlich der der ecoinvent-Datensatz verwendet.

### 6.2.3. Konsistenzprüfungen

In der Datengenese wird eine konsistente Vorgehensweise verfolgt. Die Datenabfrage erfolgt unter einheitlichen Bedingungen (konsistente Excel-Vorlage). Die erhaltenen Antworten weisen einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad auf. Das Projekt verbindet unterschiedliche Datenlieferanten mit unterschiedlichem Ansatz. So finden sich automatisierte Pilotanlagen (Industrie) bis zu manuellen Laborversuchen (frühes Forschungsstadium, Universität). Im Hinblick auf das Gesamtergebnis wird der Einfluss als gering eingeschätzt.

Im Forschungsverbund EcoBatRec ist der Materialfluss qualitativ gut verfolgbar, da Proben von einer Prozessstufe an die folgende geliefert werden. Alle Materialflüsse können so qualitativ nachverfolgt werden. Es wurden keine generischen Zwischenschritte modelliert, so dass ein konsistenter Zusammenhang hergestellt wurde. Dadurch kann ein konsistenter Datensatz qualitätsgesichert werden.

Für die Recyclingprozesse sichert die Gleichbehandlung der Gutschriften für recycelte Wertstoffe eine konsistente Methodik. So werden die Aufwände zur Konfektionierung und die Sekundärmaterialherstellung immer mit einer 100 %-Gutschrift des Primärprozesses gegengerechnet.

Die Datenqualität der Vorketten wird dagegen als sehr unterschiedlich bewertet. Die Daten, insbesondere der Primärgewinnung der Metalle, weisen unterschiedliche Detailtiefen aus. So stellt der Cobalt-Datensatz von ecoinvent eine grobe Abschätzung aus ähnlichen industriellen Prozessen dar, der als nur für einen Hilfsprozess geeignet charakterisiert wird. Diese Inkonsistenzen bei der Beschreibung der Primärförderung von Primärmetallen sind in der Quelle gekennzeichnet.

Eine Inkonsistenz ergibt sich auch aus dem vergleichsweise hohen Alter der Datensätze aus ecoinvent 2.2.

Die Charakterisierungsfaktoren für die Umweltwirkungen (GWP, AP,  $ADP_{elem.}$ , POCP und EP) sind einer einheitlichen Quelle entnommen [CML 2010].

### 6.3. Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen

Die Gesamtauswertung der Ökobilanzergebnisse für das Recycling des Batterietyps NMC ergibt für alle untersuchten Wirkungskategorien, d. h. Treibhausgasemissionen (GWP), Kumulierter Energieaufwand (CED total), Versauerungspotenzial (AP), Verbrauch an

abiotischen Ressourcen ( $ADP_{\text{elem.}}$ ), Eutrophierungspotenzial (EP) und Bildungspotenzial von Photooxidantien (POCP), z. T. deutliche Nettogutschriften. Nicht zuletzt die Ergebnisse bzgl. des Versauerungspotenzials und des Verbrauchs an abiotischen Ressourcen waren für ein Recyclingverfahren, welches primär auf die Gewinnung von Sekundärmetallen bzw. deren Verbindungen zielt, zu erwarten (Gutschriften bzgl. abiotischer Primärressourcen sowie Säurebildneremissionen aus der Erzaufbereitung). Die hohen Rückgewinnungsraten von batteriefähigen Kobalt- (98%), Nickel- (99%) und Manganverbindungen (99%) sowie metallischem Lithium (73%) tragen wesentlich zum guten Gesamtergebnis der Ökobilanz bei.

Die Ökobilanzergebnisse für das Recycling des Batterietyps LFP weisen in der Gesamtschau ähnliche Tendenzen aus. In allen untersuchten Wirkungskategorien werden über den gesamten Prozess Nettogutschriften erzielt. Unterschiede zeigen sich in den Detailergebnissen bei den einzelnen Prozessschritten. So ist beim GWP im Schritt Pyrometallurgische Aufbereitung die Gutschrift geringer, da nur Eisen, jedoch keine batteriefähigen Kobalt-, Nickel- und Manganverbindungen zurückgewonnen werden können (da in diesem Kathodentyp nicht enthalten). Andererseits sind die Lasten bzgl. GWP in diesem Modul ebenso geringer im Vergleich zum gleichen Modul für den NMC-Typ.

