

Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien

Berlin, Darmstadt,
10.11.2015

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
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
1. Zusammenfassung	5
2. Hintergrund der Studie und Aufbau des Berichts	7
3. Ziele und Untersuchungsrahmen	8
3.1. Ziele und Anwendungen der Studie	8
3.2. Festlegung des Untersuchungsrahmens	9
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	12
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
4. Sachbilanz	19
4.1. Prozessbeschreibung	19
4.2. Datengrundlage	20
4.2.1. Spezifische Daten	20
4.2.2. Generische Datensätze	25
4.2.3. Modellierung der Transporte	26
4.2.4. Normierung	27
4.2.5. Modellierung der Gutschriften	27
4.3. Einschätzung der Datenqualität	30
5. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	31
5.1. NMC-Batterien mit Aluminium-Gehäuse	32
5.1.1. Treihauspotenzial (GWP)	32

5.1.2.	Versauerungspotenzial (AP)	33
5.1.3.	Das Versauerungspotenzial zu 91% von SO ₂ und zu 6% von NO _x bestimmt.Eutrophierungspotenzial (EP)	34
5.1.4.	Das Eutrophierungspotenzial zu 53% von NO _x , zu 4% von Phosphat und zu 12% von Ammoniak bestimmt.Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)	35
5.1.5.	Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP elem.)	36
5.1.6.	Kumulierter Energieaufwand (CED total)	37
5.1.7.	Normierte Darstellung	38
5.2.	LFP-Batterien	39
5.2.1.	Treibhauspotenzial (GWP)	39
5.2.2.	Versauerungspotenzial (AP)	40
5.2.3.	Eutrophierungspotenzial (EP)	41
5.2.4.	Photochemisches Ozonbildungspotenzial (POCP)	42
5.2.5.	Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP, elem)	43
5.2.6.	Primärenergieverbrauch, gesamt (CED, total)	44
5.2.7.	Normierte Darstellung	45
6.	Auswertung	46
6.1.	Identifizierung der signifikanten Parameter	46
6.2.	Beurteilung	48
6.2.1.	Vollständigkeitsprüfung	49
6.2.2.	Sensitivitätsprüfung	49
6.2.2.1.	NMC-Batterien mit CFK-Gehäuse	49
6.2.2.2.	NMC-Batterien mit Edelstahlgehäuse	57
6.2.2.3.	NMC-Batterien mit klassischer Zusammensetzung	63
6.2.2.4.	Cobalt-Datensatz	70
6.2.3.	Konsistenzprüfungen	71
6.3.	Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen	71
7.	Literatur	74
	Annex 1: Verwendete generische Datensätze	77
	Annex 2: Externes kritisches Gutachten	80

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Systemgrenze des LithoRec II-Prozesses, FU: Recycling von 1000 kg EoL-Batterien	11
Abbildung 5-1:	GWP: NMC Batterien mit Al-Gehäuse	32
Abbildung 5-2:	AP: NMC Batterien mit Al-Gehäuse	33
Abbildung 5-3:	EP: NMC Batterien mit Al-Gehäuse	34
Abbildung 5-4:	POCP: NMC Batterien mit Al-Gehäuse	35
Abbildung 5-5:	ADP, elem.: NMC Batterien mit Al-Gehäuse	36
Abbildung 5-6:	CED, total: NMC Batterien mit Al-Gehäuse	37
Abbildung 5-7:	Normierte Emissionen: NMC-Batterien mit Al-Gehäuse	38
Abbildung 5-8:	GWP: LFP-Batterien	40
Abbildung 5-9:	AP: LFP-Batterien	41
Abbildung 5-10:	EP: LFP-Batterien	42
Abbildung 5-11:	POCP: LFP-Batterien	43
Abbildung 5-12:	ADP, elem.: LFP-Batterien	44
Abbildung 5-13:	CED, total: LFP-Batterien	45
Abbildung 5-14:	Normierte Emissionen: LFP-Batterien	46
Abbildung 6-1:	GWP: NMC-Batterien mit CFK-Gehäuse	52
Abbildung 6-2:	AP: NMC Batterien mit CFK-Gehäuse	53
Abbildung 6-3:	EP: NMC-Batterien mit CFK-Gehäuse	54
Abbildung 6-4:	POCP: NMC-Batterien mit CFK -Gehäuse	55
Abbildung 6-5:	ADP, elem.: NMC-Batterien mit CFK -Gehäuse	56
Abbildung 6-6:	CED, total: NMC-Batterien mit CFK-Gehäuse	57
Abbildung 6-7:	GWP: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse	58
Abbildung 6-8:	AP: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse	59
Abbildung 6-9:	EP: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse	60
Abbildung 6-10:	POCP: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse	61
Abbildung 6-11:	ADP, elem.: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse	62
Abbildung 6-12:	CED, total: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse	63
Abbildung 6-13:	GWP: NMC Batterien, klassisch mit Al-Gehäuse	65
Abbildung 6-14:	AP: NMC Batterien, klassisch mit Al-Gehäuse	66
Abbildung 6-15:	EP: NMC Batterien, klassisch mit Al-Gehäuse	67
Abbildung 6-16:	POCP: NMC Batterien, klassisch mit Al-Gehäuse	68
Abbildung 6-17:	ADP, elem.: NMC Batterien, klassisch mit Al-Gehäuse	69
Abbildung 6-18:	CED, total: NMC Batterien, klassisch mit Al-Gehäuse	70

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Charakterisierungsfaktoren für den ADP_{elem}	17
Tabelle 4-1:	Generische Zusammensetzung NMC-Batterien	22
Tabelle 4-2:	Generische Zusammensetzung LFP-Batterien	23
Tabelle 4-3:	Herkunft der prozessspezifischen Daten	24
Tabelle 4-4:	Annahmen bei der Modellierung der Transporte	26
Tabelle 4-5:	Verwendete Normierungsfaktoren	27
Tabelle 4-6:	Gegenüberstellung der rezyklierten Materialien, des angelasteten Recyclingprozesses sowie der für das Recyclingmaterial erteilten Gutschrift	29
Tabelle 6-1:	NMC-Batterien mit Al-Gehäuse: Einfluss der Recyclingstufen auf die Ergebnisse der Wirkungskategorien (getrennt nach Gut- und Lastschrift)	47
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)	50
Tabelle 6-4:	Gehalt an Co, Ni, Mn an Gesamtbatterie	64
Tabelle A-1:	Für die Ökobilanz verwendete generische Datensätze	77

1. Zusammenfassung

Hintergrund der Studie

Das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderte Projekt „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec II) wurde zwischen Sommer 2012 und Herbst 2015 unter der Koordination der Rockwood Lithium GmbH mit den Verbundpartnern Audi AG, Electrocycling GmbH, H. C. Starck GmbH, Hosokawa Alpine AG, I+ME ACTIA GmbH, Solvay Fluor GmbH, Volkswagen AG, Universität Münster und der TU Braunschweig durchgeführt.

Die Eigendarstellung von LithoRec II findet sich unter:

<http://www.lithorec2.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 LithoRec II-Projektes.

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 LithoRec II-Recyclingverfahrens umfassen die folgenden Module:

- Entladung und Zerlegung der Batteriesysteme bis auf Zellebene
- Zellzerlegung und Separation des Aktivmaterials
- hydrometallurgische Aufbereitung.

Die funktionelle Einheit und der Referenzfluss für die Ökobilanzen des LithoRec II-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 eigentliche hydrometallurgische Aufbereitung des Aktivmaterials führt zumeist ebenfalls zu Nettogutschriften, 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-, Nickel- und Manganverbindungen sowie Lithiumhydroxid aus dem Recycling des Aktivmaterials tragen wesentlich zum guten Gesamtergebnis der Ökobilanz bei.

Die Ökobilanzergebnisse für das Recycling des Batterietyps LFP weisen in der Gesamtschau ähnliche Tendenzen aus. Zu diesem Ergebnis tragen aber fast nur die Schritte der Batterie-, Modul- und Zellerlegung bei. Die eigentliche hydrometallurgische 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 Hydrometallurgische Aufbereitung die Gutschrift geringer, da nur Lithiumhydroxid, 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 „Entladung und 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 Entladung und 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 „Entladung und Demontage“. Die Gutschriften für die Entnahme und das Recycling des Gehäusematerials fallen bei Edelstahl moderat und bei den kohlefaserverstärkten Kunststoffen deutlich geringer aus.

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 LithoRec II-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 LithoRec II-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 LithoRec II-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 LithoRec II 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 Automobilsektor (hier nach dem Weg des LithoRec II-Projektes) angelegt. Das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderte Projekt „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec II) ist eines von zwei parallelen BMUB-Projekten, die die Entwicklung von Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Traktionsbatterien zum Gegenstand haben.

Das Projekt LithoRec II wurde zwischen Sommer 2012 und Herbst 2014 unter der Koordination der Rockwood Lithium GmbH mit den Verbundpartnern Audi AG, Electro Cycling GmbH, H. C. Starck GmbH, Hosokawa Alpine AG, I+ME ACTIA GmbH, Solvay Fluor GmbH, Volkswagen AG, Universität Münster und der TU Braunschweig durchgeführt. Assoziierte Partner waren Bosch Rexroth, KUKA Roboter GmbH, Adam Opel AG und Lion Engineering

Die Eigendarstellung von LithoRec II findet sich unter:

<http://www.lithorec2.de/>

Im Vorgängerprojekt LithoRec I wurde zwischen Sommer 2009 und Herbst 2011 eine Prozesskette für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien im Labormaßstab erarbeitet und dieser auf der Basis einer fundierten Lebenszyklusanalyse (LCA) eine ökologische und ökonomische Vorteilhaftigkeit attestiert. Im Juli 2012 wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit das LithoRec II-Forschungsprojekt zur Förderung ausgewählt, um das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen im Pilotmaßstab darzustellen. Das Projekt gliedert sich funktional in die drei Teile Forschung (Entwicklung und grundlegende Verbesserungen der Verfahren),

Pilotierung (Scale up in einen Technikumsmaßstab, um Batterien unter industrie-ähnlichen Bedingungen zu verarbeiten) und einen projektübergreifenden Teil (Bewertung der Verfahren unter ökologischen und ökonomischen Aspekten sowie Projektmanagement). Mitte 2014 sollte die komplette Recyclingkette im Pilotmaßstab aufgebaut sein und signifikante Mengen an EV-Batterien recyceln. 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.

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 LithoRec II-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 LithoRec II-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 LithoRec II entwickelten Recyclingverfahrens ist durch das Recycling von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien aus dem Automobilbereich definiert, wobei die Rückgewinnung von Metallverbindungen (Kobalt-,

Nickel-, Mangan- und Lithiumverbindungen) 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 LithoRec II-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 LithoRec II 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 LithoRec II-Projektes selbst. Für die LithoRec II-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 LithoRec II entwickelten Recyclingverfahrens ist durch das Recycling von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien aus dem Automobilbereich definiert, wobei die Rückgewinnung von Metallverbindungen (Kobalt-, Nickel-, Mangan- und Lithiumverbindungen) in batteriefähiger Qualität für die Elektrodenherstellung im Vordergrund steht. Aufgrund der komplexen Zusammensetzung der Lithium-Ionen-Traktions-batterien 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 LithoRec 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 LithoRec II-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 LithoRec-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

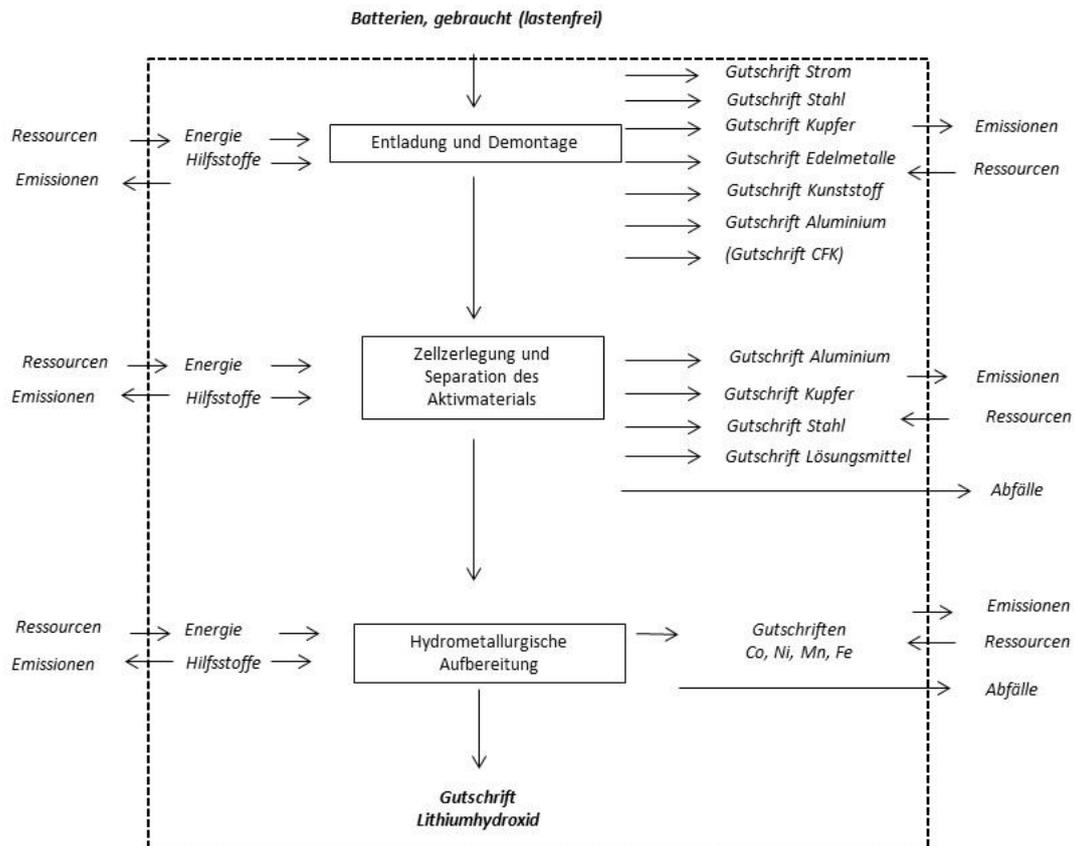
Die Systemgrenzen für die Bilanzierung des LithoRec II-Recyclingverfahrens umfassen die folgenden Module:

- Entladung und Zerlegung der Batteriesysteme bis auf Zellebene,
- Zellzerlegung und Kathodenseparation,
- hydrometallurgische Aufbereitung.

Metallverbindungen in batteriefähiger Qualität verlassen das Modul „Hydrometallurgische Aufbereitung“ als Output und können genau wie Einsatzstoffe aus der Primärherstellung weiterverarbeitet werden. Daher konnte die Systemgrenze (Bilanzgrenze) nach der hydrometallurgischen Aufbereitung gesetzt werden. Die Prozessschritte des LithoRec-

Verfahrens und die Systemgrenze der vorliegenden Ökobilanz sind in Abbildung 3-1 dargestellt.

Abbildung 3-1: Systemgrenze des LithoRec II-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 LithoRec II-Projektpartnern, welche für das Arbeitspaket 3 verantwortlich sind, 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. (z. B. anorganische Chemikalien) 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 eingeeengten 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.

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 Industriebene 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), Treibhaus-potenzial (GWP), Eutrophierung (EP), Versauerung (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. BEco-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“¹ dieser Ressource ($ADP_{elem.,ur}$). Bezogen wird auf Antimonäquivalente.

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

¹ Weitestgehende Definition von Reserve.

Tabelle 3-1: Charakterisierungsfaktoren für den ADP_{elem}

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 CO₂-Äquivalenten wird allgemein anerkannt. Mit dem Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) besteht zudem ein internationales Fachgremium, das sowohl die Methode als auch die entsprechenden Kennzahlen für klimawirksame Substanzen errechnet und fortschreibt. Bei der Berechnung von CO₂-Äquivalenten 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 CO₂-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_x-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 Recyclingverfahren nicht intendiertes Ziel der vorliegenden Ökobilanzstudie ist. Die Arbeiten zur Ökobilanz wurden durch einen unabhängigen, externen Critical Reviewer (Prof. Dr. Finkbeiner), der auf einschlägige und umfassende Kenntnisse und Erfahrungen der methodischen Anforderungen an Ökobilanzen und deren Weiterentwicklung verweisen kann, begleitet und mit Empfehlungen unterstützt. 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 des LCA-Li-Bat-Recycling-Projekts 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 LithoRec II-Verfahren gliedert sich in drei Hauptprozessschritte:

- Batterie- und Modulzerlegung
- Zellerlegung und Separation des Aktivmaterials
- hydrometallurgische Aufbereitung des Aktivmaterials

Batterie- und Modulzerlegung

Im Schritt der Batterie- und Modulzerlegung werden die Batterien zunächst tiefentladen und dann mithilfe von Akkuschraubern 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. Aus Sicherheitsgründen ist in diesem Schritt eine Entlüftung vorzusehen, falls sich defekte Zellen in den Batterien befinden. Weiterer Energiebedarf resultiert für den Transport der Batterien auf Gabelstaplern, sowie für das Dismantling selbst (Akkuschrauber).

