

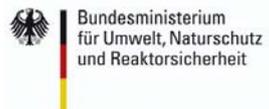
Verbundprojekt: Entwicklung eines realisierbaren Recycling- konzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LiBRi

Teilprojekt: LCA der Recyclingverfahren

Darmstadt, 31. Oktober 2011

Endbericht

*Gefördert durch das Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*



Autoren:

Matthias Buchert

Wolfgang Jenseit

Cornelia Merz

Doris Schüler

Öko-Institut e.V.
Freiburg Head Office
P.O. Box 17 71
79017 Freiburg, Germany
Tel. +49 (0) 7 61 – 45 295 - 0
Fax +49 (0) 7 61 – 45 295 - 288
Street Address
Merzhauser Str. 173
79100 Freiburg, Germany
Tel. +49 (0) 761 – 45 295 - 0
Fax +49 (0) 761 – 45 295 - 288

Darmstadt Office
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt, Germany
Tel. +49 (0) 6151 – 81 91 - 0
Fax +49 (0) 6151 – 81 91 - 133

Berlin Office
Schicklerstr. 5-7
10179 Berlin, Germany
Tel. +49 (0) 30 – 40 50 85 - 0
Fax +49 (0) 30 – 40 50 85 - 388

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Zusammenfassung	1
2 Hintergrund der Studie und Aufbau des Berichts	6
3 Ziele und Untersuchungsrahmen	8
3.1 Ziele und Anwendungen der Studie	8
3.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens	8
3.2.1 Funktion und funktionelle Einheit	8
3.2.2 Festlegung der Systemgrenzen	10
3.2.3 Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität	11
3.2.4 Allokation	12
3.2.5 Gutschriften	13
3.2.6 Berücksichtigte Wirkungskategorien	14
3.2.7 Methoden der Auswertung	17
3.2.8 Konformität und kritische Prüfung	17
3.2.9 Einschränkungen, Verwendung und Zielgruppen	18
3.2.10 Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts	19
4 Sachbilanz	20
4.1 Prozessbeschreibung	20
4.2 Datengrundlage	21
4.2.1 Spezifische Daten	21
4.2.2 Generische Datensätze	24
4.2.3 Modellierung der Gutschriften	25
4.2.4 Modellierung der Transporte	28
4.2.5 Modellierung der Entsorgung	30
4.3 Einschätzung der Datenqualität	30

4.4	Ausgewählte Ergebnisse der LCI: Materialflüsse	31
5	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	38
5.1	Ergebnisdarstellung nach Prozessschritten	38
5.1.1	Treibhauspotenzial (GWP)	38
5.1.2	Elementarer Ressourcenverbrauch ($ADP_{\text{elem.}}$)	42
5.1.3	Versauerungspotenzial (AP)	44
5.1.4	Eutrophierungspotenzial, Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial und nicht erneuerbarer Kumulierter Energieaufwand (EP, POCP, KEA n.e.)	47
5.2	Zusammenfassende Darstellung	48
5.3	Normierte Darstellung	53
6	Auswertung	55
6.1	Identifizierung der signifikanten Parameter	55
6.2	Beurteilung	58
6.2.1	Vollständigkeitsprüfung	58
6.2.2	Sensitivitätsprüfung	58
6.2.2.1	Alternativmaterialien für das Batteriegehäuse	58
6.2.2.2	Sensitivität Nickel-Datensatz	66
6.2.2.3	Sensitivität Kobalt-Datensatz	69
6.2.2.4	Sensitivität unterschiedlicher ADP-Bewertungsschemata	72
6.2.2.5	Sensitivität ADP und KEA	76
6.2.2.6	Sonderauswertung: Herkunft der Emissionen für saure Gase (AP)	78
6.2.3	Konsistenzprüfungen	79
6.3	Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen	79
7	Referenzen	83
Annex 1: Externes kritisches Gutachten		1
Annex 2: Verwendete generische Datensätze		1
Annex 3: Detaillierte Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für das LiBRi-Verfahren		1
Annex 4 (vertraulich): Zusammenstellung der Rohdaten		1

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1	Systemgrenze des LiBRi-Prozesses, FU: Recycling von 1000 kg EoL-Batterien	11
Abbildung 4.1	Zusammensetzung des Batterieinputs in den Recyclingprozess nach Bauteilen	31
Abbildung 4.2	Zusammensetzung des Batterieinputs in den Recyclingprozess nach Materialien	32
Abbildung 4.3	Massen der Materialien, für die bei der Batterie- und Modulzerlegung (Dismantling) Gutschriften erteilt wurden (bereinigt um Aufbereitungsverluste) Gesamtmasse zur Gutschrift im DM: 361 kg	33
Abbildung 4.4	Elementare Zusammensetzung der Zellen, die als Eingangsstrom der Pyrometallurgie zugeführt werden	34
Abbildung 4.5	Zusammensetzung der Legierung; Gesamtmasse: 151 kg	35
Abbildung 4.6	Zusammensetzung der Schlacke; Gesamtmasse: 367 kg	35
Abbildung 4.7	Materialien aus der Zellaufbereitung, für die Gutschriften erteilt werden (bereinigt um Aufbereitungsverluste); Gesamtmasse zur Gutschrift bei LiBRi aus CN, SR: 235 kg	36
Abbildung 5.1	Treibhauspotenziale bei der Batterie- und Modulzerlegung	39
Abbildung 5.2	Treibhauspotenziale des pyrometallurgischen Schrittes	40
Abbildung 5.3	Treibhauspotenziale bei der Kobalt-Nickel-Raffination	40
Abbildung 5.4	Treibhauspotenziale bei der Schlackeaufbereitung	41
Abbildung 5.5	Elementarer Ressourcenverbrauch bei der Batterie- und Modulzerlegung	42
Abbildung 5.6	Elementarer Ressourcenverbrauch des pyrometallurgischen Schrittes	43
Abbildung 5.7	Elementarer Ressourcenverbrauch bei der Kobalt-Nickel-Raffination	43
Abbildung 5.8	Elementarer Ressourcenverbrauch bei der Schlackeaufbereitung	44
Abbildung 5.9	Versauerungspotenziale bei der Batterie- und Modulzerlegung	45
Abbildung 5.10	Versauerungspotenziale des pyrometallurgischen Schrittes	46
Abbildung 5.11	Versauerungspotenziale bei der Kobalt-Nickel-Raffination	46
Abbildung 5.12	Versauerungspotenziale bei der Schlackeaufbereitung	47
Abbildung 5.13	Treibhauspotenziale des LiBRi-Verfahrens	49
Abbildung 5.14	Elementarer Ressourcenverbrauch des LiBRi-Verfahrens	50
Abbildung 5.15	Versauerungspotenziale des LiBRi-Verfahrens	50
Abbildung 5.16	Eutrophierungspotenziale des LiBRi-Verfahrens	51

Abbildung 5.17	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial des LiBRi-Verfahrens	52
Abbildung 5.18	Nicht erneuerbarer Kumulierter Energieaufwand des LiBRi-Verfahrens	53
Abbildung 5.19	Normierte Emissionen des LiBRi-Verfahrens	54
Abbildung 6.1	Massen der Materialien, für die bei der Batterie- und Modulzerlegung (Dismantling) Gutschriften erteilt wurden (bereinigt um Aufbereitungsverluste), Alu-Gehäuse	60
Abbildung 6.2	Massen der Materialien, für die bei der Batterie- und Modulzerlegung (Dismantling) Gutschriften erteilt wurden (bereinigt um Aufbereitungsverluste), CFK-Gehäuse	61
Abbildung 6.3	Treibhauspotenziale bei der Batterie- und Modulzerlegung, Alu-Gehäuse	61
Abbildung 6.4	Elementarer Ressourcenverbrauch bei der Batterie- und Modulzerlegung, Alu-Gehäuse	62
Abbildung 6.5	Versauerungspotenziale bei der Batterie- und Modulzerlegung, Alu-Gehäuse	63
Abbildung 6.6	Treibhauspotenzial des LiBRi-Verfahrens, Alu-Gehäuse	63
Abbildung 6.7	Treibhauspotenziale bei der Batterie- und Modulzerlegung, CFK-Gehäuse	64
Abbildung 6.8	Elementarer Ressourcenverbrauch bei der Batterie- und Modulzerlegung, CFK-Gehäuse	65
Abbildung 6.9	Versauerungspotenziale bei der Batterie- und Modulzerlegung, CFK-Gehäuse	65
Abbildung 6.10	Treibhauspotenzial des LiBRi-Verfahrens, CFK-Gehäuse	66
Abbildung 6.11	Differenz der Umweltindikatoren für Nickel aus den Ökobilanzdaten ecoinvent und Nickelinstitut. Die Indikatoren aus ecoinvent werden auf 100 indexiert.	68
Abbildung 6.12	Auswirkungen der verschiedenen Datensätze für Nickel aus den Ökobilanzdaten ecoinvent und Nickelinstitut für das Treibhauspotenzial (GWP) und Versauerung (AP). GWP (kg/FU); AP (kg/FU * 10)	68
Abbildung 6.13	Vergleich ausgewählter Ergebnisse und des Gesamtergebnisses für das Treibhauspotenzial (GWP) des LiBRi-Verfahrens, nach ecoinvent und PE Datensatz für Kobalt und Nickel	71
Abbildung 6.14	Vergleich ausgewählter Ergebnisse und des Gesamtergebnisses für das Versauerungspotenzial (AP) des LiBRi-Verfahrens, nach ecoinvent und PE Datensatz für Kobalt und Nickel	72
Abbildung 6.15	Gegenüberstellung der Ergebnisse für ADP_{elem} für die Charakterisierungsfaktoren $ur = ultimate\ reserve$ und $rb = reserve\ base$.	74