Positive Beiträge, d. h. deutliche Nettogutschriften, ergaben sich für alle untersuchten Wirkungskategorien aus dem ersten Schritt „Demontage“. Verantwortlich hierfür sind vor allem hohe Gutschriften für die Rückgewinnung von Wertstoffen wie z. B. Aluminium und Edelstahl aus dem Gehäuse, Kupfer aus diversen Komponenten und Edelmetalle aus dem Batteriemanagementsystem. Dies lässt eindeutig die Bewertung zu, dass eine sorgfältige Zerlegung der Batterien (vollständige Erfassung der entnommenen Komponenten für das Einbringen in Recyclingprozesse) essentiell für ein positives Gesamtergebnis des gesamten Recyclingprozesses sind. Die Zellmaterialien sind nicht zuletzt aufgrund ihrer wertvollen Metallverbindungen (Nickel-, Kobalt-, Lithiumverbindungen etc.) wichtig und interessant für die Recyclingwirtschaft und unter dem Gesichtspunkt der Ressourcenschonung. Die sonstigen Komponenten, die im 1. Schritt entnommen und in die Recyclingwirtschaft überführt werden, machen jedoch ungefähr die Hälfte des gesamten Batteriegewichts aus. Positiv ist hervorzuheben, dass die entsprechenden Recyclingverfahren (Edelstahlrecycling, Kupferrecycling, Aluminiumrecycling, Leiterplattenrecycling usw.) auf bereits bewährten und etablierten Infrastrukturen fußen und daher hier kein Entwicklungsaufwand notwendig ist.

### Sensitivitätsanalysen

Die Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen bzgl. alternativer Gehäusematerialien (Edelstahl bzw. kohlefaserverstärkte Kunststoffe) unterstützen den Befund der Relevanz des 1. Schrittes „Demontage“. Die Gutschriften für die Entnahme und das Recycling des Gehäusematerials fallen bei Edelstahl moderat und bei den kohlefaserverstärkten Kunststoffen deutlich geringer aus.

Die Sensitivitätsanalyse eines alternativen Lithium-Verdampfungsverfahrens (Vakuumverdampfung) zeigt eine etwas höhere Nettogutschrift bei der Verwendung des Vakuumverfahrens.

## Einschränkungen

Hier muss an dieser Stelle auf die Systemgrenzen der vorliegenden Ökobilanz hingewiesen werden. Es wird weder die Herstellung der Batterie (und damit die Herstellung der entsprechenden Batteriekomponenten mit ihren Vorketten) noch die Nutzungsphase der Batterie im entsprechenden Fahrzeug bilanziert. Gerade die Leichtbaumaterialien Aluminium und kohlefaserverstärkte Kunststoffe (hier für das gewichtsrelevante Batteriegehäuse) wären für eine Bilanzierung der Nutzungsphase im Vergleich zu einer Batterie mit Edelstahlgehäuse von Interesse. Aussagen hierzu können jedoch im Rahmen dieser Ökobilanz aufgrund der gesetzten Systemgrenzen nicht getroffen werden.

Die Ökobilanzergebnisse zum EcoBatRec-Recyclingverfahren müssen unter dem Vorbehalt bewertet werden, dass die Sachbilanzdaten teilweise auf Einzel- und Laborversuchen beruhen. Schließlich ist hervorzuheben, dass die Ergebnisse dieser Ökobilanz für das Batterierecycling nach dem EcoBatRec-Verfahren keinesfalls mit den Ökobilanzergebnissen anderer Batterierecyclingverfahren verglichen werden können. Es wurde in diesem Sinne keine vergleichende Ökobilanz durchgeführt. Weiterhin gelten alle Ergebnisse unter der Prämisse, dass die zu recycelnden Batterien keine Umweltlast tragen.

## Fazit und Empfehlungen

Unter den getroffenen Annahmen schneidet die untersuchte Gesamtkette des EcoBatRec-Recyclingverfahren bei alle Batterietypen in den untersuchten Wirkungskategorien vorteilhaft ab.

Die Ökobilanzergebnisse zum EcoBatRec-Recyclingverfahren müssen unter dem Vorbehalt bewertet werden, dass die Sachbilanzdaten auf Einzel- und Laborversuchen oder gar Modellrechnungen beruhen. Eine Realisierung des Gesamtprozesses im Rahmen einer Pilotanlage oder gar auf großtechnischer Eben steht noch aus. Hier könnten in einigen Modulen größere Lasten auftreten, auf der anderen Seite wären durchaus noch Minderungspotenziale zu erwarten.