Zellerlegung und Separation des Aktivmaterials

Die Zellen werden zunächst vorzerkleinert. Das zerkleinerte Material wird anschließend einer Extraktion mit DMC unterzogen, hierbei werden Lösungsmittel und ein Großteil der fluorhaltigen Verbindungen abgetrennt. Das feuchte Raffinat wird in einem Drehrohrofen getrocknet. Mittels Schwerteilabscheider werden weitere Aluminium- und Stahlbestandteile abgetrennt. Nach einer Feinzerkleinerung wird das Material in einem Zick-Zack-Sichter in leichtere und schwerere Bestandteile getrennt. Das Sinkgut, das im Wesentlichen aus Kupfer und Aluminium sowie kleineren Verunreinigungen besteht, wird verkugelt und dann in einen Kupfer- und einen Aluminiumstrom getrennt, die den entsprechenden Recyclingsystem zugeführt werden. Das Steiggut aus dem Zick-Zack-Sichter wird gesiebt, wobei der Separator abgetrennt wird, und anschließend werden die verbliebenen fluorhaltigen Verbindungen mit Wasser extrahiert. Das Aktivmaterial, das kaum noch Fluor enthält, gelangt nun zur hydrometallurgischen Aufarbeitung. Der Separator wird entsorgt. Die lösemittelhaltigen Ströme aus der Vorzerkleinerung, den Extraktionsschritten und der Trocknung werden in verschiedenen Schritten aufgearbeitet und in die einzelnen Lösungsmittel aufgetrennt. Bei der Aufarbeitung der Lösungsmittel wird angenommen, dass es nicht zu Emissionen in Luft oder Abwasser kommt. Eine genauere Analyse hierzu mit gemessenen Emissionsdaten wird nach dem Bau und den ersten Testläufen einer Demonstrationsanlage bis Frühjahr 2016 in einem Update dieser Ökobilanz erfolgen.

Hydrometallurgische Aufbereitung des Aktivmaterials

In der hydrometallurgischen Aufbereitung werden die Aktivmaterialien aus der Beschichtung als batteriefähige Materialien zurückgewonnen. Der Prozess ist dabei vom Kathodentyp abhängig. Zunächst werden andere Bestandteile der Beschichtung (z. B. Leitrüß, Eisen und Phosphat bei der LFP-Kathode) abgetrennt. Bei der NMC-Kathode folgt dann die Abtrennung von Kobalt, Nickel und Mangan in einer Sulfatlösung, in der die drei Metalle gemischt (fast im stöchiometrischen Verhältnis) vorliegen. Das Lithium wird (bei beiden Kathodentypen) in weiteren Schritten aufgereinigt und als Lithiumhydroxid gewonnen. Der Prozess benötigt Hilfsstoffe und Energie.

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

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

Bei der in dieser Studie betrachteten Pilotanlage für die Batterie- und Modulzerlegung wird die in den Batterien enthaltene Restenergie teilweise als Strom zurückgewonnen und in das Netz eingespeist.

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
Batterie- und Modulzerlegung	TU Braunschweig, Electrocycling	Labormaßstab
Zellzerlegung und Separation der Aktivmasse(manuell)	TU Braunschweig	Labormaßstab
Hydrometallurgische Aufbereitung	Rockwood Lithium	Labormaßstab

4.2.2. Generische Datensätze

Eine Übersicht über die verwendeten generischen Datensätze gibt Annex 1.

Aufgrund des Wunsches von Projektteilnehmern wurde wie im Vorgängerprojekt LithoRec als Bilanzierungswerkzeug die Bilanzierungssoftware „GaBi“ eingesetzt, um Projektergebnisse auch „in-house“ weiterverwenden zu können. Diese Vorgehensweise hat aus pragmatischen Gründen zu folgender Auswahl der Literaturdatensätze 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, der entladenen Zellen und der Legierung 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 Vorgängerprojekt LithoRec 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 ² /500 ³	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 müssen (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 Demonstrationsanlage bis Frühjahr 2016 in einem Update der Ökobilanz erfolgen.

² Für Aluminium und Edelstahl

³ Für Kupfer, BMS, Kunststoff (PA 6)

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 Sondermüllverbrennung 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 angenommenerweise 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.

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_{elem.} 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

Wirkungskategorie	GWP	ADP _{elem.}	AP	EP	POCP
Einheit	kg-CO ₂ -eq/a	kg-Sb-eq/a	kg-SO ₂ -eq/a	kg-PO ₄ -eq/a	kg-C ₂ H ₂ -eq/a
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 wird in drei Schritten vollzogen. Im ersten Schritt wird die Batterie in Gehäuse, Elektronik und Zellen (Dismantling) zerlegt. Im zweiten Schritt werden

die Zellen in ihre Inhalte separiert (Zellzerlegung) und im dritten die Zellmaterialien aufbereitet (Kathodenseparation, hydrometallurgische Aufbereitung).

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 Projektes	Primärgewinnung: Kobalt + Umsetzung mit H ₂ SO ₄ zu CoSO ₄	(5) Stöchiometrische Umsetzung
Nickelsulfat in Mischsalzlösung	Primärdaten des Projektes	Primärgewinnung: Nickel + Umsetzung mit H ₂ SO ₄ zu NiSO ₄	(5) Stöchiometrische Umsetzung
Mangansulfat in Mischsalzlösung	Primärdaten des Projektes	Primärgewinnung: Mangan + Umsetzung mit H ₂ SO ₄ zu MnSO ₄	(5) Stöchiometrische Umsetzung
Lithiumhydroxid	Primärdaten des Projektes	Primärgewinnung: Lithiumhydroxid	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 Altelektrodenmaterials 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 CO₂-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.

Bei den Primärdaten auf Basis von Labordaten konnte eine Hochrechnung aus Gründen fehlender Informationen nicht erfolgen. Während in diesen Basisprozessen die Aufwendungen für Strom, Lüftung und Hilfsstoffe „realistisch“ abgedeckt sein sollten, fehlen hier aber Angaben für die Automatisierung sowie Streuverluste für die Materialien zum Recycling. Es ist daher davon auszugehen, dass für beide zusätzliche Aufwendungen bzw. Verluste für das Materialrecycling zu verzeichnen sind.

5. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

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

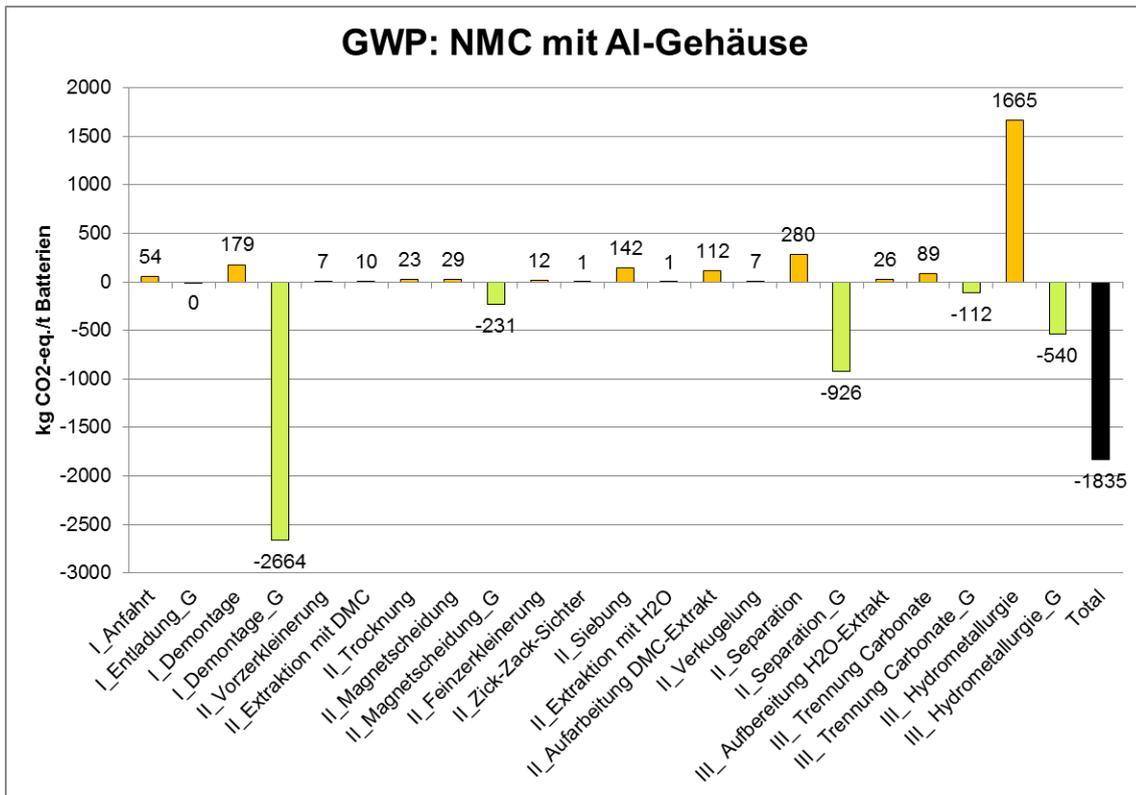
Die Ergebnisse sind dargestellt nach den einzelnen Teilschritten des Recyclingprozesses, jeweils mit der Last und eventuellen Gutschriften.

Der erste Schritt besteht aus den Teilschritten Anfahrt, Entladung und Demontage, der zweite Schritt aus den Teilschritten Vorzerkleinerung, Extraktion mit DMC, Trocknung, Magnetscheidung, Feinzerkleinerung, Zick-Zack-Sichter, Siebung, Extraktion mit Wasser, Aufarbeitung des DMC-Extrakts, Verkuglung, Separation, Aufbereitung H₂O-Extrakt und Trennung der Carbonate, der dritte Schritt umfasst die hydrometallurgische Aufbereitung des Aktivmaterials.

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 LithoRec II-Verfahrens, der Batterie- und Modulerlegung und Entladung, 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.

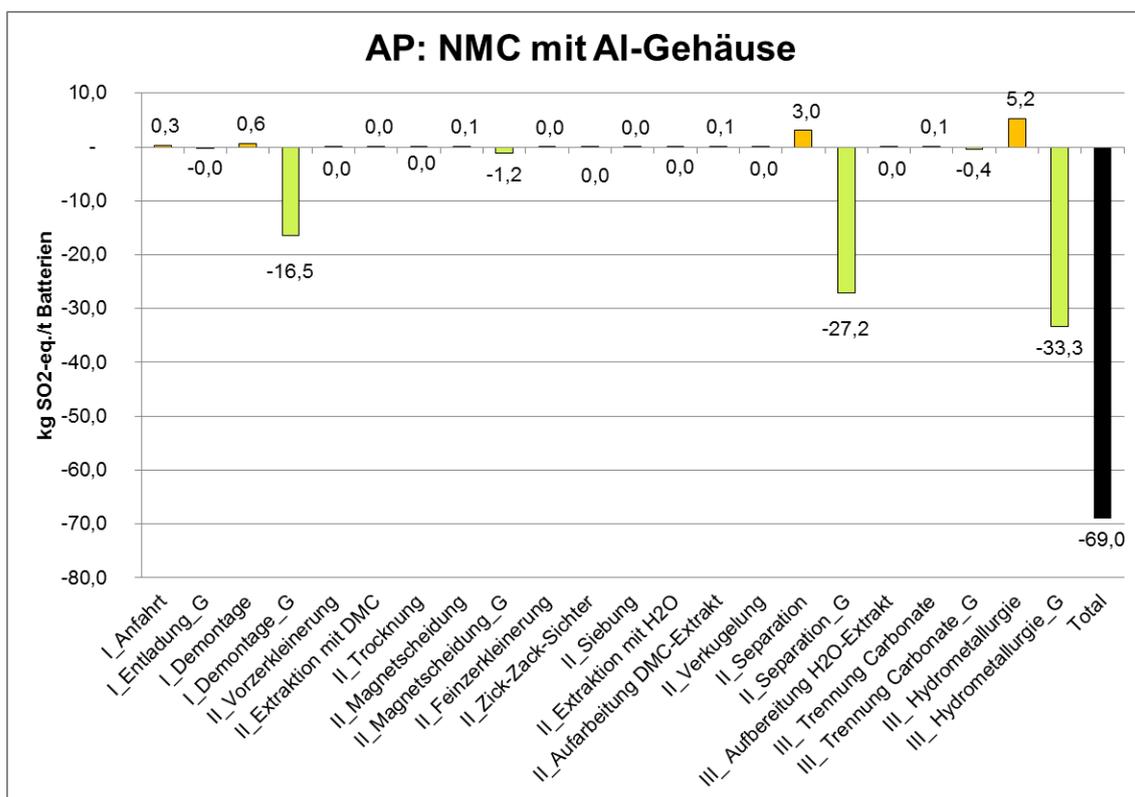
Bei der Zellzerlegung und der Separation des Aktivmaterials resultieren die wesentlichen Treibhausgasemissionen aus der Aufarbeitung des Lösemittelextrakts und der Verbrennung des Separators. Für das Recycling von Aluminium und Kupfer fallen jeweils deutliche Nettogutschriften an. Die wesentlichen Lasten stecken bei der Separation des Aktivmaterials im Energiebedarf des Prozesses.

Die deutlichsten THG-Emissionen entstehen bei der hydrometallurgischen Aufbereitung. Sie sind im Wesentlichen auf den Hilfsstoff- und Energieeinsatz (Strom und sonstige Energien) zurückzuführen. Aus der Rückgewinnung der Aktivmaterialien ergeben sich insbesondere bei Kobalt und Nickel hohe Gutschriften. Insgesamt trägt dieser Prozess jedoch eine Netto-Last und somit nicht zu einer Verbesserung des Gesamtergebnisses bei.

Das Treibhauspotenzial wird zu 73% von CO₂, zu 8% von Lachgas, zu 7% von Methan und zu 11% von Tetrafluormethan bestimmt.

5.1.2. Versauerungspotenzial (AP)

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



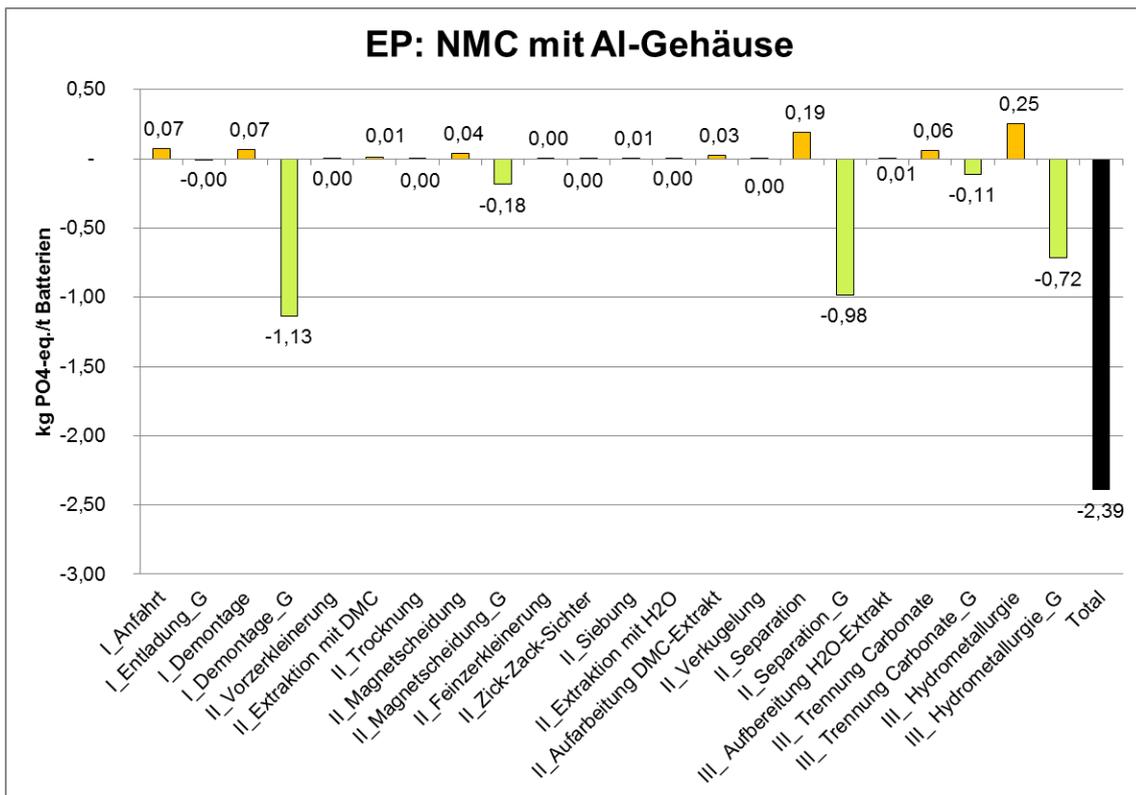
Beim Versauerungspotenzial entstehen bei der Demontage die wesentlichen Gutschriften durch das Recycling des Aluminiums, des Kupfers, des Edelstahls und des Kunststoffes (siehe Abbildung 5-2). Das Recycling des BMS hat hier einen geringeren Einfluss.