Abbildung 6.16	KEA, ADP_{fossil} , $ADP_{\text{elem.,ur}}$ und ADP_{gesamt} für das Recycling von Lithiumbatterien (LiBRi)	77
Abbildung 6.17	Differenzierung der Aufwendungen und Gutschriften nach Herkunft, global, lokal und diverse.	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1	Wirkungskategorien [UBA 1995]	14
Tabelle 3.2	Charakterisierungsfaktoren für den ADP_{elem} ultimate reserve	16
Tabelle 4.1	Generische Zusammensetzung der Batterietypen (NMC, NCA, LFP) wie in der LCA-Umbrellagruppe abgestimmt; zusätzlich LiBRi-Input-Mischung im Basisszenario (Zellverhältnis 35-35-30)	23
Tabelle 4.2	Herkunft der prozessspezifischen Daten	24
Tabelle 4.3	Gegenüberstellung der rezyklierten Materialien, des angelasteten Recyclingprozesses sowie der für das Recyclingmaterial erteilten Gutschrift	27
Tabelle 4.4	Annahmen bei der Modellierung der Transporte	29
Tabelle 4.5	Angesetzte Recyclingeffizienzen für die bei der Batterie- und Modulerlegung (Dismantling) anfallenden Materialströme	33
Tabelle 5.1	Verwendete Normierungsfaktoren [Quelle: CML, 2010]	53
Tabelle 6.1	Für die Bilanzierung zugrunde gelegte Massen für das Aluminium- und das CFK-Gehäuse	59
Tabelle 6.2	Für die Modellierung der Steinkohlesubstitution im Zementwerk zugrunde gelegte Daten	60
Tabelle 6.3	Ergebnis der Umweltindikatoren für Nickel aus den Ökobilanzdaten ecoinvent und Nickelinstitut	67
Tabelle 6.4	Vergleich des Treibhauspotenzials (GWP), Versauerungspotenzials (AP) und des Kumulierten Energieaufwandes (KEA n.e.) für Kobalt und Nickel aus den Datenquellen PE, ecoinvent und Nickelinstitut	70
Tabelle 6.5	Charakterisierungsfaktoren für ADP auf Basis der „ultimate reserve“ und der „reserve base“	73

Abkürzungsverzeichnis

ABK	Aufbereitung Kathodenmaterial
ADP _{elem.}	Abiotic Depletion Potential (elements), elementarer Ressourcenverbrauch
ADP _{elem.,rb}	Abiotic Depletion Potential (elements), reserve base
ADP _{elem.,ur}	Abiotic Depletion Potential (elements), ultimate reserve
ADP _{fossil}	Abiotic Depletion Potential, fossile Energieträger
ADP _{gesamt}	Abiotic Depletion Potential, ADP _{elem.} + ADP _{fossil}
AP	Acidification Potential, Versauerungspotenzial
BMS	Batteriemanagementsystem
CFK	Carbon-Filtre-Composites
CN	Kobalt-Nickel-Raffination, Cobalt-Nickel-Refining
DM	Dismantling, Batterie- und Zellzerlegung
EoL	End of Life
EP	Eutrophication Potential, Eutrophierungs-/Überdüngungspotenzial
FU	Funktionelle Einheit
GWP	Global Warming Potential
KEA n.e.	Kumulierter Energie-Aufwand nicht erneuerbar
LCA	Life Cycle Assessment, Ökobilanz
LCI	Life Cycle Inventory Analysis, Sachbilanz
LFP	Lithiumeisenphosphat
NCA	Nickel/Kobalt/Aluminium
NMC	Nickel/Mangan/Kobalt
ODP	Ozone Depletion Potential
ODS	Ozone Depleting Substances
PA	Polyamid
PM	Pyrometallurgie
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential, Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (Sommersmog)
SR	Schlackeaufbereitung, Slag Refining
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

1 Zusammenfassung

Das Projekt LiBRi wurde zwischen Sommer 2009 und Herbst 2011 unter der Koordination der Umicore AG & Co. KG, Hanau mit den Verbundpartnern Daimler AG, TU Clausthal, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik und Öko-Institut e.V. durchgeführt. Die Eigendarstellung von LiBRi findet sich unter:

<http://www.pt-elektromobilitaet.de/projekte/batterierecycling/libri>

Das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit geförderte Projekt LiBRi ist eines von zwei parallelen BMU-Projekten, welche die Entwicklung von Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Traktionsbatterien zum Gegenstand haben. Das Öko-Institut war für die Konzeption und Realisierung der LCA-Arbeiten verantwortlich. Zusätzlich koordinierte das Öko-Institut die Arbeiten der Umbrellagruppe LCA, die sich aus ausgewählten Vertretern der beiden BMU-Projekte LiBRi und LithoRec 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. LiBRi und LithoRec und dem Interessenschutz einzelner Partner ohne Abstriche Rechnung trägt.

Die Ökobilanz bzgl. des LiBRi-Recyclingverfahrens wurde gemäß ISO 14040/14044 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. 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 Ökobilanz dient zur Unterstützung der Bewertung des sich in Entwicklung befindlichen Recyclingverfahrens im Rahmen des LiBRi-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 LiBRi entwickelten Recyclingverfahrens ist durch das Recycling von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien aus dem Automobilbereich definiert, wobei die Rückgewinnung von Metallverbindungen (Kobalt-, Nickel- und Lithiumverbindungen) in batteriefähiger Qualität für die Elektrodenherstellung im Vordergrund steht. Nichtdestoweniger war aufgrund der komplexen Zusammensetzung der Lithium-Ionen-Traktionsbatterien 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.

Nach umfangreichem gemeinsamen Datenstudium durch die Mitglieder der Umbrellagruppe LCA und vor dem Hintergrund des Expertenwissens aus den LiBRI- und LithoRec-Projektbünden (Vertreter der Automobilindustrie, Materialforschung und -bereitstellung, Batterietechnik, Recyclingwirtschaft) bzgl. der Relevanz des Systems für den zukünftigen europäischen Markt wurde sich zunächst auf die folgenden drei Kathodentypen von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien verständigt:

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

Weiterhin wurden nach Varianzuntersuchungen jeweils das generische Gewicht und die generische Zusammensetzung für jeden der drei oben aufgeführten 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.

Da das LiBRI-Recyclingverfahren nicht auf ein separates Recycling einzelner Batterietypen ausgelegt ist und daher – in gewissen Grenzen – stets Mischungen von diversen Zelltypen im zentralen pyrometallurgischen Schritt einsetzt, wurde sich für die Bilanzierung auf ein Szenario verständigt, welches das Recycling einer Mischung von 35 % NMC-, 35 % NCA- und 30 % LFP-Zellen der definierten generischen Batterietypen beschreibt.

Die funktionelle Einheit und der Referenzfluss für die Ökobilanz des LiBRI-Verfahrens sind das Recycling von 1000 kg Batterien entsprechend der Szenariomischung (NMC = 35 %, NCA = 35 %, LFP = 30 % bezogen auf das Zellgewicht der einzelnen Typen).

Die Systemgrenzen für die Bilanzierung des LiBRI-Recyclingverfahrens, wie in Abbildung 3.1 gezeigt, umfassen die folgenden Module:

- Entladung und Zerlegung der Batteriesysteme bis auf Zellebene,
- pyrometallurgische Behandlung zur Gewinnung einer Kobalt/Nickel/Kupfer-reichen Legierung,
- hydrometallurgische Behandlung und chemische Auftrennung der Legierung zur Gewinnung von Kobalt- und Nickelsulfat (jeweils in batteriefähiger Qualität) sowie „Kupferzement“ als Nebenprodukt,
- hydrometallurgische Behandlung der aus dem pyrometallurgischen Prozess erhaltenen Schlacke zur Gewinnung von Lithiumcarbonat (batteriefähige Qualität).

Die Gesamtauswertung der Ökobilanzergebnisse für das Mischungsszenario NMC:NCA:LFP = 35 %:35 %:30 % ergab für die Wirkungskategorien Versauerungspotenzial (AP), Verbrauch an abiotischen Ressourcen ($ADP_{elem.}$, ohne Energieträger), Eutrophierung und Bildung von

Photooxidantien z. T. deutliche Nettogutschriften. Nicht zuletzt die Ergebnisse bzgl. des Versauerungspotenzials und des Verbrauchs an abiotischen Ressourcen waren für ein Recyclingverfahren, welches primär auf die Gewinnung von Sekundärmetallen bzw. deren Verbindungen zielt, zu erwarten (Gutschriften bzgl. abiotischer Primärressourcen sowie Säurebildneremissionen aus der Erzaufbereitung).

Bezüglich der Wirkungskategorien Treibhausgasemissionen (GWP) und KEA n.e. ergeben sich insgesamt Nettolasten für den Recyclingprozess nach dem jetzigen Entwicklungsstand. Wesentliche Beiträge zu den Lasten ergeben sich vor allem aus den Modulen Pyrometallurgie sowie Lithiumcarbonatgewinnung aus der Schlackeaufbereitung. Ein Verzicht auf die Schlackeaufbereitung zur Lithiumcarbonatgewinnung bei gleichzeitiger Verwendung der Schlacke als Zementzuschlag ergäbe auch für GWP und KEA n.e. im Falle des LiBRi-Recyclingprozesses (unveränderte Beibehaltung der Module Zerlegung, Pyrometallurgie und Kobalt-/Nickel-Raffination) aller Voraussicht nach eine Nettogutschrift.