Die vorliegende Bilanz bildet den Stand des Projekts im Herbst 2015 ab, eine Aktualisierung wird nach dem Bau und den ersten Testläufen einer Demonstrationsanlage bis Frühjahr 2016 erfolgen. Weitere LCA-Studien zur Validierung der Ergebnisse dieser Studie in einigen Jahren werden empfohlen, wenn das Recyclingverfahren nach EcoBatRec in die großtechnische Umsetzung gelangt ist.

## 7. Literatur

- Binnemans et al. 2013 Binnemans, K.; Blanpain, B.; Buchert, M.; Gerven, T.; Jones, T.; Walton, A.; Yongxian, Y., Recycling of rare earths: a critical review, *Journal of Cleaner Production*, Volume 51, 15 July 2013, Pages 1-22.
- Buchert et al. 2011a Buchert, M.; Jenseit, W.; Merz, C.; Schüler, D. Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LiBRi. Teilprojekt: LCA der Recyclingverfahren. Öko-Institut, Darmstadt, 2011
- Buchert et al. 2011b Buchert, M.; Jenseit, W.; Merz, C., Schüler, D.: Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec). Öko-Institut, Darmstadt, 2011
- CML 2001 Life cycle assessment. An operational guide to the ISO standard; Centre of Environmental Science (CML), Leiden University, 2001
- CML 2002 Oers, L. van, A. de Koning, J.B. Guinée & G. Huppes: Abiotic resource depletion in LCA – Improving characterization factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook. DWW report, 2002
- CML 2010 Database CML-IA v3.7, Institute of Environmental Sciences, Leiden University, Leiden, April 2010;  
<http://www.cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>
- Du/Graedel 2011 Du, X.; Graedel, T. E.: Uncovering the global life cycles of the rare earth elements.” *Nature Scientific Reports* 1 (2011): 145. DOI: 10.1038/srep00145
- ecoinvent v2.2 Ökobilanz-Datenbank ecoinvent v2.2; <http://www.ecoinvent.org>; integriert in GaBi v6.0
- EC 2013 European Commission (2013) Commission Recommendation on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of the products and organizations. Annex II: Product Environmental Footprint (PEF) Guide to Commission Recommendation on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of the products and organizations. Official Journal of the European Union Volume 56, L 124, 4.5.2013
- EC 2014 European Commission (2014): Environmental Footprint Pilot Guidance document, - Guidance for the implementation of the EU Product Environmental Footprint (PEF) during the Environmental Footprint (EF) pilot phase, v. 4.0, May 2014 GaBi v6.0 Ökobilanz-Software und Datenbank GaBi v6.0, PE Europe GmbH; <http://www.pe-europe.com>
- Goedkoop et al. 2009 Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., de Schryver, A., Struijs, J. & van Zelm, R., 2009. ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition. Report 1: characterisation.
- Goedkoop/Spriensma 1999 Goedkoop, M.; Spriensma, R.S., The Eco-indicator 99, a Damage oriented method for LCIA, Ministry VROM, the Hague 1999

- Guinée 1995 Guinée J.B.: *Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products: with a case study on margarines* (PhD thesis). 1995
- Guinée et al. 2001 Guinée J.B., de Bruijn H., van Duin R., Gorrée M., Heijungs R., Huijbregts M.A.J., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Sleeswijk A.W., Suh S., de Haes H.A.U.: *Life cycle assessment – an operational guide to the ISO standards, part 2b*. Centre of Environmental Science (CML), Leiden University, Leiden, 2001
- Guinée et al. 2002 Guinée J.B. (Ed.); Gorrée M.; Heijungs R.; Huppes G.; Kleijn R.; Wegener Sleeswijk A.; Udo de Haes H.A.; de Bruijn J.A.; van Duin R & Huijbregts M.A.J. (2002): *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (<http://www.leidenuniv.nl/cml/lca2/index.html>)
- Hauschild et al. 2008 Hauschild M., Huijbregts M., Jolliet O., Margni M., MacLeod M., van de Meent D., Rosenbaum R.K., McKone T. (2008): *Building a model based on scientific consensus for Life Cycle Impact: Assessment of Chemicals: the Search for Harmony and Parsimony*. *Environmental Science and Technology* 42(19), 7032-7036 (<http://dx.doi.org/10.1021/es703145t>).
- Hauschild/Wenzel 1998 Hauschild, M.Z. and Wenzel, H.: *Environmental assessment of products. Vol. 2 - Scientific background*, 565 pp. Chapman & Hall, United Kingdom, ISBN 0412 80810 2, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA. USA, 1998
- Humbert et al. 2012 Humbert, S.; De Schryver, A.; Bengoa, X.; Margni, M.; Jolliet, O. (2012): *IMPACT 2002+ User Guide: Draft for version Q2.21*, EPFL, Lausanne, Switzerland
- ILCD 2010 ILCD-Handbook: *General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance*; European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability; 1<sup>st</sup> Edition, 2010
- IPCC 2007 *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- IPCC 2013 *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA]
- ISO 2013 ISO/TS 14067:2013 *Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification and communication*. May 2013
- Klöpffer 2009 Klöpffer, W.; Grahl, B.: *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*; Wiley-VCH, Weinheim, 2009