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

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

5.1.3. Das Versauerungspotenzial zu 91% von SO₂ und zu 6% von NO_x bestimmt. Eutrophierungspotenzial (EP)

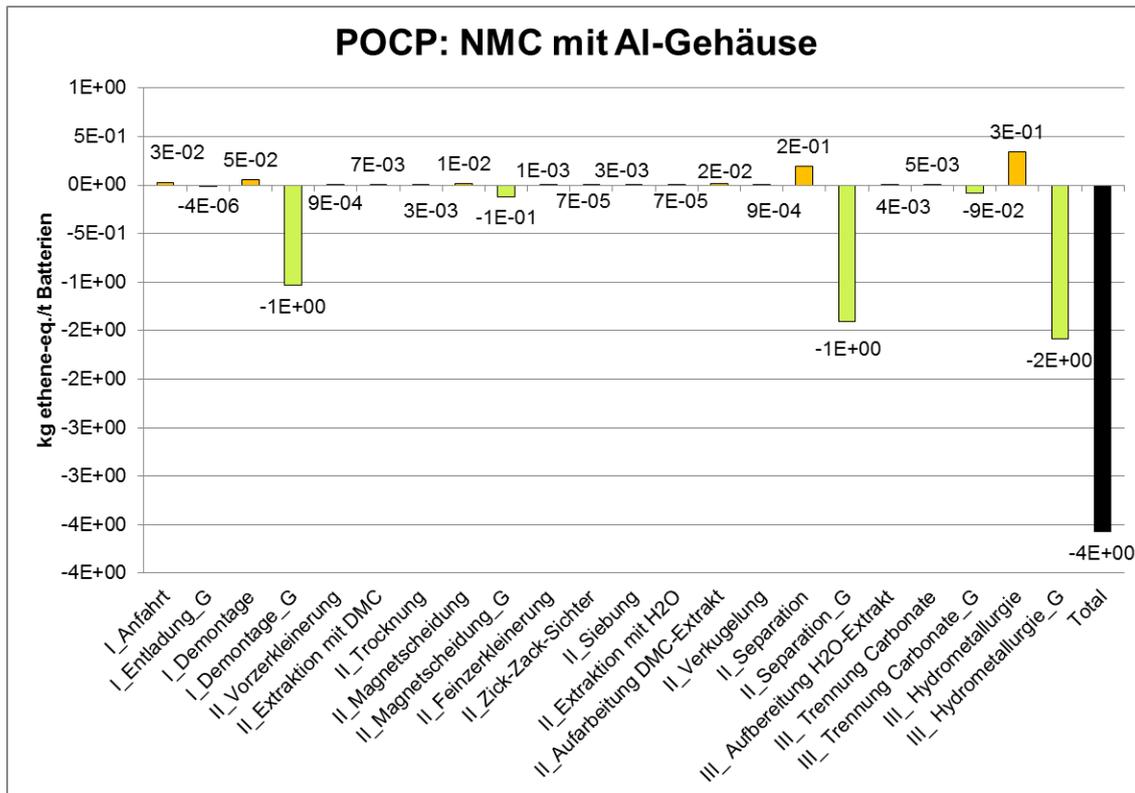
Abbildung 5-3: EP: NMC Batterien mit Al-Gehäuse



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 hydrometallurgischen Aufbereitung resultieren beim EP wie bei GWP und AP, Umweltlasten aus dem Hilfsstoff- und Energieinput, die aber durch die Gutschriften aus der Lithiumrückgewinnung kompensiert werden können. Zudem resultiert beim EP noch ein wesentlicher Beitrag aus der Deponierung der Fällungsrückstände.

5.1.4. Das Eutrophierungspotenzial zu 53% von NO_x, zu 4% von Phosphat und zu 12% von Ammoniak bestimmt. Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)

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

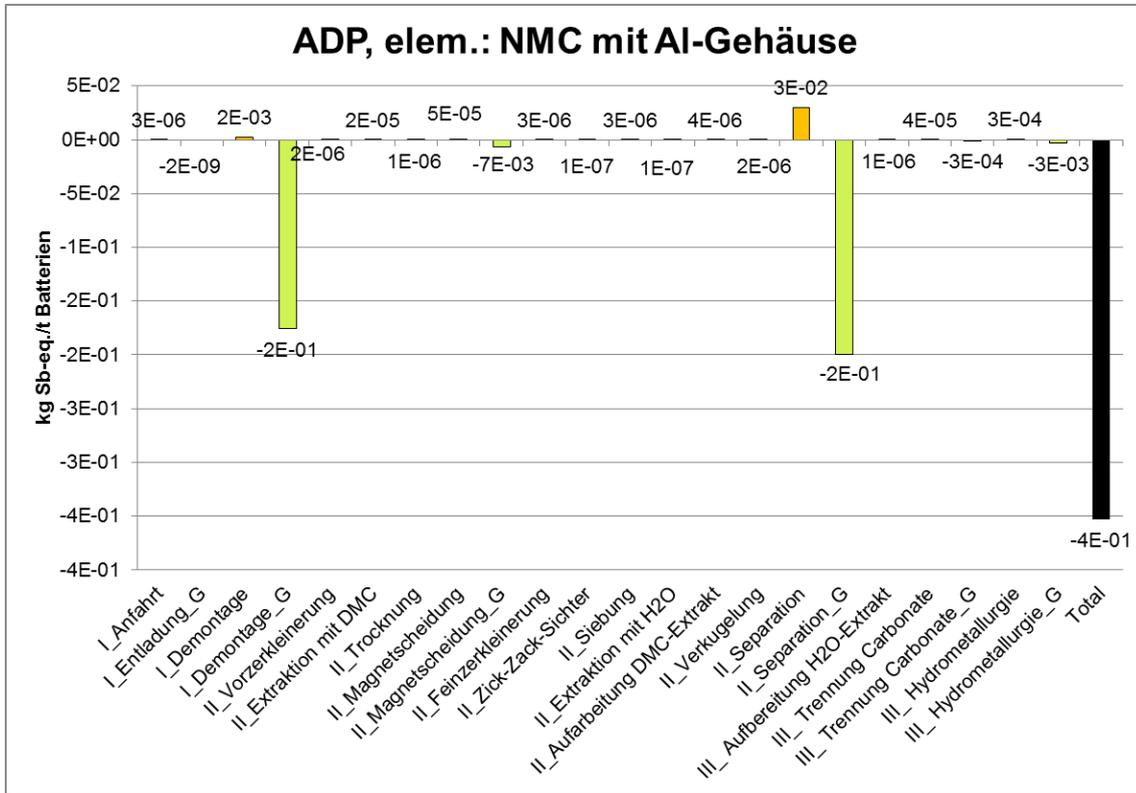


Auch beim Bildungspotenzial photochemischer Oxidantien (POCP, siehe Abbildung 5-4) resultieren aus dem Recyclingprozess deutliche Gutschriften aus dem Metallrecycling, denen nur geringe Lasten gegenüberstehen. Die Lasten bei der hydrometallurgischen Aufbereitung kommen aus dem Hilfsstoff- und Energieinput,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

Das Photochemische Ozonbildungspotenzial zu 70% von Schwefeldioxid, zu 15% von NMVOC, zu 7% von NO_x und zu 4% 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.

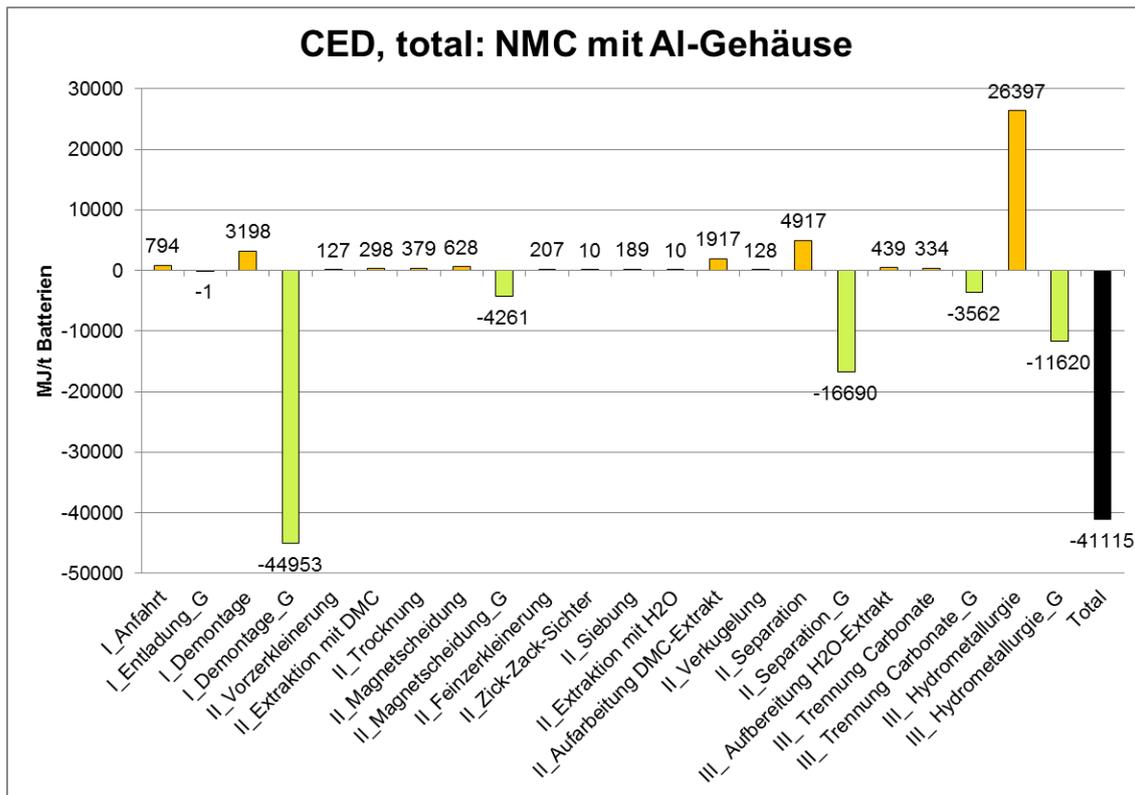
Bei der Zellerlegung und Separation des Aktivmaterials gibt es eine Last durch den Sekundärkupferprozess, die allerdings durch die recht hohen Gutschriften für das zurückgewonnen Kupfer deutlich kompensiert werden.

Trotz der Rückgewinnung der Aktivmaterialien sind in der hydrometallurgischen 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 45% 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 Zellzerlegung und der Separation des Aktivmaterials zeigt der CED_{total} deutliche Beiträge aus dem Aluminium- und Kupferrecycling sowie aus der Aufbereitung der Lösemittel, aber auch Gutschriften durch die zurückgewonnenen Metalle.

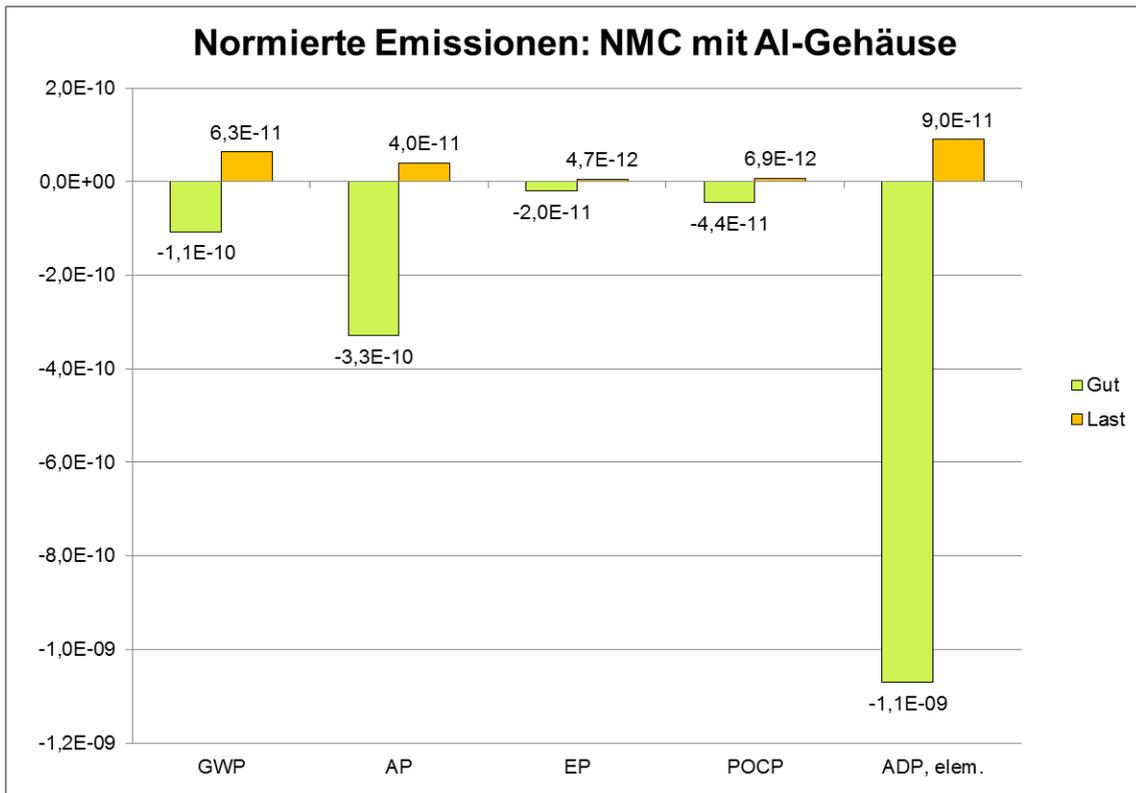
Bei der hydrometallurgischen Aufbereitung resultieren hohe Umweltlasten aus dem Hilfsstoff- und Energieinput, die nicht durch die Gutschriften aus der Lithiumrückgewinnung kompensiert werden können.

Der Primärenergieverbrauch zu 7% Erdgas-, zu 22% Erdöl- und zu 24% 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)

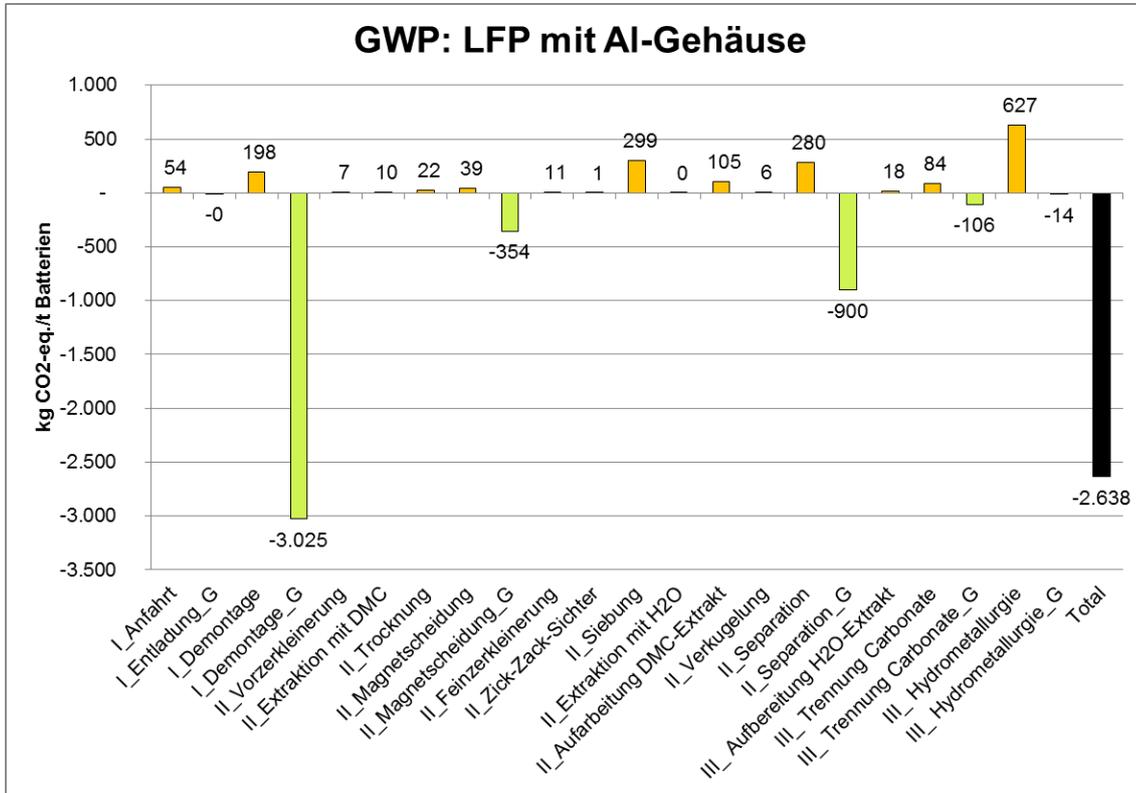
Wie bei den NMC-Batterien entsteht auch bei den Batterien mit LFP-Kathode im ersten Schritt des LithoRec II-Verfahrens, der Batterie- und Modulzerlegung und Entladung, durch die Demontage selbst ein geringer Beitrag zum GWP durch den Strombedarf (siehe Abbildung 5-9). Wesentliche Unterschiede zeigen 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.

Bei der Zellzerlegung und der Separation des Aktivmaterials verhalten sich die THG-Emissionen für das Recycling der LFP-Batterien ähnlich wie bei den NMC-Batterien, da sich die Recyclingprozesse nicht unterscheiden.