Positive Beiträge, d. h. deutliche Nettogutschriften, ergaben sich für alle Wirkungskategorien aus dem 1. Schritt „Entladung und Zerlegung“. Verantwortlich hierfür sind vor allem hohe Gutschriften für die Rückgewinnung von Wertstoffen wie z. B. 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 ist. Die Zellmaterialien sind zwar 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, welche 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.

Die Normierungsergebnisse für die betrachteten Wirkungskategorien zeigen, dass $ADP_{elem.}$ und AP in ihrer spezifischen Relevanz ungefähr gleich, GWP und POCP etwas und EP deutlich geringer sind. Für die betrachtete Ökobilanz des LiBRi-Recyclingverfahrens wurden die Ergebnisse zu den Wirkungskategorien Treibhausgaspotenzial (GWP), Verbrauch abiotischer Ressourcen ($ADP_{elem.}$) sowie Säurebildner (AP) besonders intensiv ausgewertet, da sie bzgl. des betrachteten Recyclingsystems von besonderem Interesse sind.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen bzgl. alternativer (und leichter) Gehäusematerialien (Aluminium bzw. kohlefaserverstärkte Kunststoffe) unterstützen den Befund der Relevanz des 1. Schrittes Entladung und Zerlegung. Die Gutschriften für die Entnahme und das Recycling des Gehäusematerials fallen bei Aluminium moderat und bei den kohlefaserverstärkten Kunststoffen deutlich geringer aus. Hier muss an dieser Stelle

unbedingt auf die Systemgrenzen der vorliegenden Ökobilanz hingewiesen werden. Es werden 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.

Wegen der hohen Bedeutung der Kobalt- und Nickelgutschrift für zurückgewonnene batteriefähige Kobalt- und Nickelverbindungen für die Ökobilanz im Falle des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien wurde eine Sensitivitätsrechnung bzgl. der externen Datensätze für Primärkobalt und -nickel durchgeführt. Dafür wurde der öffentlich zugängliche ecoinvent-Datensatz (in ecoinvent ist Primärkobalt als Hilfsprozess klassifiziert mit entsprechend eingeschränkter Qualität und Dokumentationsstiefe) durch einen speziellen Datensatz für Primärkobalt und -nickel ersetzt, der von PE International erstellt wurde [PE 2005]. Für die Wirkungskategorie GWP ergibt sich mit diesem Datensatz eine moderate Gesamtgutschrift (inkl. Lithiumcarbonatgewinnung aus der Schlackeaufbereitung) für den LiBRi-Recyclingprozess anstatt einer Gesamtlast. Dies ist in erster Linie auf erheblich höhere Gutschriften für Primärkobalt und untergeordnet auf höhere Gutschriften für Primärnickel zurückzuführen. Das Ergebnis dieser Sensitivitätsanalyse unterstreicht die hohe Relevanz externer Datensätze für das Gesamtergebnis. Für die wichtigen Batteriemetalle Nickel und vor allem Kobalt sind daher in naher Zukunft aktualisierte Datensätze für die Förderung und Produktion der Primärmetalle – vor dem Hintergrund starker Dynamiken in den globalen Produktionsstrukturen bei diesen Metallen (neue Minen, Refininganlagen, neue Aufbereitungstechnologien etc.) – von sehr hoher Bedeutung für die Ergebnisse von Ökobilanzen.

Die Ökobilanzergebnisse zum LiBRi-Recyclingverfahren müssen unter dem Vorbehalt bewertet werden, dass einerseits eine Reihe von Sachbilanzdaten auf Einzel- und Laborversuchen bzw. Prozesssimulationen beruhen. Andererseits sind bei einer großtechnischen Umsetzung durchaus noch nennenswerte Optimierungspotenziale möglich oder gar wahrscheinlich. Dies betrifft vor allem mögliche Nettoenergieeinsparungen im pyrometallurgischen Prozess und bei der hydrometallurgischen Behandlung der Schlacke.

Weiterhin muss darauf hingewiesen werden, dass der pyrometallurgische Prozess für die Aufnahme der Batteriezellen von Umicore in der Praxis mit einem gemischten Input aus Lithium-Ionen-Batterien und Nickelmetallhydrid-Batterien (diese können sowohl aus der Konsumerelektronik als auch aus dem Automobilsektor kommen) gefahren wird. Dies hat prozesstechnische Vorteile und sorgt auch heute bereits für eine bessere Kapazitätsauslastung der entsprechenden Anlage (Nickelmetallhydrid-Batterien sind z. B. in Hybridfahrzeugen schon länger und in größerer Stückzahl auf dem Markt). Da das Recycling

von Nickelmetallhydrid-Batterien nicht Gegenstand des LiBRi-Projektes ist, wurden die Sachbilanzen etc. daher hier auf einen reinen Input von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien (konkret nach der Szenarienmischung) bezogen. Schließlich ist hervorzuheben, dass die Ergebnisse dieser Ökobilanz für das Batterierecycling nach dem LiBRi-Verfahren keinesfalls mit den Ökobilanzergebnissen anderer Batterierecyclingverfahren verglichen werden können. Es wurde in diesem Sinne keine vergleichende Ökobilanz durchgeführt.

Der Wasserverbrauch durch das Recyclingsystem wurde nicht in die Sachbilanz einbezogen. Eine überschlägige Analyse ergab, dass die wesentlichen Wasserverbräuche in externen Vorketten (z. B. Strombereitstellung, Metallherstellung) auftreten und nicht in den eigentlichen Kernprozessen des Recyclingprozesses. Daher wurde auf eine vertiefende Analyse verzichtet. Ebenfalls wurde auf die Bilanzierung des ODP (ozone depletion potential) verzichtet.

Die LCA-Arbeiten im Rahmen von LiBRi unterstreichen die Sinnhaftigkeit der LCA-Methodik bzgl. Recyclingverfahren im Forschungs- und Entwicklungsstadium: Sie hat einen Beitrag zur Transparenz und zum Verständnis der Prozesse und der mit ihnen möglicherweise verbunden Umweltwirkungen geleistet. Die Sichtbarmachung allgemeiner Datenfragen (z. B. Kobalt) bei der Bilanzierung der Umweltwirkungen der im Rahmen der Elektromobilität benötigten Rohstoffe wurde erzielt. Hiervon sollten auch zukünftige Projekte profitieren können. Erneute LCA-Studien zur Validierung der Ergebnisse dieser Studie in einigen Jahren werden empfohlen, wenn das Recyclingverfahren nach LiBRi in allen wesentlichen Schritten in die großtechnische Umsetzung gelangt ist.

2 Hintergrund der Studie und Aufbau des Berichts

Die LCA-Arbeit ist als begleitende Untersuchung für die Entwicklung eines Recyclingverfahrens für Lithium-Ionen-Batterien aus dem Automobilsektor (hier nach dem Weg des LiBRi-Projektes) angelegt. Das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit geförderte Projekt Lithium Batterie Recycling Initiative – LiBRi (ausführlicher Titel: „Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge“) ist eines von zwei parallelen BMU-Projekten, die die Entwicklung von Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Traktionsbatterien zum Gegenstand haben. Zur Begründung für die Förderung dieser Projekte führt das BMU aus:

Da Elektrofahrzeuge noch vor ihrer breiten Markteinführung stehen, liegen sowohl für Sammel- und Rückführkonzepte als auch für das Recycling von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien kaum Erfahrungswerte vor. Bekannte Verfahren sind auf Li-Ionen-Batterien für portable Elektronik ausgerichtet, arbeiten mit unzureichenden Rückgewinnungsquoten und vernachlässigen Lithium als wertvolle Ressource. Da bereits heute abzusehen ist, dass zukünftig Li-Ionen-Traktionsbatterien mit unterschiedlichen Materialzusammensetzungen auf dem Markt sein werden (z. B. Lithium-Eisenphosphat, kobaltbasierte Systeme), können sich auch verschiedene Recyclingverfahren als geeignet erweisen. Daher werden im Förderschwerpunkt Batterierecycling zwei Projekte gefördert, die im Bereich der metallurgischen Prozesse – das Projekt [LithoRec](#) mit hydrometallurgischen Verfahren, das Projekt [LiBRi](#) mit pyrometallurgischen Verfahren – unterschiedliche Ansätze verfolgen. Mit der frühzeitigen Entwicklung von Recyclingverfahren für Li-Ionen-Batterien tragen die Projekte LiBRi und LithoRec zur zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Automobil- und Zulieferindustrie bei. Zudem sind die Verfahren zur Rückgewinnung von Lithium und Kobalt sowohl von ökologischer Bedeutung als auch von strategischer Bedeutung für die Sicherung von Rohstoffen für die Batterieproduktion in Deutschland.

<http://www.pt-elektromobilitaet.de/projekte/batterierecycling>

Das Projekt LiBRi wurde zwischen Sommer 2009 und Herbst 2011 unter der Koordination der Umicore AG & Co. KG, Hanau mit den Verbundpartnern Daimler AG, TU Clausthal, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik und Öko-Institut e.V. durchgeführt. Die Eigendarstellung von LiBRi findet sich unter:

<http://www.pt-elektromobilitaet.de/projekte/batterierecycling/libri>

Das Öko-Institut war für die Konzeption und Realisierung der LCA-Arbeiten verantwortlich. Zusätzlich koordinierte das Öko-Institut die Arbeiten der Umbrellagruppe LCA, die sich aus ausgewählten Vertretern der beiden BMU-Projekte LiBRi und LithoRec 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. LiBRi und LithoRec und dem Interessenschutz einzelner Partner ohne Abstriche Rechnung trägt.