- Lehmann 2015 Lehmann, A., Bach, V., Finkbeiner, M.: Product environmental footprint in policy and market decisions: Applicability and impact assessment. In: Integrated Environmental Assessment and Management 2015 Vol: 11 (3) :417-424. doi: 10.1002/ieam.1658
- Rosenbaum et al. 2008 Rosenbaum R.K., Bachmann T.K., Gold L.S., Huijbregts M.A.J., Jolliet O., Juraske R., Koehler A., Larsen H.F., MacLeod M., Margni M., McKone T.E., Payet J., Schuhmacher M., Van de Meent D., Hauschild M.Z. (2008): USEtox-The UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment. International Journal of Life Cycle Assessment 13(7) 532-546 (<http://dx.doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4>).
- Rosenbaum et al. 2011 Rosenbaum RK, Huijbregts MAJ, Henderson A, Margni M, McKone TE, Van de Meent D, Hauschild M, Shaked S, Li DS, Slone TH, Gold LS, Jolliet O (2011): USEtox human exposure and toxicity factors for comparative assessment of chemical emissions in Life Cycle Analysis: Sensitivity to key chemical properties. International Journal of Life Cycle Assessment Special issue USEtox, July 2011
- Rudnick/Gao 2003 Rudnick R. L.; Gao S.: Composition of the continental crust. In The Crust, vol. 3 (ed. R. L. Rudnick). Elsevier 2003
- Schmid 2006 Schmid, J. et al.: Gefährdungspotenzial durch Cyclopentan aus der Behandlung von VOC-Kühlgeräten. Im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg. 2006
- Schmitz 1999 Schmitz, S.; Paulini, I.: Bewertung in Ökobilanzen: Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043. Umweltbundesamt Texte, 92/99; 1999
- Schüler et al. 2011 Schüler, D.; Buchert, M.; Liu, R.; Dittrich, S.; Merz, C.: Study on Rare Earths and Their Recycling. Öko-Institut, Darmstadt, 2011.
- Siemens 2014 Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben – MORE. Siemens AG; Daimler AG; Öko-Institut e. V.; Umicore AG & Co KG; Vacuumschmelze GmbH; Universität Erlangen-Tübingen; TU Clausthal; Fraunhofer Gesellschaft, Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Förderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) über Forschungszentrum Jülich
- Steen 1999 Steen B. (1999) A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPS) Version 2000 - Models and Data of the Default Method CPM report 1999:5
- UBA 1995 Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen – Wirkungsbilanz und Bewertung. Umweltbundesamt; Gesellschaft für Consulting und Analytik im Umweltbereich (C.A.U.); ifeu. Umweltbundesamt Texte, 23/95. 1995
- UBA 2002 Ökobilanzen für Getränkeverpackungen II/Phase 2, ifeu. Umweltbundesamt Texte 51/02. Berlin 2002
- USGS 2010 Long, K.R., Van Gosen, B.S., Foley, N.K., and Cordier, Daniel, 2010, The principal rare earth elements deposits of the United States—A summary of domestic deposits and a global perspective: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5220, 96 S. Online unter <http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5220/>