Im Vergleich zum NMC-Batterierecycling zeigt sich für die hydrometallurgische Aufbereitung ein reduziertes GWP durch einen deutlich geringeren Hilfsstoff- und Energiebedarf (sowohl Strom als auch andere Energieträger). Da bei der LFP-Kathode nur Lithiumhydroxid zurückgewonnen werden kann, resultieren aus dem Prozess deutlich weniger Gutschriften. Insgesamt trägt diese Stufe wie bei den NMC-Batterien nicht zu einer Verbesserung des GWP bei. Allerdings ist die GWP-Last der gesamten Recyclingkette wegen des geringeren Hilfsstoff- und Energiebedarfs dennoch ca. 40 % niedriger als bei den NMC-Batterien.

Das Treibhauspotenzial wird zu 78% von CO₂, zu 6% von Lachgas, zu 7% von Methan und zu 8% von Tetrafluormethan bestimmt.

Abbildung 5-8: GWP: LFP-Batterien

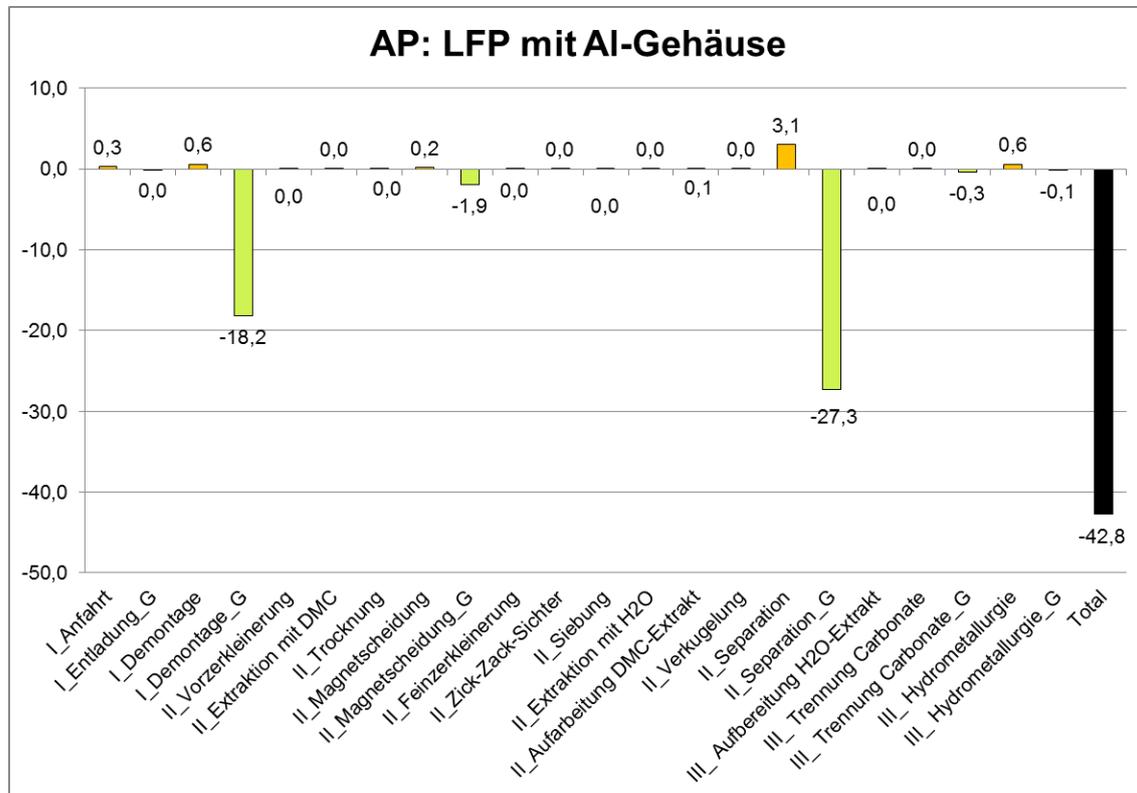


5.2.2. Versauerungspotenzial (AP)

Beim Versauerungspotenzial unterscheiden sich die Schritte Entladung, Demontage, Zellerlegung und Separation des Aktivmaterials bei den LFP-Batterien kaum von den Ergebnissen der NMC-Batterien. Große Unterschiede treten hingegen bei der hydrometallurgischen 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 SO₂ und zu 9% von NO_x bestimmt.

Abbildung 5-9: AP: LFP-Batterien

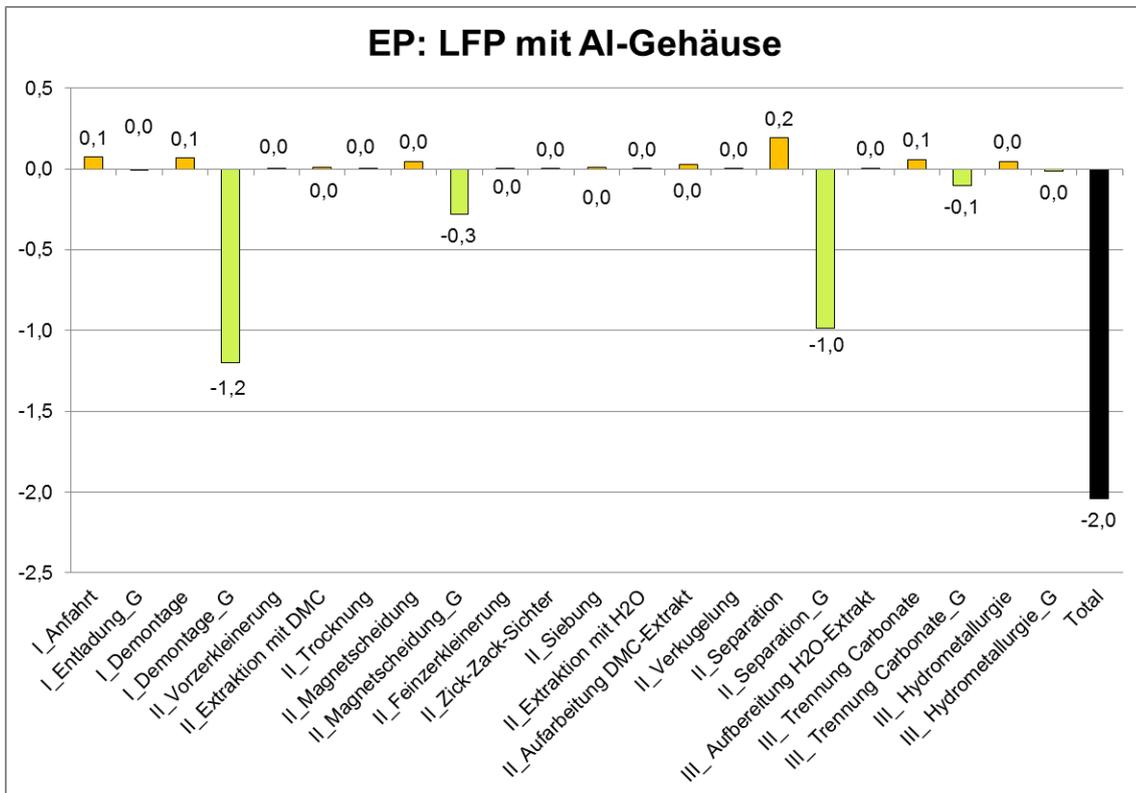


5.2.3. Eutrophierungspotenzial (EP)

Auch beim Eutrophierungspotenzial zeigen sich bei den Schritten Entladung, Demontage, Zellzerlegung und Separation des Aktivmaterials kaum Unterschiede zu den NMC-Batterien (siehe Abbildung 5-10). Große Unterschiede treten wiederum bei der hydrometallurgischen 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 49% von NO_x, zu 5% von Stickstoff und zu 10% von Ammoniak bestimmt.

Abbildung 5-10: EP: LFP-Batterien



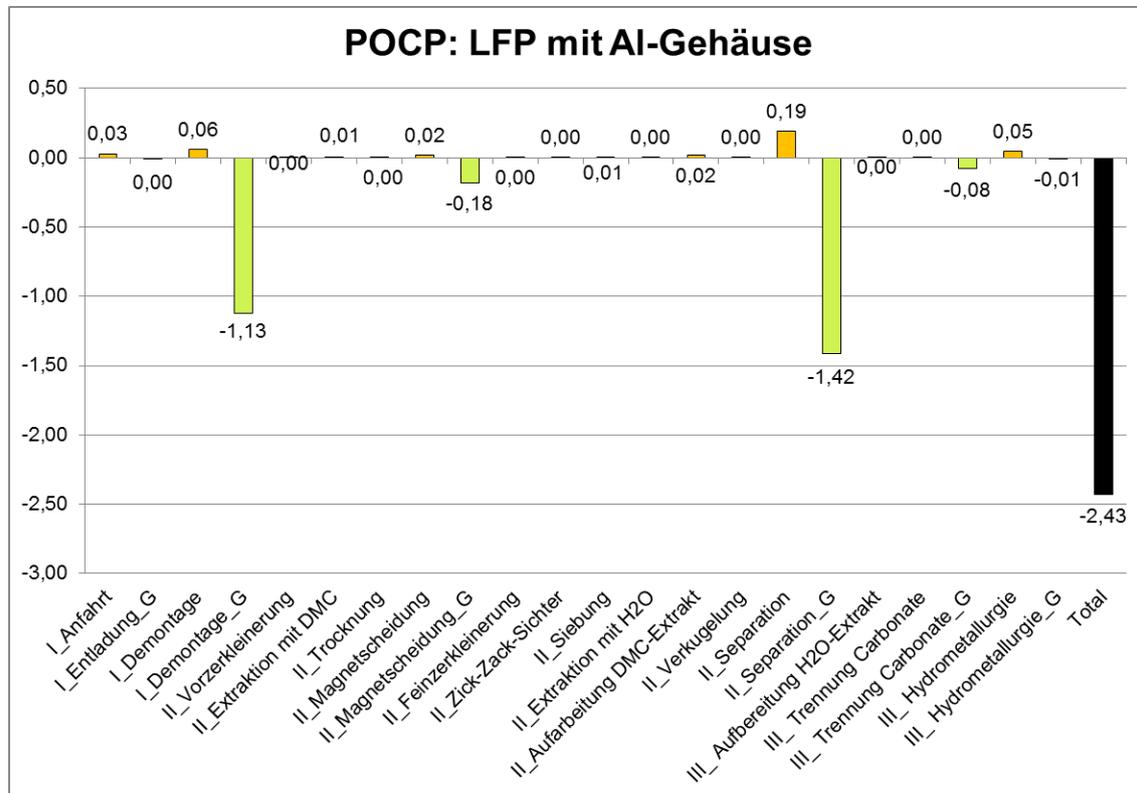
5.2.4. Photochemisches Ozonbildungspotenzial (POCP)

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

Die hydrometallurgische Aufbereitung des Aktivmaterials 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 61% von Schwefeldioxid, zu 15% von NMVOC, zu 9% von NO_x und zu 6% von Kohlenmonoxid bestimmt.

Abbildung 5-11: POCP: LFP-Batterien

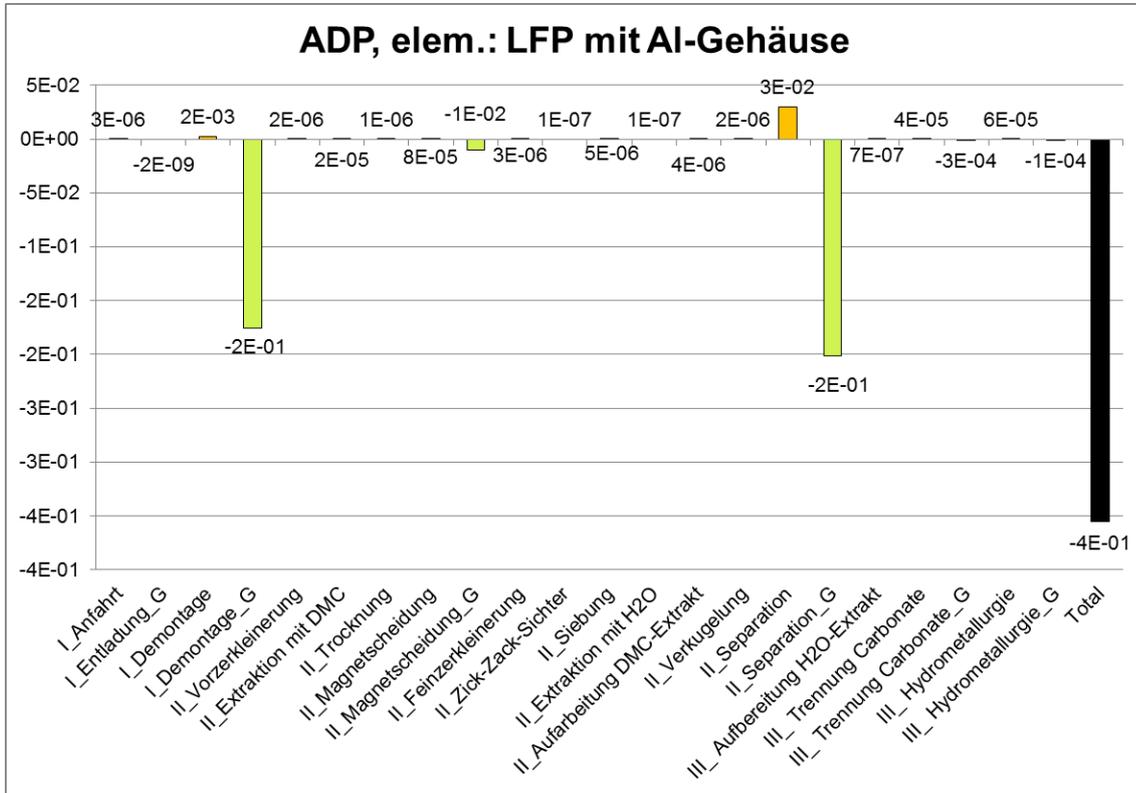


5.2.5. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP, elem)

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 45% vom Verbrauch an Kupfer, zu 13% von Verbrauch an Gold und zu 10% von Silberverbrauch bestimmt.

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

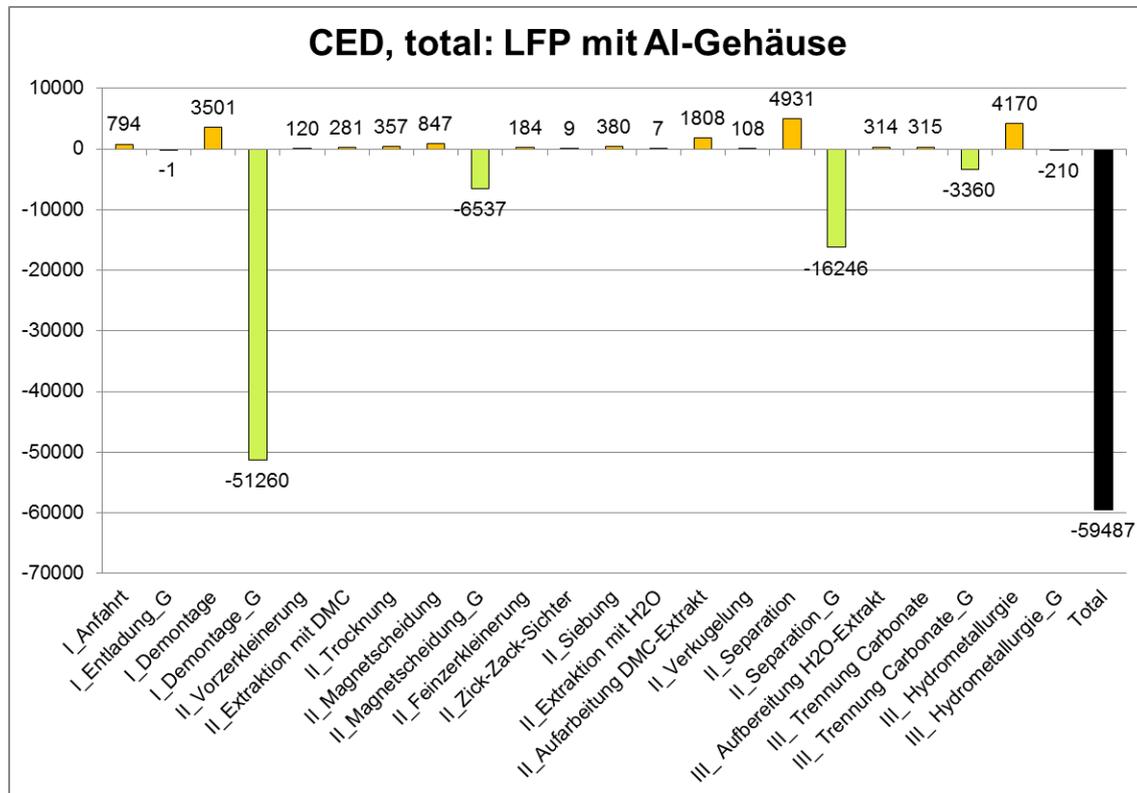


5.2.6. Primärenergieverbrauch, gesamt (CED, total)

Beim Kumulierten Energieaufwand (CED_{total}) zeigen sich Unterschiede zu den Ergebnissen bei den NMC-Batterien zum einen im Demontageschritt und bei der Magnetscheidung, bei denen der höhere Aluminiumgehalt zu deutlich höheren Gutschriften bei den LFP-Batterien führt (siehe Abbildung 5-13). Vor allem aber treten bei der hydrometallurgischen Aufbereitung sehr große Unterschiede zu den Ergebnisse bei den NMC-Batterien auf: Durch den geringeren Hilfsstoff- und Energiebedarf weisen die LFP-Batterien eine deutlich geringere Lastschrift auf, zum anderen aber wesentlich geringere Gutschriften, da nur Lithiumhydroxid zurückgewonnen wird.