Die Ökobilanz bzgl. des LiBRi-Recyclingverfahrens wurde gemäß ISO 14040/14044 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. 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 Berichts 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 umfasst das externe kritische Gutachten (Prof. Finkbeiner), Annex 2 listet die verwendeten generischen Datensätze auf. Annex 3 enthält detaillierte Ergebnisse der Wirkungsabschätzung in Tabellenform. Annex 4 schließlich enthält die Rohdaten der einzelnen Prozessmodule und ist daher vertraulich und nicht zur Veröffentlichung geeignet und vorgesehen.

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 LiBRi-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. Es ist ausdrücklich nicht Ziel der Studie, die im Rahmen des LiBRi-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 LiBRi 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 LiBRi-Projektes selbst. Für die LiBRi-Verbundpartner sind die Teilergebnisse für die einzelnen Module des Recyclingverfahrens ebenso interessant wie die Gesamtergebnisse. Schließlich ist die Identifizierung möglicher ökologischer Optimierungspotenziale bzgl. des Recyclingprozesses von elementarer Bedeutung.

Eine weitere Zielgruppe für die Ergebnisse sind das fördernde BMU 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 LiBRi entwickelten Recyclingverfahrens ist durch das Recycling von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien aus dem Automobilbereich definiert, wobei die Rückgewinnung von Metallverbindungen (Kobalt-, Nickel- und Lithiumverbindungen) in batteriefähiger Qualität für die Elektrodenherstellung im Vordergrund steht. Nichtdestoweniger war aufgrund der komplexen Zusammensetzung der Lithium-Ionen-Traktionsbatterien 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 noch jungen 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 LiBRi zu entwickelnde Recyclingverfahren diese Heterogenität adressieren muss.

Nach umfangreichem gemeinsamen Datenstudium durch die Mitglieder der Umbrellagruppe LCA und vor dem Hintergrund des Expertenwissens aus den LiBRi- und LithoRec-Projektbünden (Vertreter der Automobilindustrie, Materialforschung und -bereitstellung, Batterietechnik, Recyclingwirtschaft) bzgl. der Relevanz der Systems für den zukünftigen europäischen Markt wurde sich zunächst auf die folgenden drei Kathodentypen von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien verständigt:

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

Weiterhin wurden nach Varianzuntersuchungen jeweils das generische Gewicht und die generische Zusammensetzung für jeden der drei oben aufgeführten 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.

Da das LiBRi-Recyclingverfahren nicht auf ein separates Recycling einzelner Batterietypen ausgelegt ist und daher – in gewissen Grenzen – stets Mischungen von diversen Zelltypen im zentralen pyrometallurgischen Schritt einsetzt, wurde sich für die Bilanzierung auf ein Szenario verständigt, das das Recycling einer Mischung von 35 % NMC-, 35 % NCA- und 30 % LFP-Zellen der definierten generischen Batterietypen beschreibt. Die konkreten Daten bzgl. der drei Batterietypen und der daraus entwickelten Mischung finden sich in Kapitel 4.2.1 dieses Berichts.

Die funktionelle Einheit und der Referenzfluss für die Ökobilanz des LiBRi-Verfahrens sind das Recycling von 1000 kg-Batterien entsprechend der Szenariomischung (NMC = 35 %, NCA = 35 %, LFP = 30 % bezogen auf das Zellgewicht der einzelnen Typen).

Die funktionelle Einheit wird auf die Inputseite gelegt, da für diese Ökobilanz der Fokus auf dem Recyclingverfahren liegt. Die EoL-Batterien gehen lastenfrei in das zu betrachtende System ein, d. h. Herstellungsaufwendungen für die Batterien werden nicht in die Bilanz mit einbezogen. Dieses Vorgehen ist angemessen, da kein Vergleich zwischen den einzelnen Batterietypen durchgeführt werden soll. Aufgrund der Tatsache, dass das Recyclingverfahren für die Batterien einen Multi-Output-Prozess darstellt, zöge eine outputseitige Definition der funktionellen Einheit komplexe Allokationsverfahren nach sich.

3.2.2 Festlegung der Systemgrenzen

Die Systemgrenzen für die Bilanzierung des LiBRi-Recyclingverfahrens, wie in Abbildung 3.1 gezeigt, umfassen die folgenden Module:

- Entladung und Zerlegung der Batteriesysteme bis auf Zellebene,
- pyrometallurgische Behandlung zur Gewinnung einer Kobalt/Nickel/Kupfer-reichen Legierung,
- hydrometallurgische Behandlung und chemische Auftrennung der Legierung zur Gewinnung von Kobalt- und Nickelsulfat (jeweils in batteriefähiger Qualität) sowie „Kupferzement“ als Nebenprodukt,
- hydrometallurgische Behandlung der aus dem pyrometallurgischen Prozess erhaltenen Schlacke zur Gewinnung von Lithiumcarbonat (batteriefähige Qualität).

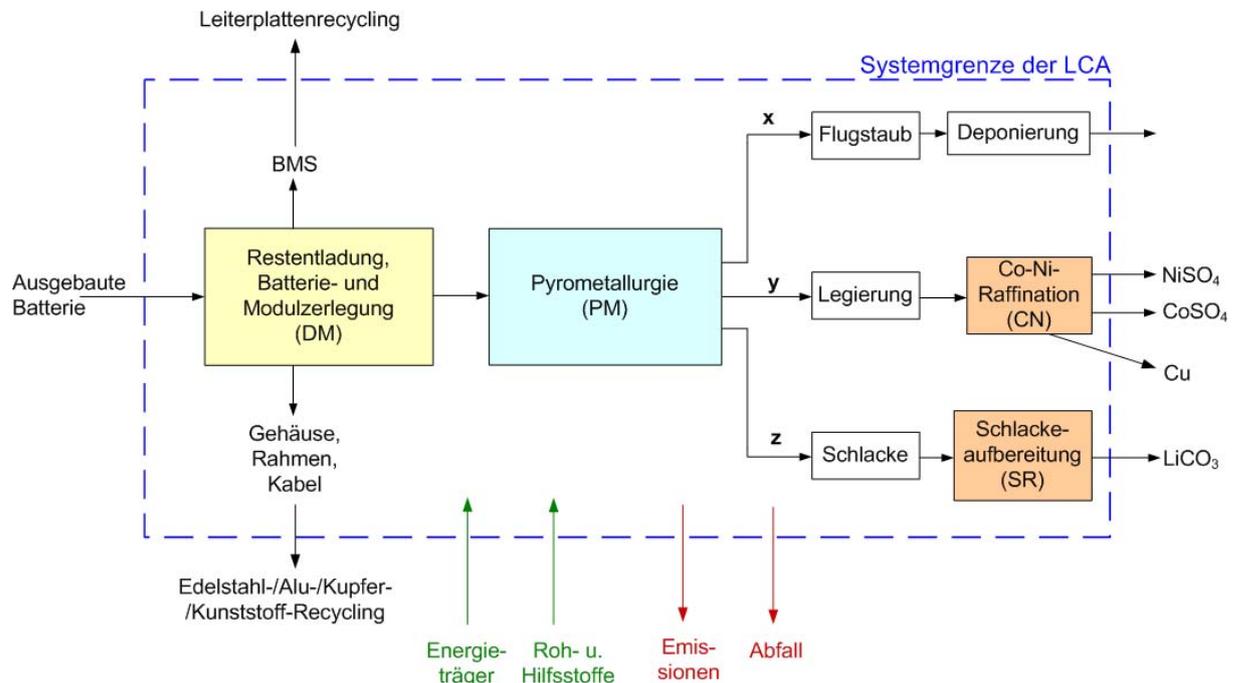


Abbildung 3.1 Systemgrenze des LiBRi-Prozesses, FU: Recycling von 1000 kg EoL-Batterien

Das Recycling der anderen Wertkomponenten (z. B. Gehäuse und Rahmen) findet außerhalb der Systemgrenzen statt und wird mit Gutschriften modelliert (siehe Kapitel 4.2.3). Die Nettogutschrift errechnet sich aus der Bruttogutschrift für das bereitgestellte Recyclingmaterial abzüglich der Lasten des Recyclings.

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

3.2.3 Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität

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 gutes Beispiel hierfür ist die Berücksichtigung der Verwertung des Batteriemanagementsystems, welches 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 exklusiven Informationen der involvierten Projektpartner. Die Daten repräsentieren für die

meisten Module (Dismantling, pyrometallurgische Behandlung zur Erzeugung einer Kobalt/Nickel/Kupfer-reichen Legierung, hydrometallurgische Schlackeaufbereitung) den Pilot-/Labormaßstab und nicht einen großtechnischen Betrieb, da dieser zum Zeitpunkt der Erstellung der Ökobilanz noch nicht realisiert ist (Ausnahme Modul Hydrometallurgische Behandlung und chemische Auftrennung der Legierung zur Gewinnung von Kobalt- und Nickelsulfat). Trotz dieser Einschränkungen sind die verfügbaren Daten nutzbar, da keine vergleichende Ökobilanz zwischen unterschiedlichen Recyclingverfahren intendiert ist.