## Annex 1: Verwendete generische Datensätze

Tabelle A-1: Für die Ökobilanz verwendete generische Datensätze

Schritt	Datensatz	Herkunft
Wertstoffrecycling	RER: L_Kupfer, sekundär, ab Raffinerie	ecoinvent v2.2
	EU-27: Aluminiumrecycling (2010)	GaBi v6.0,
	RER: L_Elektrostahl, un- und niedriglegiert, ab Werk	ecoinvent v2.2
	RER: G_Aluminium Massel Mix (2005) EAA	GaBi v6.0, invertiert
	RER: G_Blasstahl, Chromstahl 18/8, ab Werk	ecoinvent v2.2, invertiert
	RER: G_Kupfer, ab Regionallager	ecoinvent v2.2, invertiert
	RER: G_Polyamid 6 Granulat (PA 6) ELCD/PlasticsEurope	GaBi v6.0, invertiert
Leiterplattenrecycling	GLO: L_Entsorgung, Leiterplatten-Aufbereitung (modifiziert nach Analyse von Umicore/I+ME Actia)	ecoinvent v2.2
	SE: L_Gold, sekundär, ab Raffinierung	ecoinvent v2.2
	SE: L_Kupfer, sekundär, aus Elektroschrott, ab Raffinierung	ecoinvent v2.2
	SE: L_Nickel, sekundär, aus Elektroschrott, ab Raffinierung	ecoinvent v2.2
	SE: L_Silber sekundär, ab Raffinierung	ecoinvent v2.2

	GLO: G_Gold, aus Primärproduktion, ab Raffinerie	ecoinvent v2.2, invertiert
	GLO: G_Kupfer, primär, ab Raffinerie	ecoinvent v2.2, invertiert
	GLO: G_Nickel, 99.5%, ab Werk	ecoinvent v2.2, invertiert
	RER: G_Silber, ab Regionallager	ecoinvent v2.2, invertiert
Gutschriften für batteriefähige Komponenten	GLO: G_Cobalt, ab Werk	ecoinvent v2.2, invertiert
	GLO: G_Lithium, ab Werk	ecoinvent v2.2, invertiert
	GLO: G_Nickel, 99.5%, ab Werk	ecoinvent v2.2, invertiert
	DE: G_Schwefelsäure (96%) PE	GaBi v6.0, invertiert
	RER: G_Mangan, ab Regionallager	ecoinvent v2.2, invertiert
Energie	DE: Strom Mix ELCD/PE	GaBi v6.0
	DE: G-DE_Strom Mix ELCD/PE	GaBi v6.0, invertiert
	DE: Prozessdampf aus Erdgas ELCD/PE	GaBi v6.0
	DE: G-Prozessdampf aus Erdgas ELCD/PE	GaBi v6.0, invertiert
	GLO: Druckluft 7 bar (niedriger Stromverbrauch) PE	GaBi v6.0
Hilfsstoffe	RER: Verpackungsfolie, LDPE, ab Werk	ecoinvent v2.2
	RER: Wellkartonverpackung, gemischte Fasern, einwellig, ab Werk	ecoinvent v2.2

	RER: Polyvinylchlorid, ab Regionallager	ecoinvent v2.2
	RER: Wasser, entkarbonisiert, ab Werk	GaBi v6.0
Transport/Maschinen	GLO: LKW ELCD/PE-GaBi	GaBi v6.0
	DE: Diesel Mix, ab Raffinerie PE	GaBi v6.0

## **Annex 2: Externes kritisches Gutachten**

## **Kritische Prüfung der Studie**

### **ÖKOBILANZEN ZUM RECYCLINGVERFAHREN ECOBATREC FÜR LITHIUM-IONEN-BATTERIEN**

**Auftraggeber:** Öko-Institut e.V.  
Darmstadt  
mit Förderung durch das  
Bundesministerium für Bildung und Forschung,  
Berlin

**Prüfer:** Prof. Dr. Matthias Finkbeiner, Berlin

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

#### **Inhalt und Umfang der Kritischen Prüfung**

Der Prüfer und das Prüfungsverfahren sollen feststellen, ob:

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

Die Kritische Prüfung wurde gemäß Abschnitt 6.2 der ISO 14044 als Prüfung durch einen externen, unabhängigen Sachverständigen

vorgenommen, da diese Ökobilanz-Studie nicht als Grundlage für zur Veröffentlichung vorgesehene vergleichende Aussagen bestimmt ist. Dieser Prüfungsbericht gilt ausschließlich für den Abschlußbericht der Studie in der am 16.11.2015 vorgelegten Fassung.

Die Prüfung und Verifizierung einzelner Daten und Datensätze war nicht Teil des Untersuchungsumfanges.