Der Primärenergieverbrauch zu 15% Erdgas-, zu 21% Erdöl- und zu 20% 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.

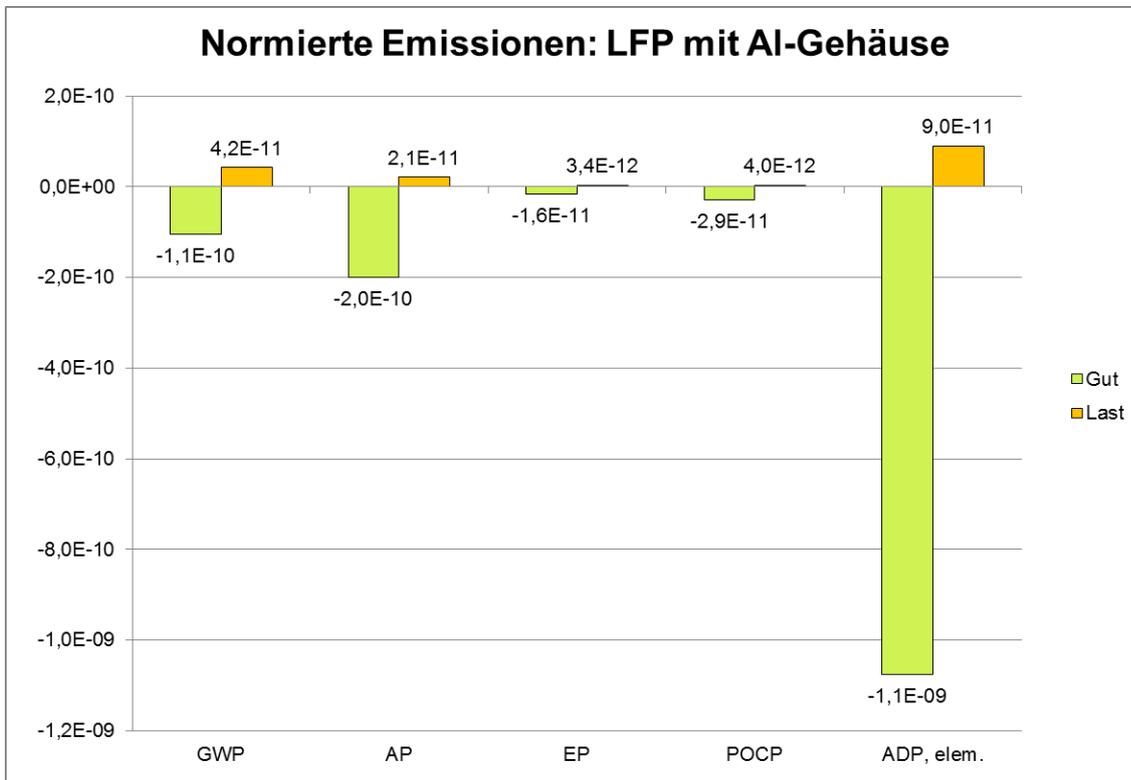
Wie schon bei den NMC-Batterien werden auch bei den LFP-Batterien die Ergebnisse von den ADP-Gutschriften für die zurückgewonnenen Metalle dominiert, vor allem für Kupfer, Nickel, Gold und Silber.

Es zeigt sich, dass auch 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-, Nickel-, 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 hydrometallurgischen Aufbereitung selbst – die Gutschriften die Lastschriften deutlich, was in einem Recyclingprozess zu erwarten ist, der ausgehend von einem lastenfremen 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		Gutschrift	Lastschrift
GWP	Stufe I	60%	9%
	Stufe II	26%	24%
	Stufe III	15%	67%
AP	Stufe I	21%	9%
	Stufe II	36%	36%
	Stufe III	43%	56%
EP	Stufe I	36%	19%
	Stufe II	37%	38%
	Stufe III	26%	43%
POCP	Stufe I	24%	12%
	Stufe II	36%	36%
	Stufe III	40%	52%
ADP elem.	Stufe I	46%	7%
	Stufe II	54%	92%
	Stufe III	1%	1%
CED total	Stufe I	55%	10%
	Stufe II	26%	22%
	Stufe III	19%	68%

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

Wirkungskategorie		Gutschrift	Lastschrift
GWP	Stufe I	69%	14%
	Stufe II	29%	44%
	Stufe III	3%	41%
AP	Stufe I	38%	17%
	Stufe II	61%	69%
	Stufe III	1%	13%
EP	Stufe I	46%	26%
	Stufe II	49%	54%
	Stufe III	5%	20%
POCP	Stufe I	40%	22%
	Stufe II	57%	64%
	Stufe III	3%	14%
ADP elem.	Stufe I	45%	7%
	Stufe II	55%	93%
	Stufe III	0%	0%
CED total	Stufe I	66%	24%
	Stufe II	29%	50%
	Stufe III	5%	26%

Ein wichtiger Parameter ist zudem der gewählte EoL-Allokationsansatz. Dieser sieht vor, dass die gebrauchten Batterien in die Bilanzierung als lastenfrier 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)

Gehäuse		CFK	Stahl
Batterie	Gesamt	100%	100%
Pack + Modul	Stahl (inkl. Schrauben)	7,7%	39%
	Kabel	1,2%	1%
	Elektronikbauteile (WEEE)	2,2%	2%
	Kunststoffe	6,0%	4%
	CFK	9,9%	0%
	Aluminium	3,8%	3%
	Zellgehäuse	Al	5,4%
Anode	Kohlenstoff	10,0%	7%
	Cu	10,7%	8%
	Sonstige	0,9%	1%
Kathode	Mn	7,8%	6%
	Li	1,3%	1%
	Co	1,1%	1%
	Ni	2,1%	2%
	Al	6,6%	5%
	Sauerstoff	5,8%	4%
	Sonstige	2,0%	1%
Separatoren	Kunststoffe	4,7%	3%
Tabs	Cu	0,5%	0%
	Al	0,1%	0%
	Sonstige	0,1%	0%
Electrolyt	Lösungsmittel	10,2%	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 CO₂-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 70 % bzw. 50 % geringer). In den anderen Kategorien schwankt die Minderung um 5 %, 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