Geographische Repräsentativität

Die Ökobilanz zum LiBRi-Recyclingverfahren hat nach Abstimmung in der Umbrellagruppe LCA den geographischen Bezug Deutschland. Entsprechend wurden geeignete einschlägige externe Datensätze (Strommix Deutschland, Belgien 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. Alle internen Daten bzgl. des Recyclingverfahrens konnten im 1. Halbjahr 2011 erhoben werden.

Diese LCA hat einen prospektiven Charakter, da sie zukünftige Prozesse abzubilden versucht, die so zurzeit nicht existieren. Aus den Pilot-/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.

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 würde allerdings der Ökonomie des Verfahrens widersprechen. Für diese 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 hier bei der Anwendung 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 v4.4 bzw. ecoinvent v2.01 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 Quelle/Dokumentation entnommen werden.

3.2.5 Gutschriften

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 die zentrale Rolle zu.

Innerhalb der Systemgrenze werden daher Prozesse modelliert, die aus den Stoffströmen zu bewertbaren Produkten führen. Diese Prozesse werden als (ökologische) Aufwendungen aufgeführt. Diesen Prozessen werden dann die Gutschriften durch Standardprodukte aus den Literaturdatenbanken gegenübergestellt.

Eine Diskussion der detaillierten Prozesse der Gutschriften findet im Kapitel 4.2.3 statt.

3.2.6 Berücksichtigte Wirkungskategorien

Von den einzelnen Schritten des Batterierecyclings 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. Wichtige Wirkungskategorien sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1 Wirkungskategorien [UBA 1995]

Verbrauch von Ressourcen	Bildung von Photooxidantien
Treibhauseffekt	Flächenverbrauch
Ozonabbau in der Stratosphäre	Geruchsbelästigungen, Lärm
Humantoxische Belastungen	Belastungen am Arbeitsplatz
Ökotoxische Belastungen	Abwärme und Abfallaufkommen
Versauerung von Ökosystemen	Strahlenbelastung
Eutrophierung von Ökosystemen	Bedrohung von Naturschönheit und -vielfalt

Die obige Liste erfasst bis auf die Kategorie „Respiratory inorganics“ auch alle vom ILCD-Handbuch empfohlenen Wirkungskategorien [ILCD 2010].

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 aus dem Elektromobilitätsbereich fand auf den ersten Sitzungen der Umbrellagruppe LCA (bestehend aus Mitgliedern der Projektverbände LiBRi und LithoRec) ein einvernehmliches Ergebnis. In Anpassung an die Thematik und die bestehenden Fragestellungen bzgl. der Recyclingverfahren wurden die oben aufgelisteten **fettgedruckten** Wirkungskategorien als Grundlage der Ökobilanzierung verwendet.

Nach [Schmitz 1999] existieren für die Humantoxizität und die ökotoxischen Belastungen keine methodischen Konzepte zur Charakterisierung. Es können zwar in den letzten Jahren hinsichtlich der methodischen Diskussion Fortschritte beobachtet werden; allerdings ist der Entwicklungsprozess noch nicht abgeschlossen [Klöpffer 2009]. Weiterhin ist die Datenlage zu zahlreichen human- und ökotoxischen Stoffen so schlecht, dass fundierte Aussagen nur

schwer abzuleiten sind. Es wird daraufhin auf die Einbeziehung der Humantoxizität und Ökotoxizität anhand einer Wirkungsabschätzung verzichtet. Stattdessen wird eine gesonderte Betrachtung für die als Hotspot identifizierte potenzielle Emission von Flusssäure durchgeführt.

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. Dies gilt gleichermaßen für die Wirkungskategorie Strahlenbelastung, da keine spezifischen Belastungen vorliegen. Das Abfallaufkommen wird als Flussgröße erfasst und diskutiert. Der anfallende Abfall wird behandelt und die resultierenden Umweltbelastungen in den entsprechenden Wirkungskategorien quantifiziert.

Auf die Wirkungskategorie Ozonabbau in der Stratosphäre wird im Kapitel 4.4 eingegangen und ihre Nichtbehandlung begründet.

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) 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 die nicht erneuerbaren energetischen Ressourcen (KEA nicht erneuerbar, KEA n.e.) bilanziert, nicht aber die erneuerbaren Energien. 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. Bezogen wird auf Antimonäquivalente.

¹ Weitestgehende Definition von Reserve.

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

Tabelle 3.2 Charakterisierungsfaktoren für den ADP_{elem} ultimate reserve

Element	ADP (kg-Sb-eq. / kg)
	ultimate reserve
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
Silber	1,18E+00

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 jede klimawirksame Substanz 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. Das Umweltbundesamt empfiehlt die Modellierung auf der 100-Jahre-Basis, da sie am ehesten die langfristigen Auswirkungen des Treibhauseffektes widerspiegelt. Die in den Berechnungen des Treibhauspotenzials berücksichtigten Substanzen werden mit ihren CO₂-Äquivalenzwerten nach [IPCC 2007] bewertet.

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 Potenziale 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.

Als optionale Bestandteile der Wirkungsabschätzung wird eine Normierung der Kategorien GWP, APD_{elem.}, AP, EP und POCP mit den globalen Jahresemissionen als Referenzwerten durchgeführt [CML 2010]. Ordnungs- und Gewichtungungsverfahren werden nicht verwendet.

3.2.7 Methoden der Auswertung

Die Auswertung wird entsprechend den 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 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.

3.2.9 Einschränkungen, Verwendung und Zielgruppen

Als wesentliche Einschränkung bzgl. der Ergebnisse der vorliegenden Ökobilanzstudie ist darauf zu verweisen, dass es sich um ein in Entwicklung befindliches Recyclingverfahren handelt und demnach die Mehrzahl der Sachbilanzdaten aus ersten Einzelversuchen (Batterieentladung und -zerlegung), aus Laborversuchen (Rückgewinnung von Lithiumcarbonat aus Schlacke) bzw. von Ergebnissen aus Simulationsrechnungen bzw. aus Pilotanlagen (pyrometallurgische Behandlung der Zellmaterialien) abgeleitet wurde. Mit Ausnahme des Schrittes Kobalt-Nickel-Raffination fehlen daher noch Daten aus industriellem Betrieb. Eine weitere Einschränkung besteht in der Vielfalt der in Frage kommenden Lithium-Ionen-Traktionsbatterien und der auf die Zukunft nicht einfach zu prognostizierenden Marktentwicklungen hierzu. Nichtsdestoweniger wurde in konstruktiver und gemeinsamer Arbeit der Mitglieder der Umbrellagruppe LCA diese Einschränkung durch die Abstimmung auf wichtige generische Batterietypen soweit wie möglich adressiert.

Die Sachbilanzdaten werden aus Konsistenzgründen primär aus der GaBi-Datenbank (Version 4.4) 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 v2.01 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. Zur Darstellung des Einflusses der Wahl dieses Datensatzes wird auf die Sensitivität in Kapitel 6.2.2.3 verwiesen.

Eine wichtige Zielgruppe für die Ökobilanzstudie sind die Verbundpartner des LiBRi-Projektes selbst und hierbei insbesondere das Unternehmen Umicore, das die Schritte zum Recycling der Lithium-Ionen-Traktionsbatterien in eigener Verantwortung betreiben wird. Für Umicore ist hierbei insbesondere der spezifische Nettoaufwand für eine mögliche Rückgewinnung von Lithiumcarbonat aus der Schlacke im Vergleich zur Primärdarstellung interessant, da alle anderen Prozessschritte für die industrielle Dimension zumindest vorbereitet sind (genehmigte Anlage zur Batteriezerlegung am Standort Hanau) oder inzwischen bereits betrieben werden (pyrometallurgische Anlage in Einfahrbetrieb seit Sommer 2011 sowie existierende Kobalt-Nickel-Raffinationsanlage). Weiterhin ist für Umicore und die weiteren Verbundpartner die Identifizierung möglicher ökologischer Optimierungspotenziale bzgl. des Recyclingprozesses von elementarer Bedeutung.

Eine weitere Zielgruppe für die Ergebnisse stellen das fördernde BMU selbst und die interessierte Fachöffentlichkeit dar. Für die Politik sind vor allem Erkenntnisse bzgl. noch offenen Forschungsbedarfs und ggf. entsprechend weiterer Förder- und Entwicklungsprogramme 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 6) konsequent an den vier Phasen einer Ökobilanz.

4 Sachbilanz

4.1 Prozessbeschreibung

Wie in Abschnitt 3 dargestellt, gliedert sich das LiBRi-Verfahren in vier Hauptprozessschritte:

- Entladung und Zerlegung der Batteriesysteme bis auf Zellebene,
- pyrometallurgische Behandlung zur Gewinnung einer Kobalt/Nickel/Kupfer-reichen Legierung und Erzeugung einer mit Li angereicherten Schlacke,
- hydrometallurgische Behandlung und chemische Auftrennung der Legierung zur Gewinnung von Kobalt- und Nickelsulfat (jeweils in batteriefähiger Qualität) sowie „Kupferzement“ als Nebenprodukt,
- hydrometallurgische Behandlung der aus dem pyrometallurgischen Prozess erhaltenen Schlacke zur Gewinnung von Lithiumcarbonat (batteriefähige Qualität).