## **Prüfungsverfahren**

Das Prüfungsverfahren wurde zwischen dem Öko-Institut als Ersteller der Ökobilanz und dem externen Sachverständigen koordiniert. Das Prüfungsverfahren fand parallel zur Durchführung der Ökobilanz statt. Das Auftakttreffen mit dem Öko-Institut und der sogenannten Umbrella-Gruppe mit wesentlichen Projektpartnern fand am 25. April 2013 in Darmstadt statt. Neben ersten Festlegungen zu Ziel und Untersuchungsrahmen wurden auch der Umfang und der Prozess der Kritischen Prüfung festgelegt. Das zweite Treffen wurde an gleicher Stelle und mit gleicher Beteiligung am 12. September 2014 durchgeführt. In diesem Treffen wurden vor allem die generische Zusammensetzung der Li-Ionen-Batterien sowie die Datensituation wichtiger Primärproduktionsketten diskutiert. Beim dritten Treffen am 06. Juli 2015 in Darmstadt wurden bereits erste, noch vorläufige Ergebnisse präsentiert und die finale Auswahl von Daten und methodischen Festlegungen der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung besprochen. Der externe Sachverständige konnte wegen der kurzfristigen, unwetterbedingten Sperrung der Bahnstrecke nicht persönlich an dieser Sitzung teilnehmen, wurde aber über die Ergebnisse im Nachgang informiert.

In allen Besprechungen hat der externe Sachverständige zu den vorgestellten Zwischenergebnissen Stellung genommen, verschiedene Hinweise bezüglich der Normkonformität der Studie und Empfehlungen für den weiteren Verlauf der Studie gegeben.

Die formale Prüfung auf Normkonformität begann nach Vorlage des ersten Entwurfes des Abschlußberichtes der Studie am 20. Oktober 2015. Der Sachverständige hat den Bericht umfassend analysiert und auf Normkonformität geprüft. Die Prüfung ergab insgesamt 40 Hinweise genereller, technischer und redaktioneller Art, die dem Auftraggeber am 02. November 2015 übermittelt wurden. Der zweite, überarbeitete Entwurf des Abschlußberichtes wurde dem Prüfer am 11. November 2015 übermittelt. Die Prüfung des zweiten Entwurfes ergab, dass die Prüfhinweise konstruktiv und umfassend berücksichtigt wurden. Es verblieben nur noch wenige offene Punkte oder Rückfragen, die in Form von drei weiteren Kommentaren am 14. November 2015 an den Auftraggeber übermittelt wurden. Die finale Version des Abschlußberichtes wurde dem Prüfer am 16. November 2015

übermittelt. Die Umsetzung der vereinbarten Maßnahmen und der Kommentare wurde geprüft, es waren keine weiteren Hinweise oder Maßnahmen notwendig.

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

### **Bewertung**

Die Ökobilanz dient zur projektbegleitenden Bewertung des Recyclingverfahrens des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderten Projektes „Demonstrationsanlage für ein kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Li-Ion Batterien (EcoBatRec)“, das unter der Koordination der Accurec Recycling GmbH mit dem Verbundpartner RWTH Aachen durchgeführt wurde. Den beteiligten Verbundpartnern sollen damit zeitnah die ökologischen Vorteile und Schwachstellen aufgezeigt werden.

Die funktionelle Einheit und der Referenzfluss für die Ökobilanzen des LithoRec-Verfahrens ist das Recycling von 1000 kg Batterien entsprechend des Typs NMC (Nickel/Mangan/Kobalt) bzw. des Typs LFP (Lithiumeisenphosphat). Dies zeigt, dass die Systemgrenze so gewählt wurde, dass die primäre Herstellung und auch die Nutzung der Batterien nicht analysiert werden, sondern der Fokus auf dem Recycling liegt. Die erhaltenen Netto-Gutschriften beziehen sich also nur auf die End-of-Life-Phase unter der Annahme, dass die Batterien lastenfrei eingehen. Deshalb wird auch einschränkend in der Studie ausgeführt, dass die Ergebnisse nicht mit den Ökobilanzen anderer Batterierecyclingverfahren verglichen werden können. Es wird transparent darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse unter dem Vorbehalt bewertet werden müssen, dass die Sachbilanzdaten auf nicht serienreifen Einzel- und Laborversuchen beruhen.

### **Ergebnis**

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



Matthias Finkbeiner  
17. November 2015