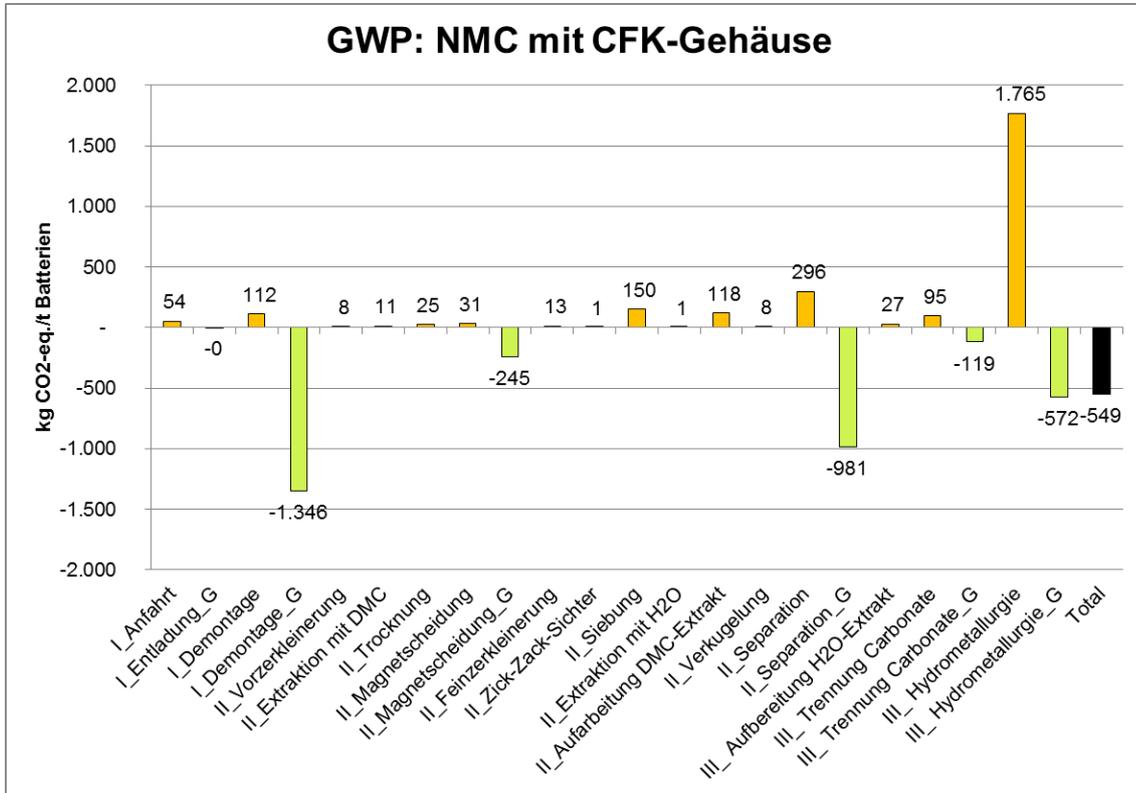


Abbildung 6-2: AP: NMC Batterien mit CFK-Gehäuse

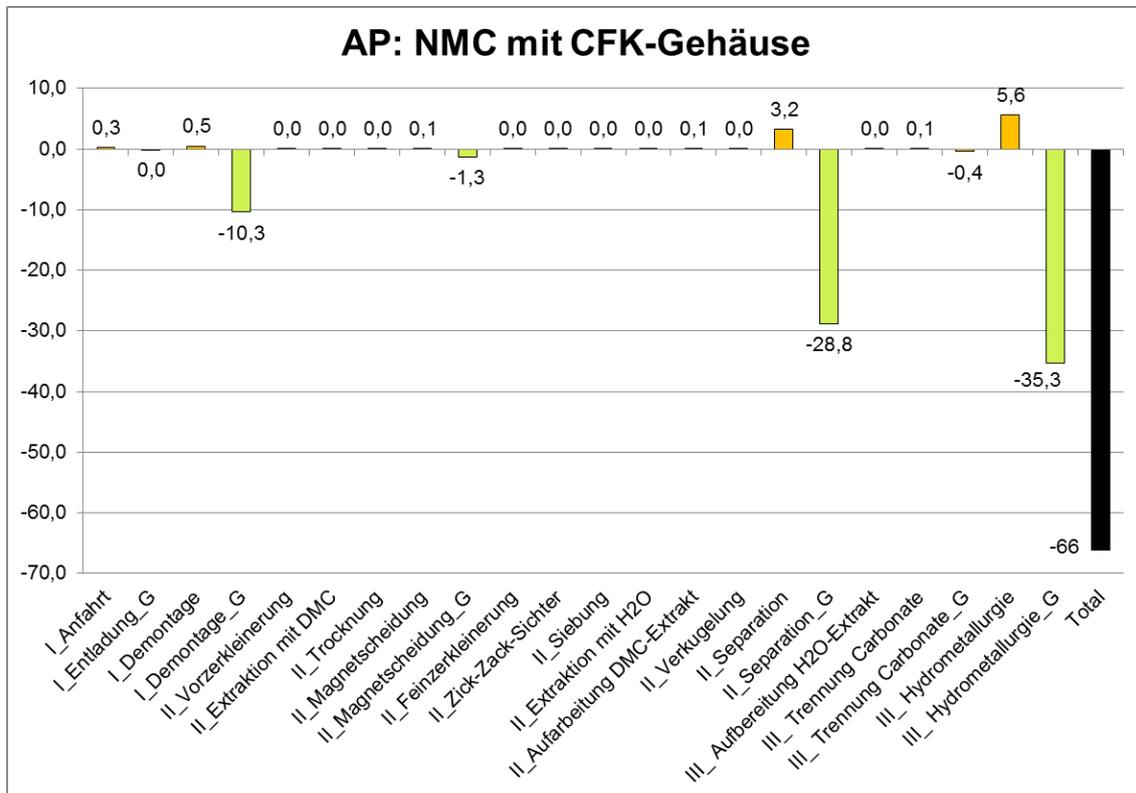


Abbildung 6-3: EP: NMC-Batterien mit CFK-Gehäuse

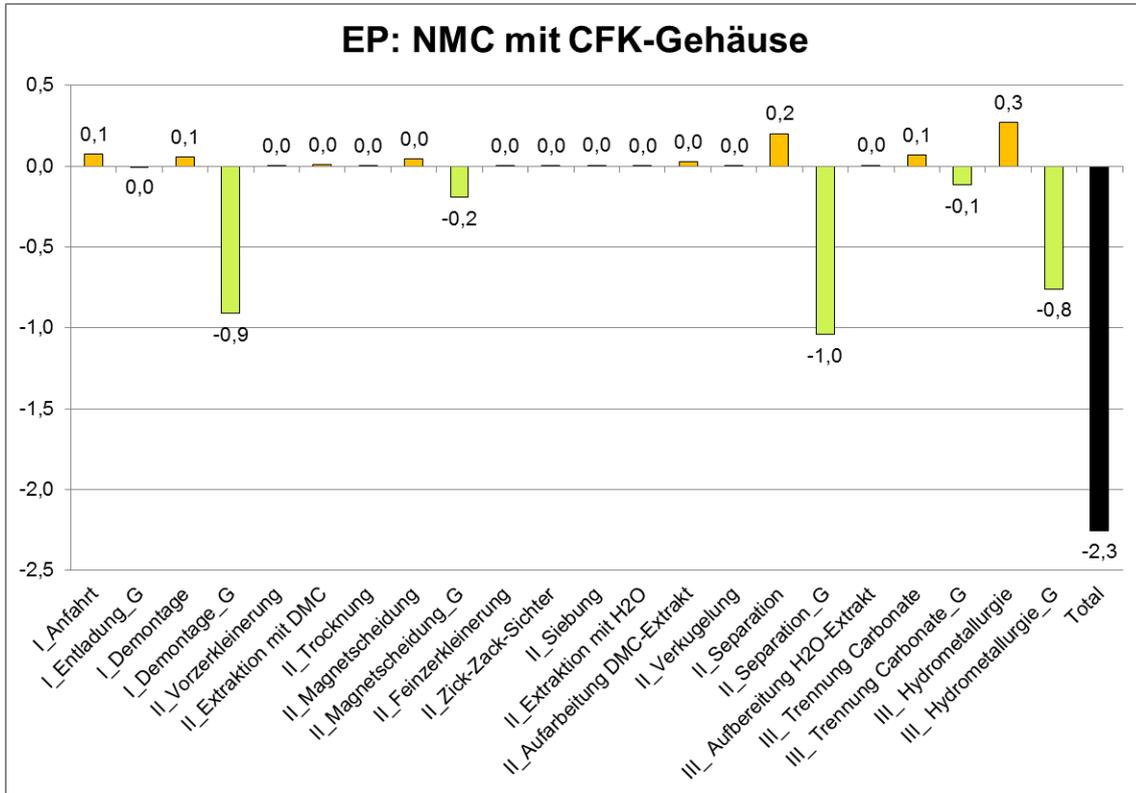


Abbildung 6-4: POCP: NMC-Batterien mit CFK -Gehäuse

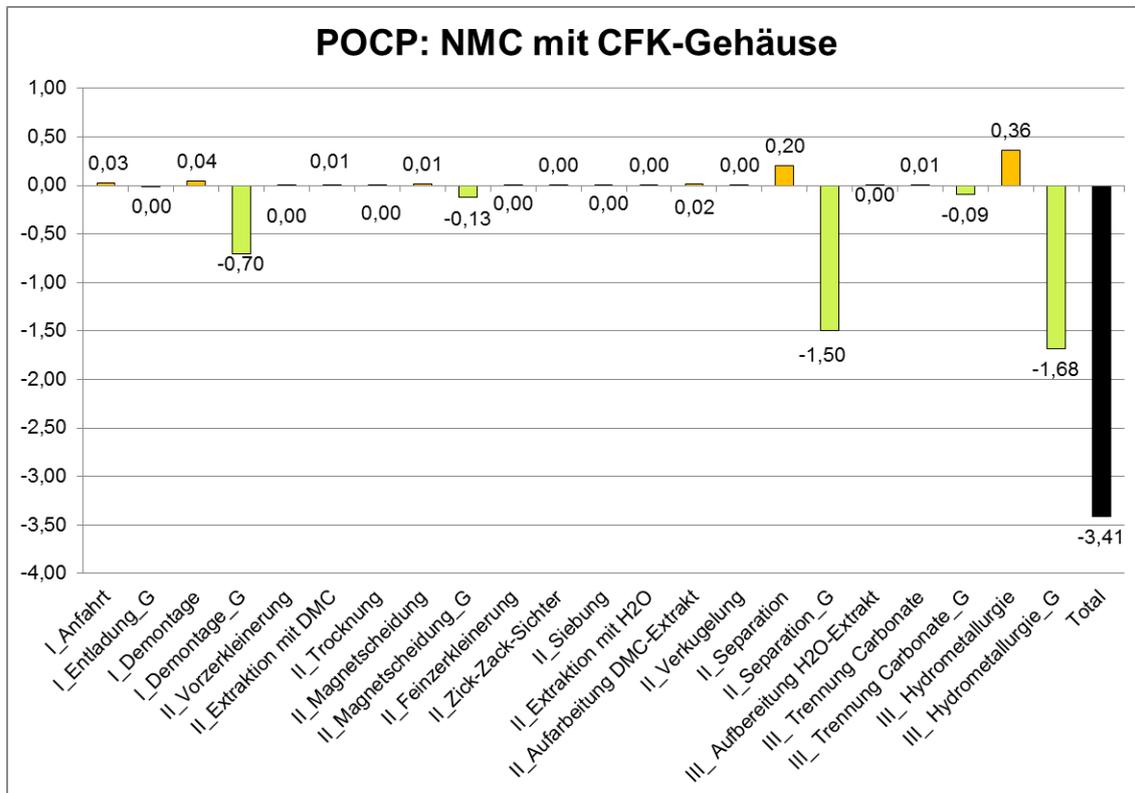


Abbildung 6-5: ADP, elem.: NMC-Batterien mit CFK -Gehäuse

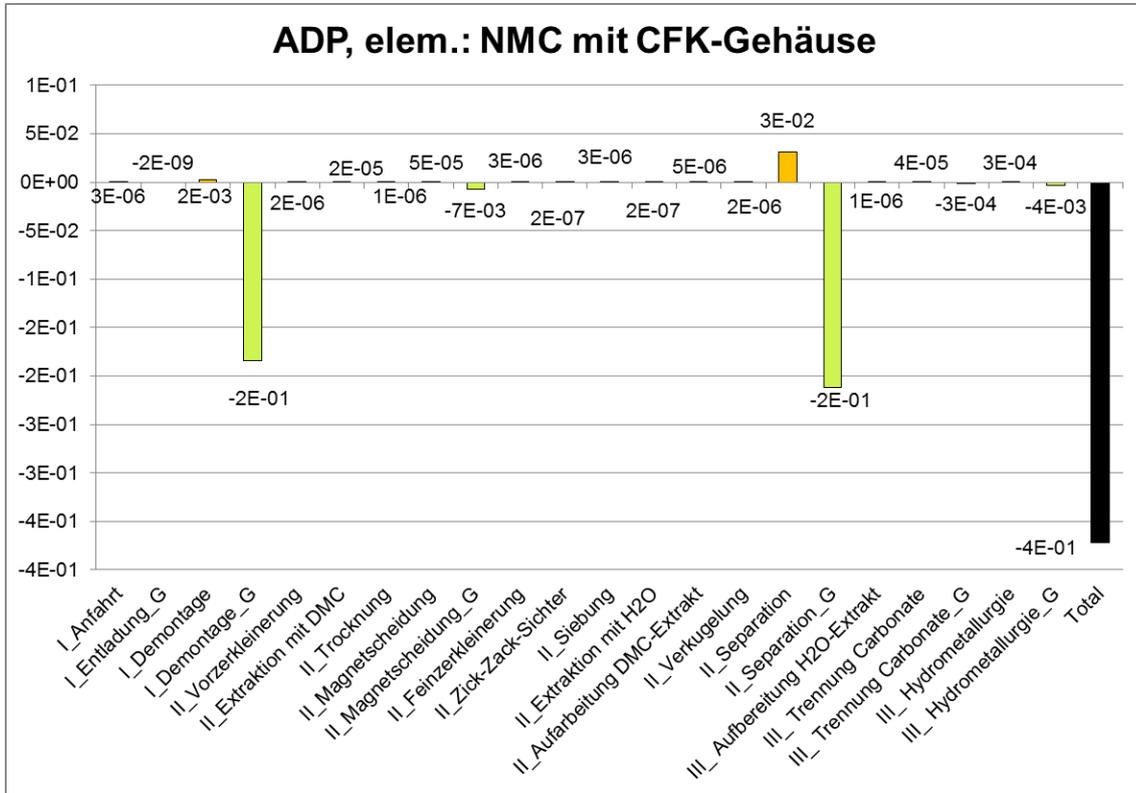
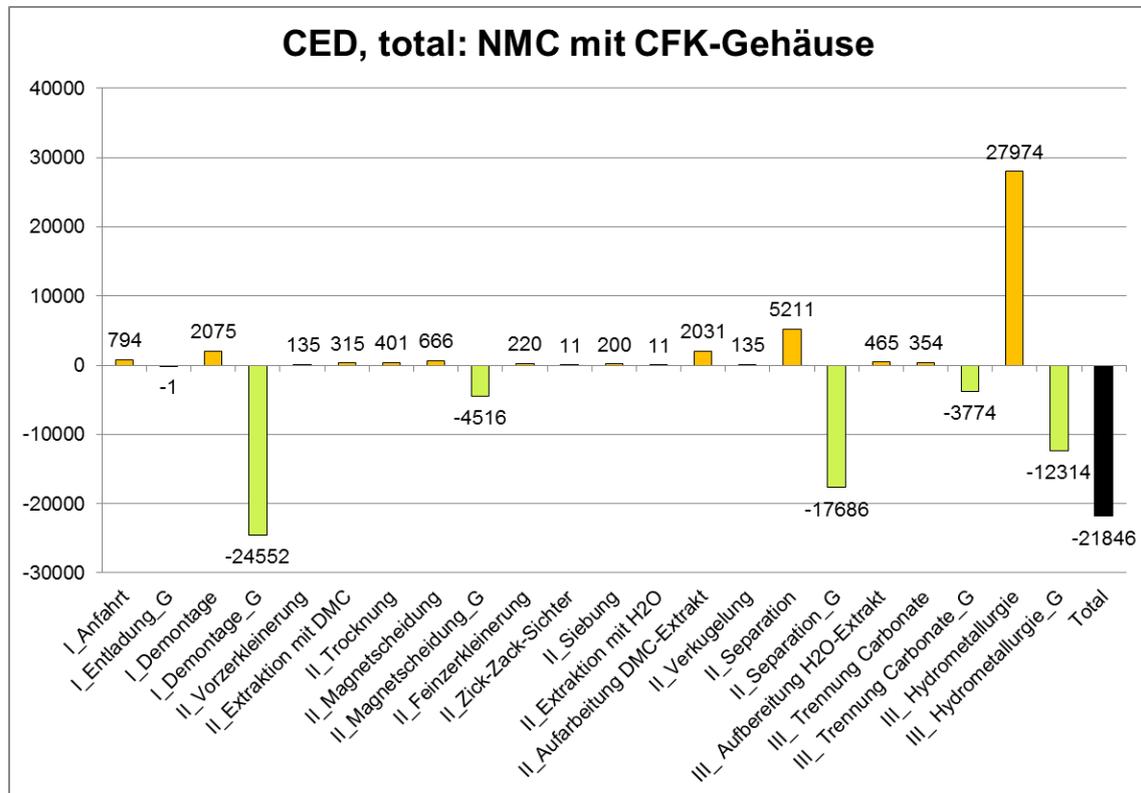


Abbildung 6-6: CED, total: NMC-Batterien mit CFK-Gehäuse



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 zum statt. Weiterhin ist der Anteil der Zellen am Gesamtgewicht deutlich niedriger, so dass sich die Lasten und Gutschriften aus der Zellzerlegung, Aktivmaterial-Separation und Hydrometallurgie 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 19 % festzustellen, während die Nettogutschrift beim EP um rund 16 % höher ist

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

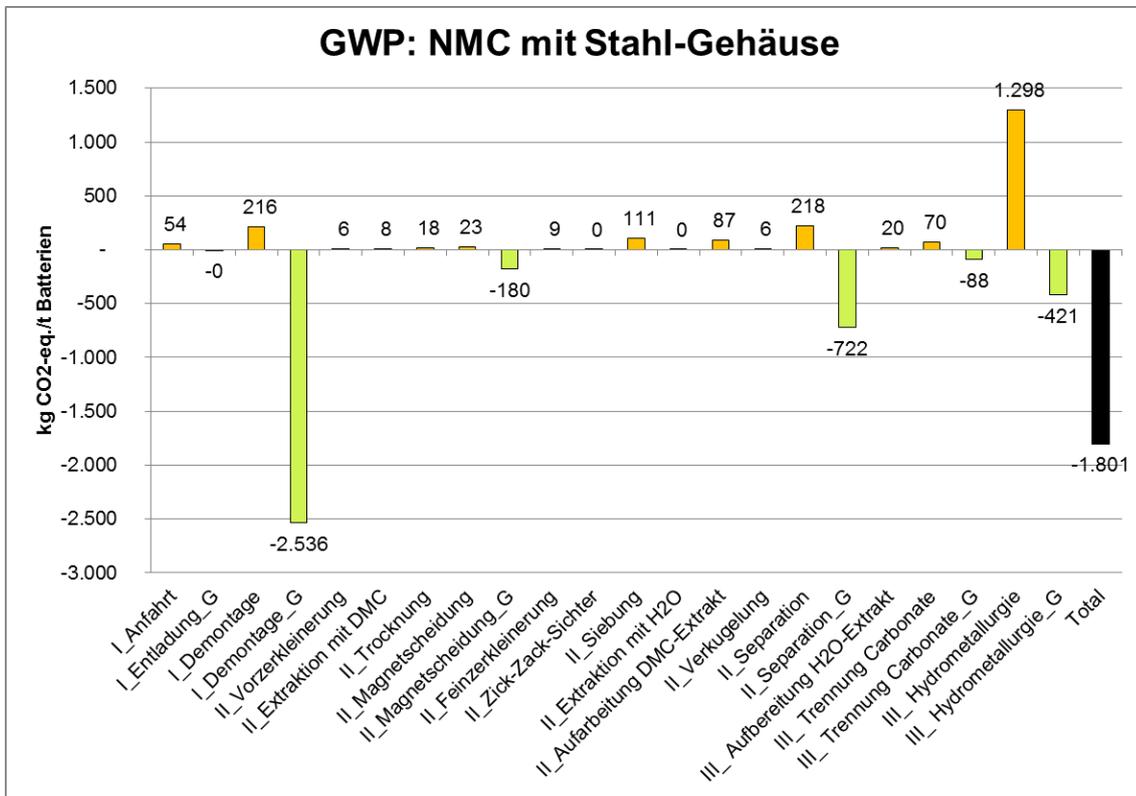


Abbildung 6-8: AP: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse

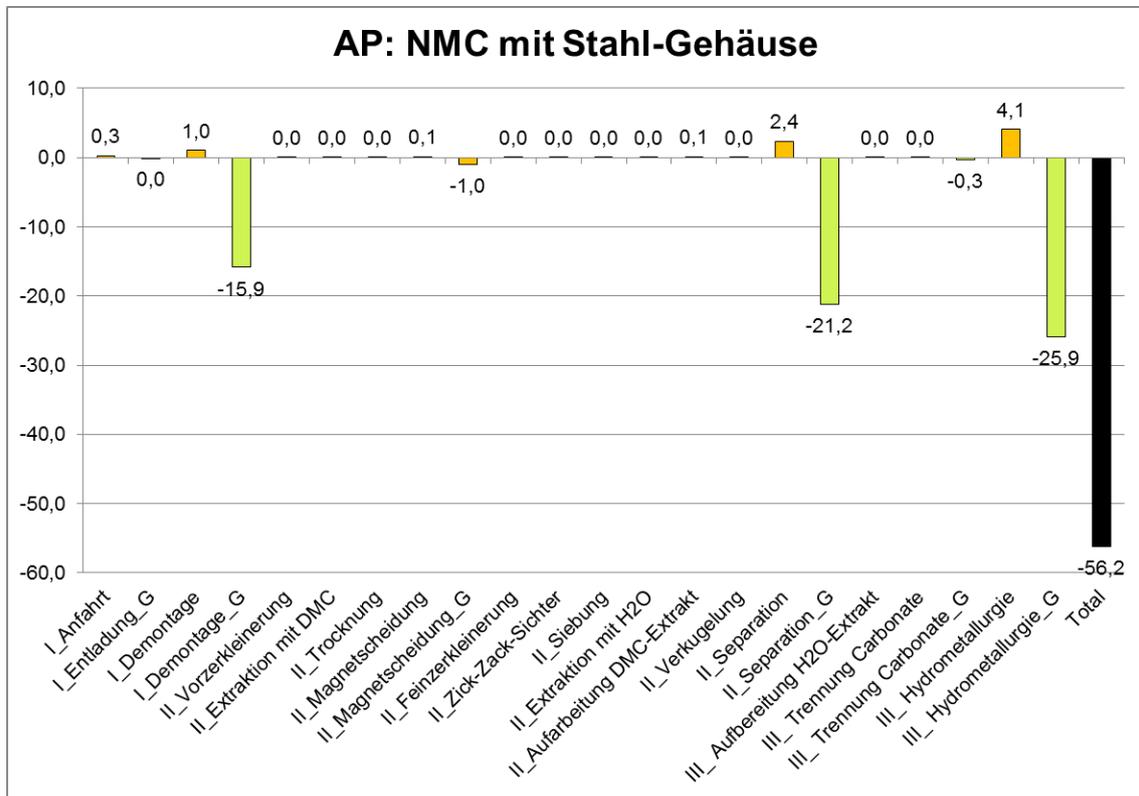


Abbildung 6-9: EP: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse

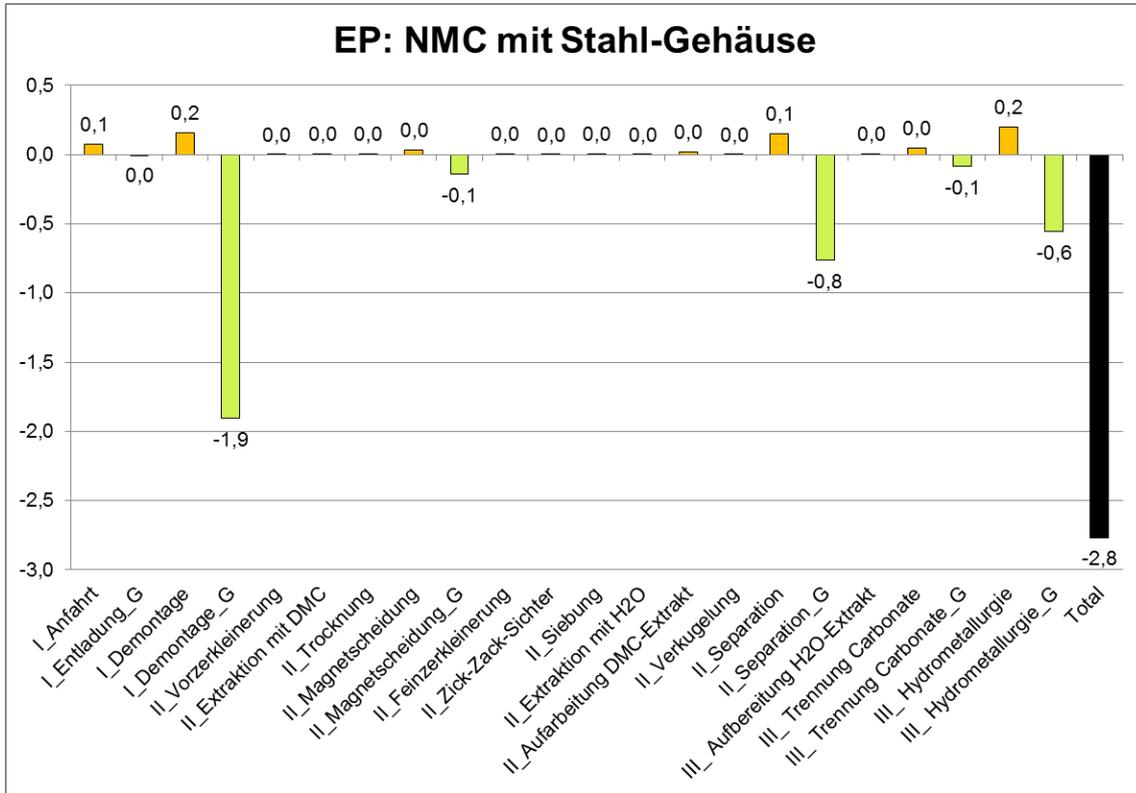


Abbildung 6-10: POCP: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse

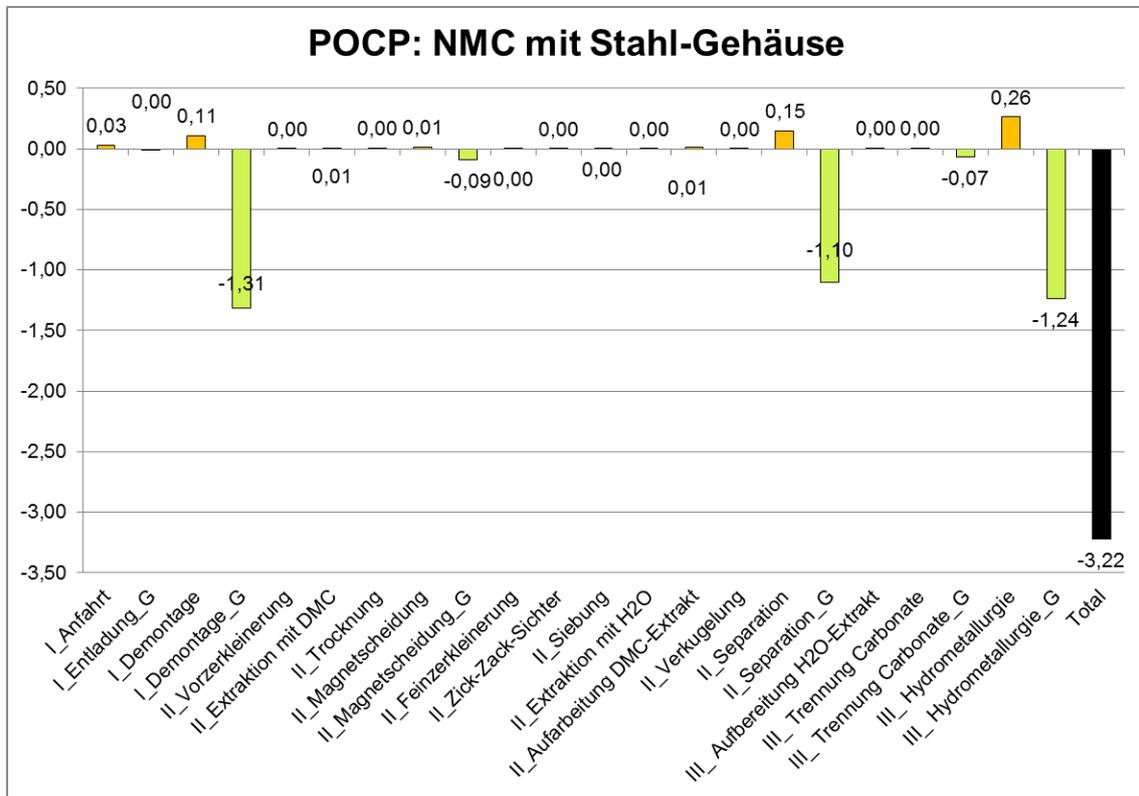


Abbildung 6-11: ADP, elem.: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse

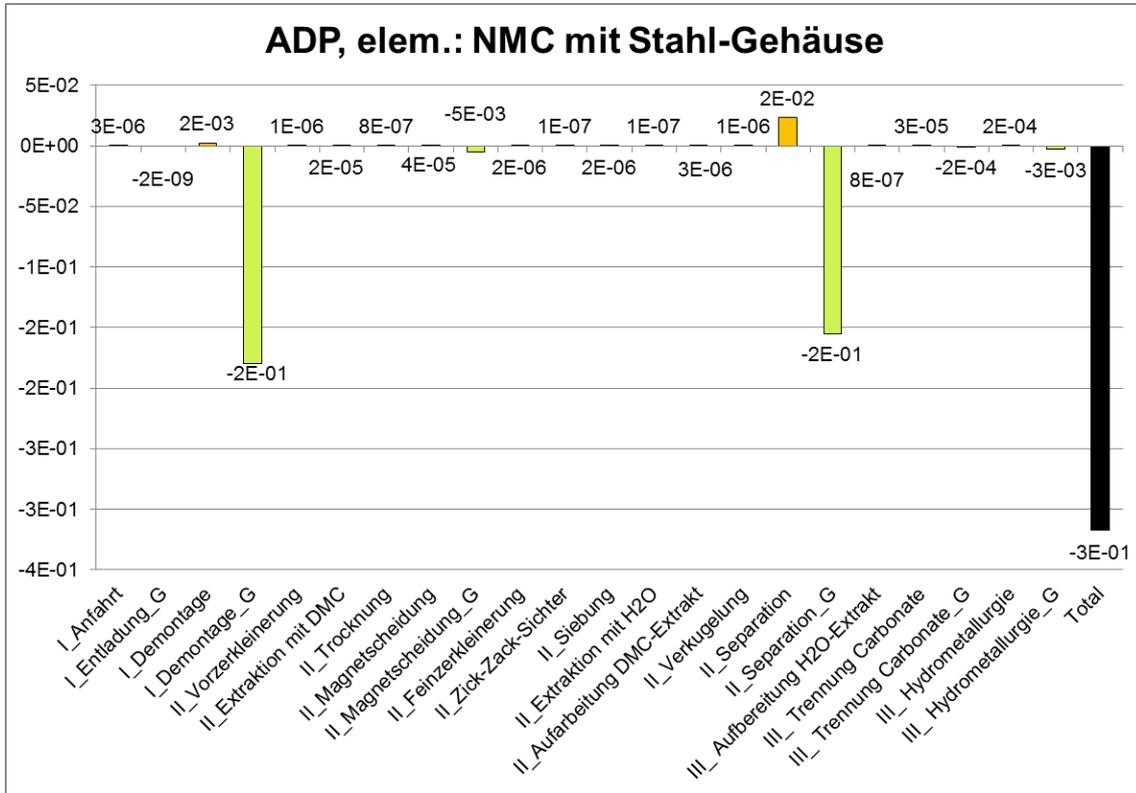
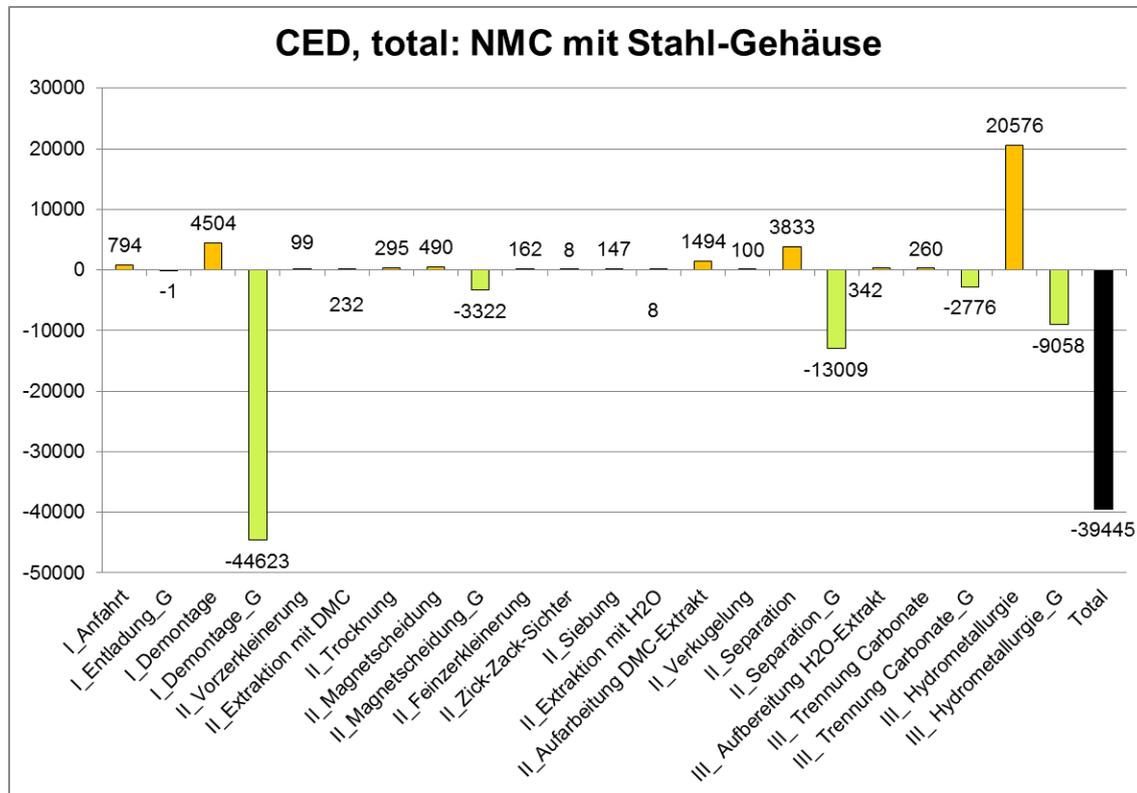


Abbildung 6-12: CED, total: NMC-Batterien mit Stahl-Gehäuse



6.2.2.3. NMC-Batterien mit klassischer Zusammensetzung

Die im Basisszenario verwendete generische Zusammensetzung der NMC-Batterien wurden nach Analysen von zurückgenommenen Lithium-Ionen-Batterien und Diskussion dieser Daten durch die Mitglieder der Umbrella-Gruppe festgelegt. Diese Daten berücksichtigen, dass in den letzten Jahren eine Tendenz zur Reduktion de Cobalt- und Nickel-Gehalts bei steigendem Mangan-Gehalt beobachten lässt. Als Sensitivität wurde ebenfalls eine Rechnung mit klassischen (stöchiometrischem) Verhältnis von Mn, Co und Ni durchgeführt. Tabelle 6-4 führt den Gehalt an Co, Mn, und Ni an der Gesamtbatterie auf (Basisszenario und Sensitivität mit klassischem Verhältnis).

Tabelle 6-4: Gehalt an Co, Ni, Mn an Gesamtbatterie

Gehalt	Basisszenario	Klassisch
Mn	7,4%	3,3%
Co	1,0%	3,5%
Ni	2,0%	3,5%

Stand: nach Umbrella-Meeting 1.10.2014

Bei NMC-Batterien mit klassischer Zusammensetzung der Zellen bleiben die Ergebnisse in den Schritten Entladung und Demontage sowie Zellzerkleinerung und Separation des Aktivmaterials identisch zu denjenigen im Basisszenario. Merklliche Unterschiede treten bei der hydrometallurgischen Aufbereitung auf. Durch den höheren Gehalt an Co und Ni sind hier deutlich höhere Gutschriften in den Wirkungskategorien GWP, AP, EP, POCP und CED zu beobachten. Nur beim ADP elem. sind dominieren die Gutschriften aus der Kupfer- und Edelmetallrückgewinnung in der Demontage und Zellzerkleinerung, hier wirken sich die höheren Co- und Ni-Rückgewinnungsraten nur gering aus. Die Tendenz der Gesamtaussagen wird aber auch durch diese Sensitivitätsanalyse bestätigt.