Im Schritt der Batterie- und Modulzerlegung werden die Batterien zunächst entladen und dann mithilfe von Akkuschraubern in Einzelkomponenten zerlegt. Als Output, der zum nächsten Prozessschritt weitergeleitet wird, fallen hier die Zellen an, die nicht weiter zerlegt werden müssen. Die anderen Wertkomponenten (Batterie- und Modulgehäuse, Rahmen, Kabel) werden standardmäßigen Recyclingwegen zugeführt. Aus Sicherheitsgründen ist für den Zerlegeprozess eine Absaugung vorzusehen, falls sich defekte Zellen in den Batterien befinden. Weiterer Energiebedarf resultiert für den Transport der Batterien auf Gabelstaplern sowie für das Dismantling selbst.

Die pyrometallurgische Behandlung der Zellen aus den EoL-Elektrofahrzeugbatterien erfolgt in einem von Umicore selbst entwickelten und betriebenen Schachtofenprozess. Neben den Zellen² selbst werden Hilfsstoffe (Schlackebildner) und diverse Energieträger für den Schmelzprozess eingesetzt. Es entsteht als Hauptprodukt des Prozesses eine Legierung, die nahezu vollständig die Batteriemetalle Kobalt, Nickel und Kupfer aufgenommen hat. Diese Metalle bilden die Hauptkomponenten der Legierung, die noch als wesentliche Verunreinigungen Eisen und etwas Mangan enthält. Wichtiges Nebenprodukt des Prozesses ist die gebildete Schlacke, die im Wesentlichen ein Gemisch diverser Metalloxide und Silikate darstellt. Neben Alkali- und Erdalkaliverbindungen sammeln sich in der Schlacke vor allem Aluminium- und Lithiumverbindungen. Das Batteriemetall Lithium wird im Prozess fast vollständig in die Schlacke übergeführt. Schließlich entsteht aus dem Prozess aus dem Bereich der Abgasreinigung (Entstaubung) ein mineralischer Reststoff (Flugasche), der max. 3 % des Eingangsmaterials bemisst und zwecks Optimierung der Recyclingquote zunächst

² Im realen Prozess werden aus prozesstechnischen Gründen Gemische aus Zellen von Lithium-Ionen- sowie Nickelmetallhydrid-Batterien zusammen mit etwas Kobalt/Nickel-reichen Schrotten eingesetzt. Für die Ökobilanzierung wurde der Einsatz von reinen Lithium-Ionen-Zellen simuliert.

im pyrometallurgischen Kreislauf geführt wird, bis anschließend – nach derzeitigem Entwicklungsstand – eine Deponierung erfolgt.

Die im Schmelzprozess gewonnene Legierung wird in einer von Umicore betriebenen großtechnischen Anlage (Kobalt-/Nickelrefining) zusammen mit anderen kobalt- und nickelhaltigen Einsatzmaterialien eingesetzt. Die Anlage produziert Nickel- und Kobaltsulfat in batterietechnischer Qualität. In diesem Prozess werden über diverse hydrometallurgische Stufen Verunreinigungen wie Eisen und Mangan abgetrennt. Diese Rückstände werden zurzeit entsprechend über Deponierung entsorgt. Als wichtiges Nebenprodukt des Gesamtprozesses wird sogenannter „Kupferzement“ gewonnen. Dieses kupferreiche Material wird in einer anderen Anlage von Umicore in hochreines Elektrolysekupfer umgesetzt.

Die im pyrometallurgischen Prozess gewonnene Schlacke wird aufgemahlen und anschließend hydrometallurgisch unter Einsatz von Schwefelsäure aufbereitet. Nach Fällung- und Aufbereitungsschritten wird Lithiumcarbonat als Produkt in hoher Reinheit gewonnen. Neben Hilfsstoffen (anorganischen Chemikalien) wird Energie (Strom etc.) für diesen Prozess benötigt. Der im Labormaßstab entwickelte Prozess verspricht noch Optimierungspotenziale (Energierückgewinnung usw.), die im Rahmen des Projektes nicht mehr realisiert werden konnten. Für die Ökobilanz wurde der Entwicklungsstand zu Ende des LiBRi-Projektes zugrunde gelegt.

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 (LiBRi und LithoRec) zugrunde gelegt. Sie besteht aus einem Mittelwert aus Batterien mit drei unterschiedlichen Kathodentypen (NMC, NCA und LFP), 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, **auf keinen Fall die Zusammensetzung definierter Batterien eines entsprechenden Herstellers** wiedergeben. Die diversen unterschiedlichen Formen und Größen der real am Markt oder in Entwicklung befindlichen Batterien haben das Projektteam in Abstimmung mit den Mitgliedern der Umbrellagruppe LCA bestärkt, vielmehr generische Durchschnittsdatensätze zu bilden.

Die Zusammensetzung ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Es ist zu beachten, dass sich für die unterschiedlichen Batterien nicht nur die Kathodentypen in Zusammensetzung und Massen unterscheiden, sondern auch die restlichen Zellkomponenten sowie das Batterie- und Modulgehäuse.

Die für das LiBRi-Recyclingverfahren verwendete Mischung der drei Zelltypen ist ebenfalls in Tabelle 4.1 dargestellt. Hier ist zu beachten, dass sich das Mischungsverhältnis von 35 % NMC-, 35 % NCA- und 30 % LFP-Zellen jeweils auf die Zellmassen bezieht, die den Eingangsstrom zum pyrometallurgischen Schritt darstellen. Bezogen auf die gesamten Batterien bedeutet das, entsprechend der gewählten generischen Gesamtzusammensetzung, ein Verhältnis von 33,2 % NMC-, 34,3 % NCA- und 32,5 % LFP-Batterien.

Tabelle 4.1 Generische Zusammensetzung der Batterietypen (NMC, NCA, LFP) wie in der LCA-Umbrellagruppe abgestimmt; zusätzlich LiBRi-Input-Mischung im Basisszenario (Zellverhältnis 35-35-30)

Zelltyp		Mittelwerte für einzelne Zelltypen			Mischung
		NMC	NCA	LFP	35-35-30
Gesamtmasse	kg/Batterie	141	100	118	
Gesamtmasse	g/kg	1000	1000	1000	
Energieinhalt pro FU	kWh/t	86	96	71	

Zellmaterial						
	gesamt	g/kg	630	598	530	587
	Kathode	g/kg	191	175	173	180
darunter	Lithium	g/kg	14	13	7,6	11
	Kobalt	g/kg	39	16		18
	Nickel	g/kg	39	86		42
	Mangan	g/kg	36			12
	Aluminium	g/kg		2,5		0,8
	Eisen	g/kg			61	20
	Phosphor	g/kg			34	11
	Sauerstoff	g/kg	63	58	70	64
	Elektrolyt	g/kg	114	101	85	100
	Separator	g/kg	54	50	43	49
	Anode-C	g/kg	140	131	111	127
	Kath-Alu-Folie	g/kg	39	40	34	38
	Anode-Cu	g/kg	66	70	60	65
	Zellgehäuse Al	g/kg	21	20	17	19
	Sonstiges	g/kg	6,0	10	8,5	8,2
Batterie- und Modulgehäuse						
	gesamt	g/kg	370	402	470	413
	Kabel	g/kg	21	50	64	45
darunter	Kupfer	g/kg	13	30	38	27
	Aluminium	g/kg	1,4	10	13	8,1
	Edelstahl	g/kg	7,1	10	13	10
	Rahmen	g/kg	114	101	128	114
darunter	Kunststoff	g/kg	107	81	102	96
	Edelstahl	g/kg	7,1	20	26	18
	Gehäuse	g/kg	199	241	267	236
darunter	Edelstahl	g/kg	199	241	267	236
	Aluminium	g/kg				-
	Kunststoff	g/kg				-
	Sonstiges	g/kg	36	10	11	19

Einen Teil der Rubrik „Sonstiges“ macht das Batteriemanagementsystem (BMS) aus. Hier stellte der LithoRec-Partner I+ME Actia Komponenten (Master und Slave) zur Verfügung, die von Umicore auf ihre Zusammensetzung analysiert wurden. Die Ergebnisse dieser Analyse, insbesondere die Gesamtmasse und die Gehalte an Kupfer, Nickel, Gold und Silber, fließen

in die Sachbilanz des BMS-Recyclings ein. Die in Bezug auf die durchgeführte Ökobilanz relevanten Daten aus der BMS-Analyse sind im vertraulichen Annex 4 zu dieser Studie aufgeführt.

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. Für die Berechnung der resultierenden Stromgutschriften wird jeweils die in Tabelle 4.1 genannte Energiedichte (bezogen auf kg-Batteriegewicht) zugrunde gelegt. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Restkapazität der End-of-life-Batterien 80 % der Neukapazität beträgt und dass 80 % des Energieinhalts tatsächlich als Strom zurückgewonnen werden können. Der mittlere Ladezustand der Batterien wird statistisch verteilt mit 50 % angenommen.

Die prozessspezifischen Daten für die bilanzierten Prozessschritte wurden von den jeweils dafür zuständigen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Tabelle 4.2 zeigt die Datenherkunft im Überblick.

Tabelle 4.2 Herkunft der prozessspezifischen Daten

Prozessschritt	Datenquelle	Maßstab des Prozesses
Batterie- und Modulzerlegung	Umicore, Hanau (DE)	Pilotanlage
Pyrometallurgie	Umicore, Olen/Hoboken (BE)	Simulation, Pilotanlage
Kobalt-Nickel-Raffination	Umicore, Olen (BE)	Industrieanlage
Schlackeaufbereitung	TU Clausthal (DE)	Labormaßstab

Die Daten wurden vom Öko-Institut auf ihre Plausibilität geprüft, z. B. durch Kohlenstoff- und Sauerstoffbilanzen für den pyrometallurgischen Schritt.

Die Rohdaten sind im vertraulichen Annex 4 zu dieser Studie aufgeführt.

4.2.2 Generische Datensätze

Eine Übersicht über die verwendeten generischen Datensätze gibt Annex 2.

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

In der Regel werden Datensätze aus GaBi v4.4 verwendet, wobei diese sich teilweise auf Industriedaten (z. B. der EAA, PlasticsEurope, worldsteel) stützen.

Für diese Ökobilanz werden die Datensätze aus der Professional Datenbank und der Zusatzdatenbank „Anorganische Vorprodukte“ aus GaBi v4.4 verwendet. Für darin fehlende

Datensätze, die für diese Ökobilanz notwendig sind, werden Daten aus der Datenbank ecoinvent v2.01 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. Zur Darstellung des Einflusses der Wahl dieses Datensatzes wird auf die Sensitivität in Kapitel 6.2.2.3 verwiesen.

Der geographische Bezug der Datensätze wird nach Möglichkeit landesspezifisch, ansonsten europäisch oder global (in dieser Priorisierung) gewählt. Hierbei ist zu beachten, dass, obwohl z. B. die Buntmetallproduktion die globalen Prozesse beinhaltet, ihr Mix landestypisch ausformuliert ist.

Für die Hilfsstoffe wird mit den Datensätzen „Produktionsmix ab Hersteller“ gearbeitet und es wird 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 4.2.4 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 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 Literaturdatenbanken.

Das Recycling von Lithiumbatterien wird in drei Schritten vollzogen. Im ersten Schritt wird die Batterie in Gehäuse, Elektrik und Zellen (Dismantling – DM) zerlegt. Im zweiten Schritt werden die Zellen in ihre Inhalte separiert und im dritten die Zellmaterialien aufbereitet (ABK).

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 Literaturdatenbank unverändert (ohne Zusatz) oder adaptiert worden ist.

Die eingesetzten Prozesse aus der Literaturdatenbank sind im Annex 2 dokumentiert.

Tabelle 4.3 Gegenüberstellung der rezyklierten Materialien, des angelasteten Recyclingprozesses sowie der für das Recyclingmaterial erteilten Gutschrift

Materialien	Recyclingprozess	Primärprozess	Bemerkung
DM: Aluminium	Sekundäraluminium (Aufarbeitung und Umschmelzen)	EU-Verwendungsmix Primäraluminium	Datensätze nach EAA [EAA 2008]
DM: BMS (Elektrik/Elektronik)	Leiterplattenrecycling auf Kupfer, Nickel, Gold, Silber	Primärgewinnung der Metalle	(1): Adaption des Metallgehaltes nach eig. Laboruntersuchung
DM: Kupfer	Sekundärkupfer	Primärkupfer	(2) Adaption des Primärkupferprozesses
DM: Edelstahl	Elektro-Edelstahl	Edelstahl aus Blaswerk	(3) Adaption Elektrostahl auf 100 % Edelstahlinput
DM: Kunststoff- halterungen PA 6	Kunststoffaufbereitung PA 6	Primärkunststoffherstellung PA 6	(4) Modellierung Rezyklat nach IFEU [IFEU 2002]
ABK: Kobaltsulfat	Primärdaten des Projekt	Primärgewinnung: Kobalt + Umsetzung mit H_2SO_4 zu $CoSO_4$	(5) Stöchiometrische Umsetzung
ABK: Nickelsulfat	Primärdaten des Projekt	Primärgewinnung: Nickel + Umsetzung mit H_2SO_4 zu $NiSO_4$	(5) Stöchiometrische Umsetzung
ABK: Kupfer	Primärdaten des Projekt, Sekundärkupfer	Primärgewinnung: Kupfer	(6) Adaption des Sekundärkupferprozesses auf Kupferzementinput
ABK: Lithiumcarbonat	Primärdaten des Projekt	Primärgewinnung: Lithiumcarbonat	Brines (Chile)

Die Adaptionen der Prozesse sind spezifisch auf die Gegebenheiten zugeschnitten. Generell gilt, dass der Output der Sekundärprozesse (und damit der Output der reversen Primärprozesse) über die Gewinnquoten des Schrottanteils berechnet werden:

1. Die Elektronikbauteile der Batterie (BMS) bestehen aus Leiterplatten mit messtechnischen und elektrischen Einheiten. Beispielhafte BMS wurden im Projekt 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.

2. Kupfer: Kupfer fällt beim Dismantling der Batterie als metallisches Kupfer an. Die Modellierung sieht hier den Sekundärkupferprozess vor. Für die Gutschrift werden die Primärkupferprozesse aus demecoinvent-Datensatz „RER: G_Kupfer, ab Regional-lager“, bereinigt um ihre Sekundärkupferanteile, genutzt.
3. Edelstahl: Das Edelstahlgehäuse 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.
4. PA 6: 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.
5. Die Aufbereitung der Nickel- und Kobaltmetalle soll entsprechend der Systembeschreibung bis zum einsatzfähigen Elektrodenmaterial erfolgen. Für beide Metalle gelten daher 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.
6. Bei der chemischen Aufbereitung fällt Zementkupfer an. Zementkupfer ist verunreinigtes Kupfer, das aus einer kupferhaltigen Lösung durch Hinzufügen von Eisen-spänen (Zementierung) gewonnen wird. Das Kupfer wird als Einsatzstoff in der Sekundärkupfererzeugung bilanziert, allerdings mit adaptiertem niedrigeren Kupfergehalt.

Bei Metallen gilt aus technischer Sicht ein Substitutionsfaktor von Recycling- bzgl. Primärmaterial von 1. Für Kunststoffe ist dies i. A. nicht der Fall, da sich die Kunststoffqualität durch das Recycling (z. B. durch Verunreinigungen) verschlechtern kann. Da das recycelte PA 6 jedoch vermutlich rein umgeschmolzen werden kann, wird für diese Studie auch für das PA 6 ein Substitutionsfaktor von 1 angenommen. Bei niedrigeren Substitutionsfaktoren verringert sich die Bruttogutschrift proportional.

4.2.4 Modellierung der Transporte

Für alle Güterbewegungen in dieser Ökobilanz wird ausschließlich der Transport per LKW (dieselbetrieben, EURO 3) modelliert, wofür Datensätze aus GaBi v4.4 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 aus Batteriezerlegung	> 34-40 / 27	100	250 ³ /500 ⁴	15
Ganze Zellen	> 34-40 / 27	75	450	100
Prozessgase	> 34-40 / 27	75	30	100
Mineralische Hilfsstoffe	> 34-40 / 27	100	30	100
Sonstige Hilfsstoffe (als Bulkgüter)	> 34-40 / 27	63	200	60
Legierung	> 34-40 / 27	100	50	0
Flugstaub, Rückstände aus der Schlackeaufbereitung	14-20 / 11,4	100	30	100

Für die Zellen liegt die Information von Umicore vor, dass diese aus Sicherheitsgründen und Transportvorschriften je nach Zustand der Zellen in Absorptionsmaterial verpackt transportiert werden müssen (Massenanteil kalkuliert mit 25 %), woraus sich die Beladung von mindestens 75 % Zellen beim Transport von der Batteriezerlegung in Hanau zur Pyrometallurgie in Olen (BE) ergibt. Das Gleiche wird für den Transport der ganzen Batterien angenommen, wobei ein weiterer kleiner Abschlag für nicht vollständige Auslastung vorgesehen wird. Die Distanz ist hier ein Schätzwert für den mittleren Transport aus einer dezentralen Autowerkstatt nach Hanau. Da es sich vermutlich um speziell ausgerüstete Fahrzeuge handelt, wird in beiden Fällen von einer leeren Rückfahrt ausgegangen.

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 der Prozessgase werden eine Transportdistanz von 30 km, eine Beladung von 75 % und eine leere Rückfahrt zugrunde gelegt. Die Anlieferung von Sand erfolgt angenommenerweise aus 30 km Entfernung in einem vollen LKW mit leerer Rückfahrt. Die gleichen Parameter werden für die Fahrten zur Deponie für die Ablagerung von Flugstaub und festen Rückständen aus der Schlackeaufbereitung zugrunde gelegt.

Beim Transport der Legierung zur Kobalt-Nickel-Raffination von Hoboken nach Olen wird lediglich der Transport der Wertstoffe Kobalt, Nickel und Kupfer berücksichtigt, die zusammen jedoch 83 % des Gesamtgewichts der Legierung ausmachen.

Der Transport der Schlacke wird vernachlässigt, da davon ausgegangen wird, dass die Schlackeaufbereitung am gleichen Standort wie die Pyrometallurgie stattfindet.

³ Für Aluminium und Edelstahl

⁴ Für Kupfer, BMS, Kunststoff (PA 6)

Die Gutschriften erfolgen ab Werk.

4.2.5 Modellierung der Entsorgung

Da es sich bei dem LiBRi-Verfahren um einen Recyclingprozess handelt, werden alle Ausgangsströme nach Möglichkeit zunächst einer stofflichen Verwertung zugeführt. Als fester Ausgangsstrom Abfallströme, die entsorgt werden müssen, treten nur der ausgefilterte Flugstaub aus der Pyrometallurgie sowie feste (Fällungs-)Rückstände aus der Kobalt-Nickel-Raffination und der Schlackeaufbereitung auf.