Abbildung 6-13: GWP: NMC Batterien, klassisch mit Al-Gehäuse

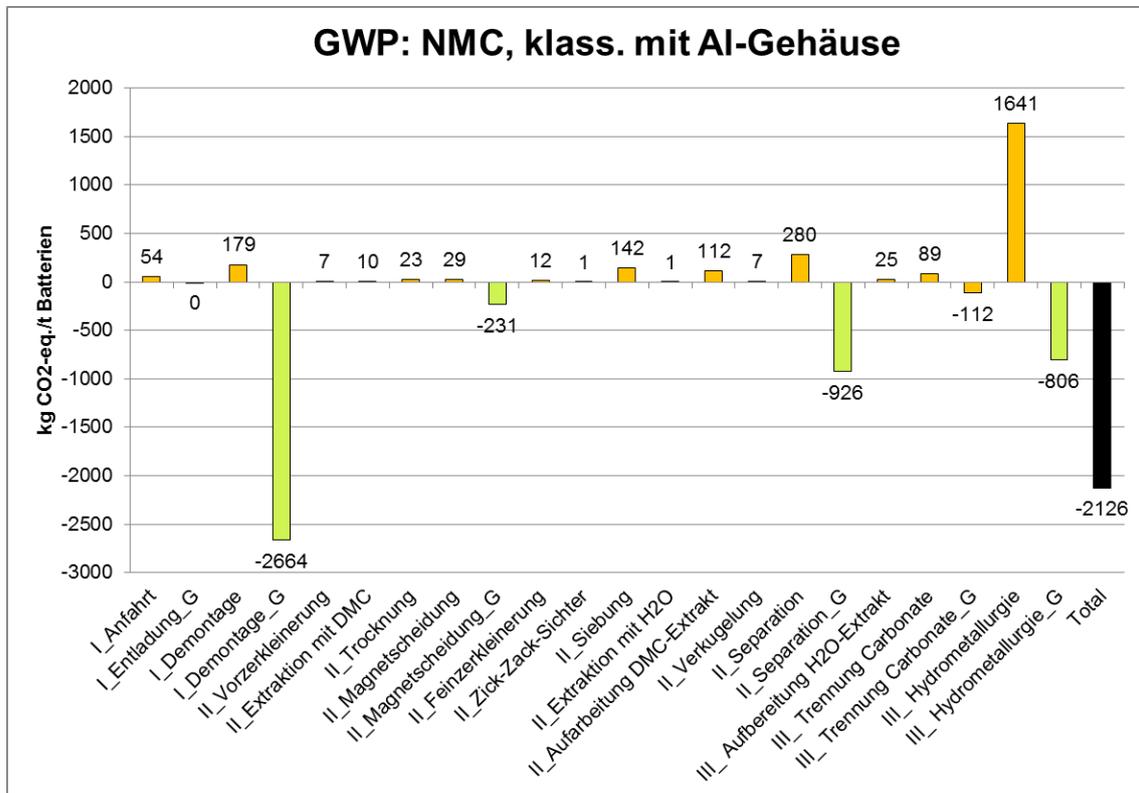


Abbildung 6-14: AP: NMC Batterien, klassisch mit Al-Gehäuse

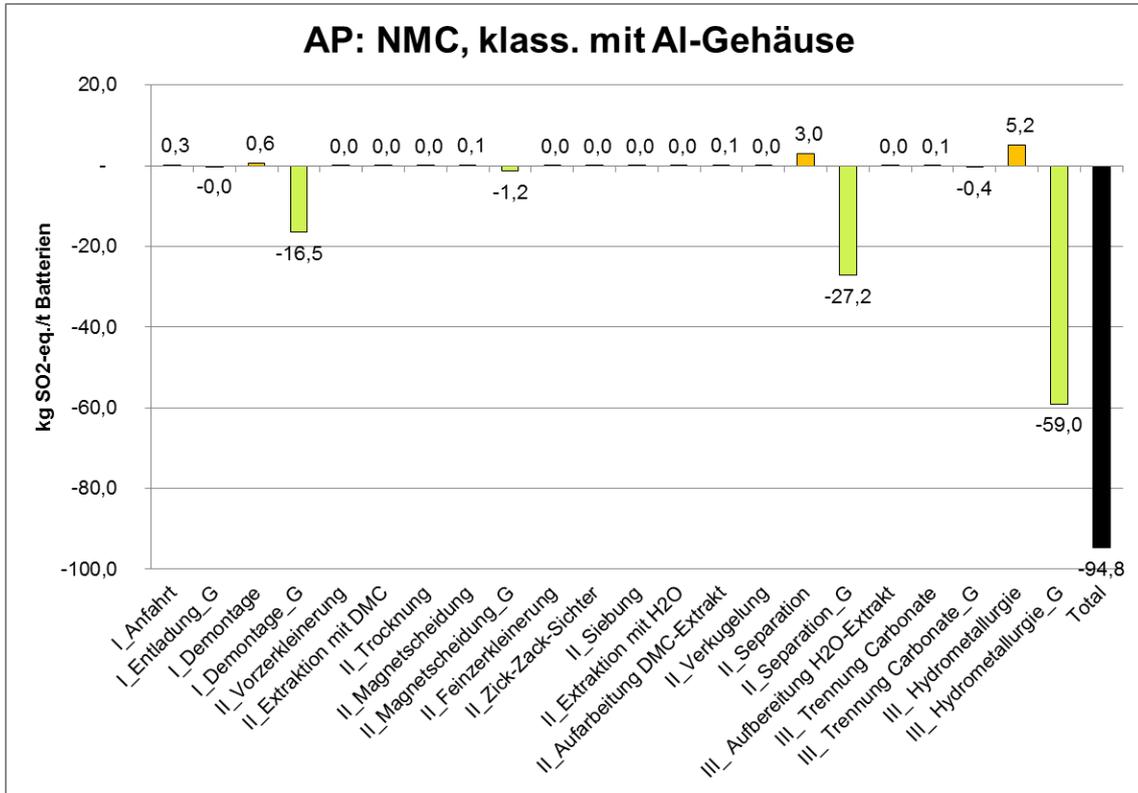


Abbildung 6-15: EP: NMC Batterien, klassisch mit Al-Gehäuse

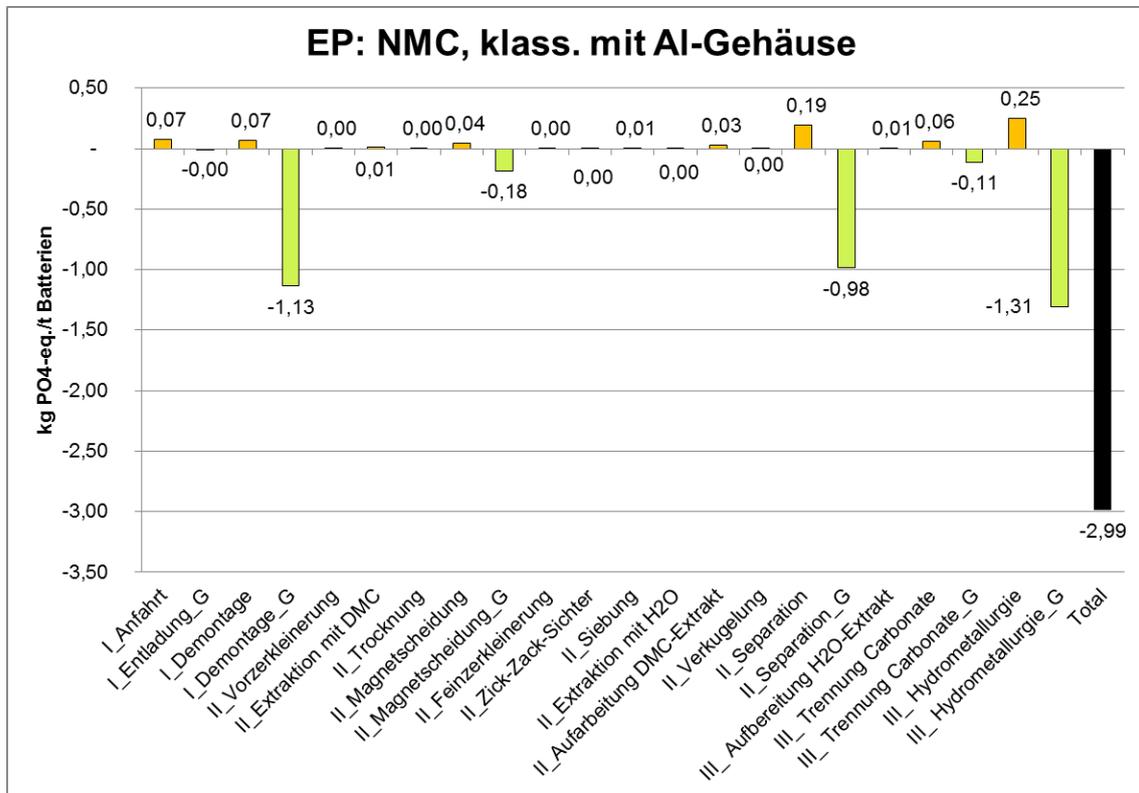


Abbildung 6-16: POCP: NMC Batterien, klassisch mit Al-Gehäuse

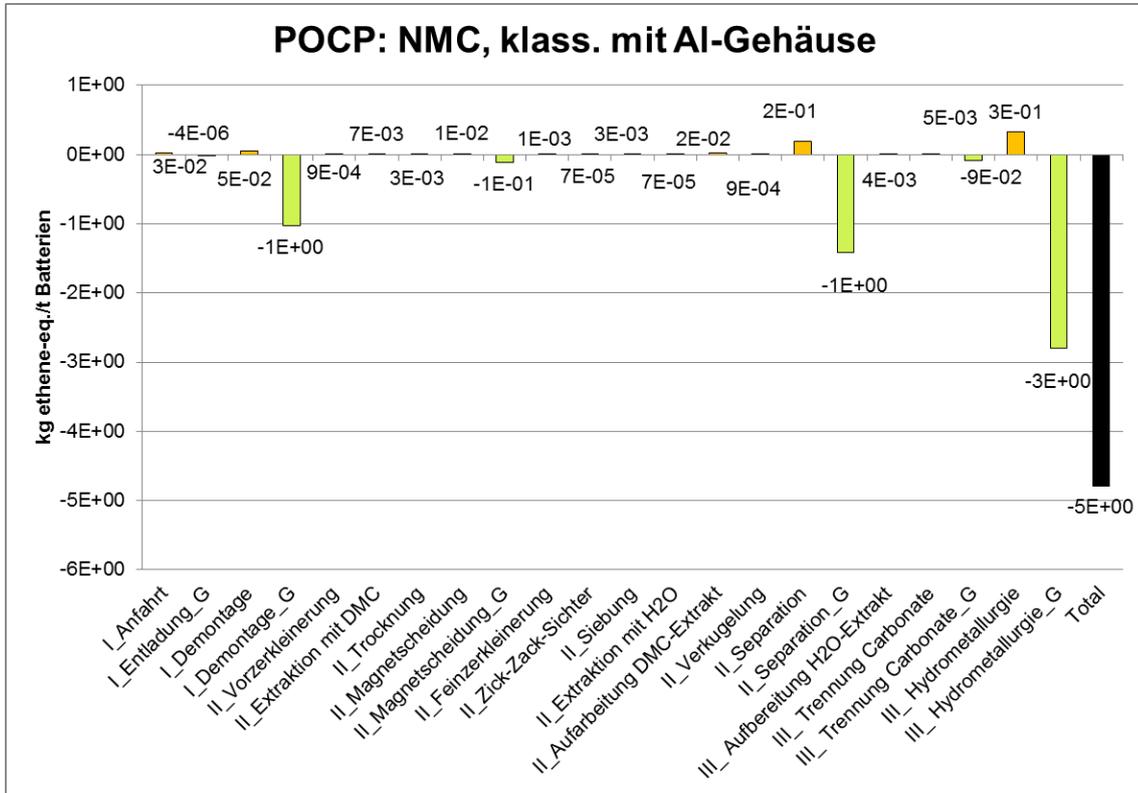


Abbildung 6-17: ADP, elem.: NMC Batterien, klassisch mit Al-Gehäuse

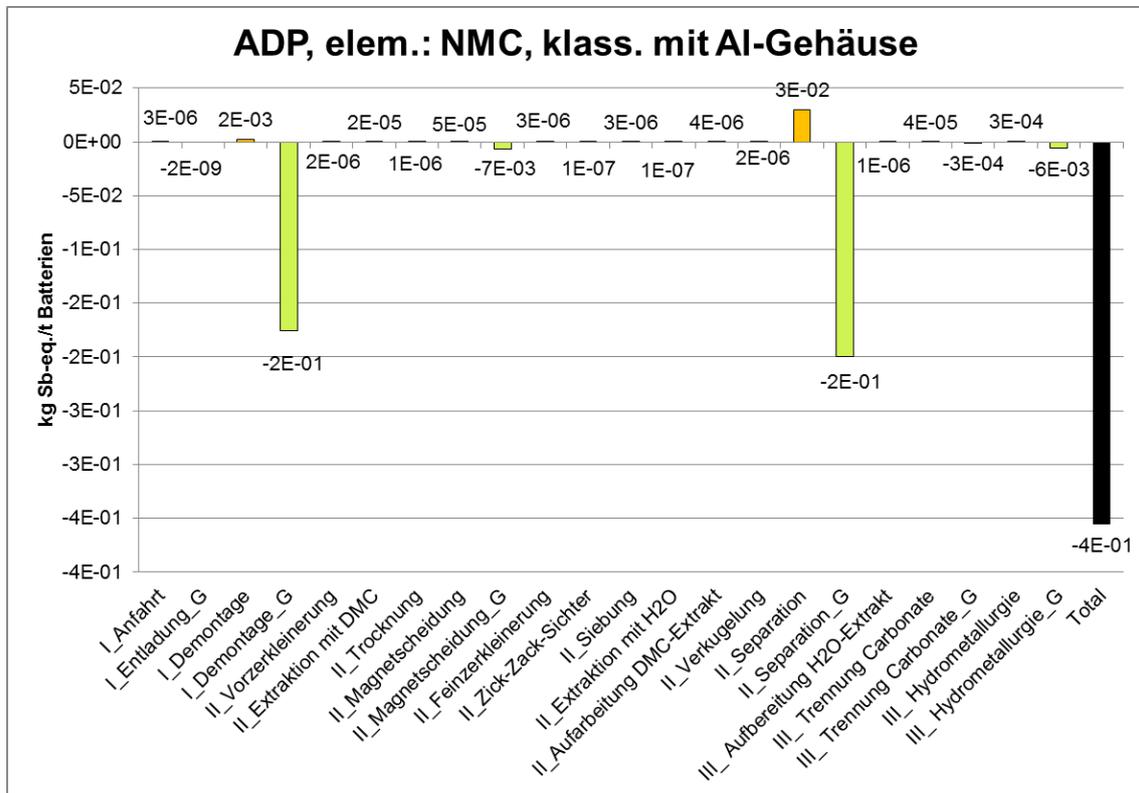
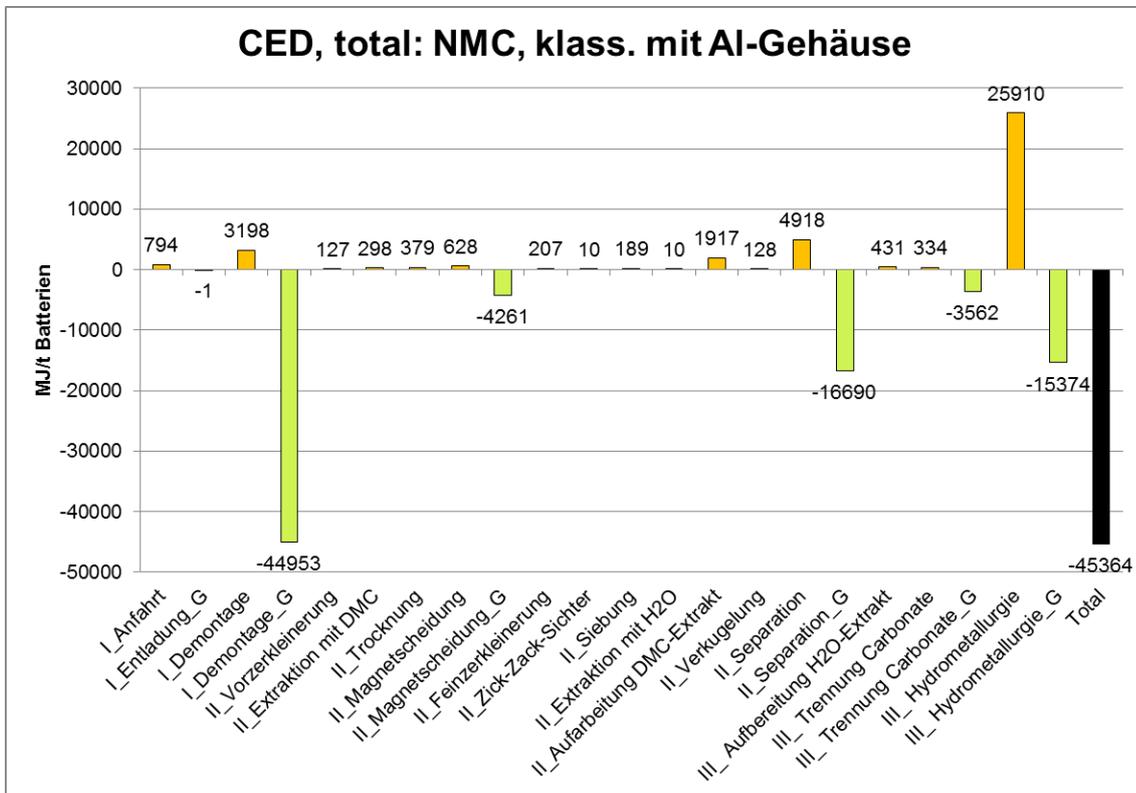


Abbildung 6-18: CED, total: NMC Batterien, klassisch mit Al-Gehäuse



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 Primärcobalt 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 des Vorgängerprojekts LithoRec I wurde bereits eine umfangreiche Sensitivität berechnet mit einem nicht-öffentlichen Datensatz von PE International (heute thinkstep), siehe [Buchert et al. 2011b]. 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 Datengenerierung 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 LithoRec II 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 vonecoinvent 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 ausecoinvent 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 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 eigentliche hydrometallurgische Aufbereitung des Aktivmaterials führt zumeist ebenfalls zu Nettogutschriften, 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- (99%), Nickel- (99%) und Manganverbindungen (99%) sowie Lithiumhydroxid (97,3%) aus dem Recycling des Aktivmaterials 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 eigentliche hydro-metallurgische 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 Hydrometallurgische Aufbereitung die Gutschrift geringer, da nur Lithiumhydroxid, 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 Wirkungskategorien aus dem ersten Schritt „Entladung und 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 Entladung und 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 „Entladung und Demontage“. Die Gutschriften für die Entnahme und das Recycling des Gehäusematerials fallen bei Edelstahl moderat und bei den kohlefaserverstärkten Kunststoffen deutlich geringer aus.

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 herkömmlichem (aber schwererem) Edelstahlgehäuse von Interesse. Aussagen hierzu können jedoch im Rahmen dieser Ökobilanz aufgrund der gesetzten Systemgrenzen nicht getroffen werden.

Die Ökobilanzergebnisse zum LithoRec II-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 LithoRec-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 LithoRec II-Recyclingverfahren bei alle Batterietypen in den untersuchten Wirkungskategorien vorteilhaft ab. Allerdings trägt der eigentlich technologisch neue hydrometallurgische Prozess dazu in der Regel weniger bei als die vorgelagerte Modul- und Zelltrennung. Bei einzelnen Umweltwirkungen, wie z.B. dem Treibhauspotential, ist der Beitrag dieser Prozessstufe sogar negativ. Deshalb sollte in der weiteren Verfahrensentwicklung eine weitere Optimierung hinsichtlich des Hilfsstoffs- und Energieverbrauchs im hydrometallurgischen Schritt stattfinden.

Die Ökobilanzergebnisse zum LithoRec II-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. Erneute LCA-Studien zur Validierung der Ergebnisse dieser Studie in einigen Jahren werden empfohlen, wenn das Recyclingverfahren nach LithoRec II 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., Sleswijk 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 Sleswijk 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 sci-entific 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; 1st 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
Werkstoffrecycling	EU-27: Aluminiumrecycling (2010)	GaBi v6.0
	RER: L_Kupfer, sekundär, ab Raffinerie	ecoinvent v2.2
	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_Lithiumcarbonat, ab Werk	ecoinvent v2.2, invertiert
	GLO: G_Lithiumhydroxid, 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: Thermische Energie aus Erdgas PE	GaBi v6.0
Hilfsstoffe	RER: Schmieröl, ab Werk	ecoinvent v2.2
	DE: Schwefelsäure (96%) PE	GaBi v6.0

	DE: Wasserstoffperoxid (50%) PE	GaBi v6.0
	DE: Salzsäure (32%) PE	GaBi v6.0
	RER: Stickstoff, flüssig, ab Werk	ecoinvent v2.2
	RER: Stahl ECCS worldsteel	GaBi v6.0
	DE: Wasser (entsalzt, deionisiert) PE	GaBi v6.0
Entsorgung	EU-27: Abwasserbehandlung (anorganisch und organisch leicht belastet) ELCD/PE	GaBi v6.0
	EU-27: Deponie von Eisenmetallen ELCD/PE	GaBi v6.0
	RER: MVA_Hausmüll-ohne-E-Rück-Graphit ELCD/PE	GaBi v6.0
	DE: MVA_Polypropylen (PP)-ohne-E-Rück PE	GaBi v6.0
	CH: Entsorgung Lösemittelgemisch, 16,5% Wasser	ecoinvent v2.2
Transport/Maschinen	GLO: LKW ELCD/PE-GaBi	GaBi v6.0
	GLO: LKW PE	GaBi v6.0
	GLO: Betrieb, LKW, 3,5-16t, Flottendurchschnitt	GaBi v6.0
	DE: Diesel Mix, ab Raffinerie PE	GaBi v6.0
	RER: Aushub Hydraulikbagger	ecoinvent v2.2

Annex 2: Externes kritisches Gutachten

Kritische Prüfung der Studie

ÖKOBILANZEN ZUM RECYCLINGVERFAHREN LITHOREC II 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 10.11.2015 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 einer kurzfristigen, unwetterbedingten Sperrung der Bahnstrecke nicht persönlich an dieser Sitzung teilnehmen, wurde aber über die Ergebnisse im Nachgang informiert.

Zu 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 12. September 2015. Der Sachverständige hat den Bericht umfassend analysiert und auf Normkonformität geprüft. Die Prüfung ergab insgesamt 60 Hinweise genereller, technischer und redaktioneller Art, die dem Auftraggeber am 01. Oktober 2015 übermittelt wurden. Der zweite, überarbeitete Entwurf des Abschlußberichtes wurde dem Prüfer am 20. Oktober 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 27. Oktober 2015 an den Auftraggeber übermittelt wurden. Die finale Version des Abschlußberichtes wurde dem Prüfer am 11. 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.

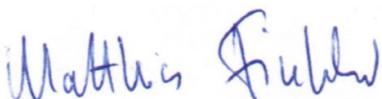
Bewertung

Die Ökobilanz dient zur projektbegleitenden Bewertung des Recyclingverfahrens des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderten Projektes „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec II), das unter der Koordination der Rockwood Lithium GmbH mit den Verbundpartnern Audi AG, Electrocyling GmbH, H. C. Starck GmbH, Hosokawa Alpine AG, I+ME ACTIA GmbH, Solvay Fluor GmbH, Volkswagen AG, Universität Münster und der TU Braunschweig durchgeführt wurde. Den beteiligten Verbundpartnern sollen damit zeitnah die ökologischen Vorteile und Schwachstellen des entwickelten Verfahrens 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
12. November 2015