Die Entsorgung dieser Fraktionen wird als Deponierung von Eisenmetallen modelliert (vgl. Annex 2). Die Transporte zur Entsorgung werden mit dem LKW durchgeführt (siehe Kapitel 4.2.4).

Bei der Auswertung der potenziellen Umweltwirkungen (siehe Kapitel 5) werden bei der Schlackeaufbereitung die mit der Deponierung der festen Rückstände verbundenen Umweltbelastungen nicht betrachtet. Dies ist dadurch begründet, dass für diese Rückstände perspektivisch eine Nutzung als Ersatzbaustoff, z. B. in der Zementindustrie, vorgesehen ist. Da hierfür jedoch noch keine Daten vorliegen, werden für diese Nutzung keine Gutschriften erteilt, jedoch auch keine Deponielasten veranschlagt.

Bei der Kobalt-Nickel-Raffination und der Schlackeaufbereitung fällt zudem Abwasser an. Die Entsorgung dieser Ströme wird als Behandlung anorganisch und organisch leicht belasteter Industrieabwässer modelliert (vgl. Annex 2).

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 bzw. von Pilotanlagen.

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 auf industriellen Maßstab im Rahmen des Projektes aufgrund 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.

4.4 Ausgewählte Ergebnisse der LCI: Materialflüsse

Das LiBRi-Verfahren setzt im Recycling eine Mischung aus Batterien mit unterschiedlichen Kathodentypen ein, die den Erfordernissen der Prozessführung angepasst werden kann. In dieser Studie wird eine Mischung aus Lithium-Ionen-Batterien mit NMC-, NCA- und LFP-Kathoden betrachtet. Die Zusammensetzung der drei Kathodentypen ist in Kapitel 4.2.1 beschrieben. Je nach Mischungsverhältnis ergeben sich folglich unterschiedliche Materialströme im Prozess. In der Basisbilanz wird von einem Mischungsverhältnis der drei Zelltypen NMC:NCA:LFP von 35:35:30 ausgegangen. Die resultierenden Ströme werden im Folgenden vorgestellt.

Zusammensetzung der Batterien zum Recycling

Aus dem Mischungsverhältnis NMC:NCA:LFP = 35:35:30 ergibt sich die in Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 dargestellte Zusammensetzung des Inputs in den Recyclingprozess.

Nach Bauteilen differenziert besteht der Batterieinput mengenmäßig im Wesentlichen aus Zellen (58 %), Batteriegehäuse (24 %) und Rahmen (11 %). Weitere Komponenten sind Kabel (5 %), das Batteriemanagementsystem (BMS, 0,7 %), zu dem in dieser Darstellung nur die Leiterplatten gerechnet werden, sowie sonstigen Teilen (1 %), die auch etwaige weitere Komponenten des BMS beinhalten.

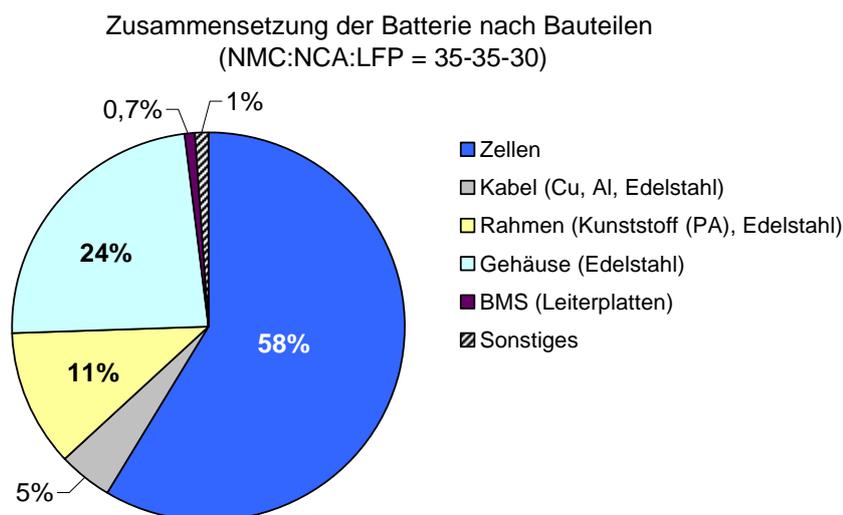


Abbildung 4.1 Zusammensetzung des Batterieinputs in den Recyclingprozess nach Bauteilen

Bezüglich der Materialien setzt sich der Batterieinput, neben den 58 % Zellen, deren Zusammensetzung in Abbildung 4.4 dargestellt ist, aus Edelstahl (26 %), Kunststoff (10 %), Kupfer (3 %), Aluminium (0,8 %) sowie den Wertmetallen (0,2 %), die aus den Leiterplatten zurückgewonnen werden können, zusammen. Als rückgewinnbare Wertmetalle werden dabei in dieser Studie nur Kupfer, Nickel, Gold und Silber berücksichtigt. Der Kunststoff besteht aus Polyamid, wobei für die Studie von PA 6 ausgegangen wird.⁵ Die Kategorie „Sonstiges“, die insgesamt 2 % der Inputmasse ausmacht, wird in der weiteren ökobilanziellen Bewertung nicht mehr betrachtet. Ihre Entsorgung/Verwertung wird bei der Bewertung der potenziellen Umweltwirkungen (siehe Kapitel 5), weder mit Lasten noch mit Gutschriften belegt.

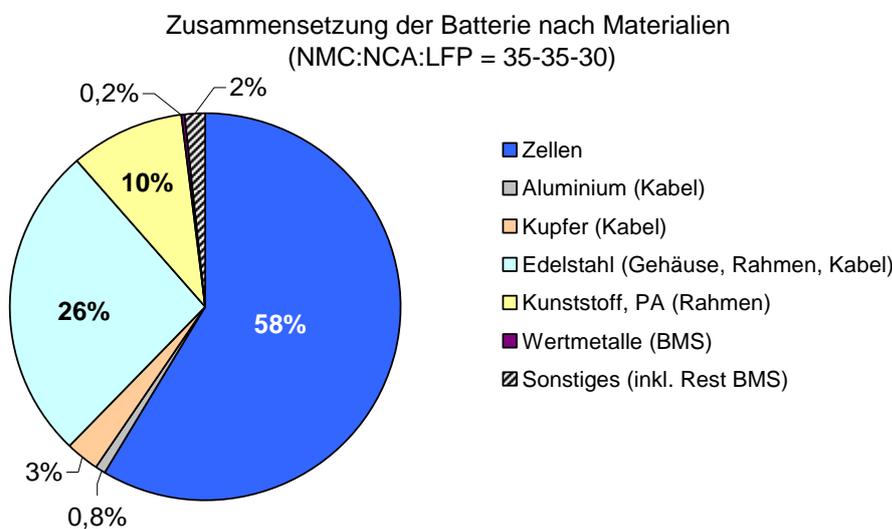


Abbildung 4.2 Zusammensetzung des Batterieinputs in den Recyclingprozess nach Materialien

Batterie- und Modulzerlegung (Dismantling)

Im Schritt der Batterie- und Modulzerlegung (Dismantling, DM) werden alle übrigen Komponenten von den Zellen abgetrennt, die zum nächsten in dieser Ökobilanz betrachteten Schritt, der Pyrometallurgie, gelangen. Es wird angenommen, dass die übrigen Komponenten beim DM ausschließlich einer stofflichen Verwertung zugeführt werden.

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 4.5 dargestellten Recyclingeffizienzen ergeben sich dabei die in Abbildung 4.3 gezeigten Materialströme, die mit Gutschriften belegt werden.

⁵ Ausgehend von der Dokumentation der Datensätze in GaBi erscheint auch die Verwendung von PA 6.6 möglich. Ein Vergleich der beiden Datensätze (vgl. Annex 2) kam zu dem Ergebnis, dass sich diese in den relevanten Wirkungskategorien GWP, AP und KEA n.e. nicht wesentlich unterscheiden. Das EP von PA 6.6 liegt etwas über, das POCP etwas unter dem von PA 6. Das ADP_{elem.} unterscheidet sich deutlich, spielt aber bei dem Kunststoff keine Rolle.

Tabelle 4.5 Angesezte Recyclingeffizienzen für die bei der Batterie- und Modulerlegung (Dismantling) anfallenden Materialströme

	Recyclingeffizienz
Edelstahl	95 %
Kunststoff	90 %
Aluminium	90 %
Kupfer	95 %
Nickel	93 %
Gold	100 %
Silber	100 %

Die verwendeten Recyclingeffizienzen spiegeln im Wesentlichen nur die Umschmelzverluste wider. Die Erfassung bzw. Einsammlung der Batterien im Vorfeld zum Recycling wird aufgrund der Systemgrenzen nicht miteinbezogen. Die Effizienz bei der Batterie- und Modulerlegung und der Aufbereitung der Altmaterialien wird mit 100 % angenommen.

Da im momentanen Entwicklungsstadium eine sehr sorgfältige Komponententrennung durchgeführt wird, ist dies realistisch. Wenn die Verfahren in die Massenproduktion gehen, werden diese Effizienzen aufgrund des Umsatzdruckes möglicherweise sinken. Da zum momentanen Zeitpunkt hierfür jedoch keine Werte vorliegen, wurde auf eine Abschätzung verzichtet. Die Gutschriften sinken bei sinkenden Recyclingeffizienzen proportional.

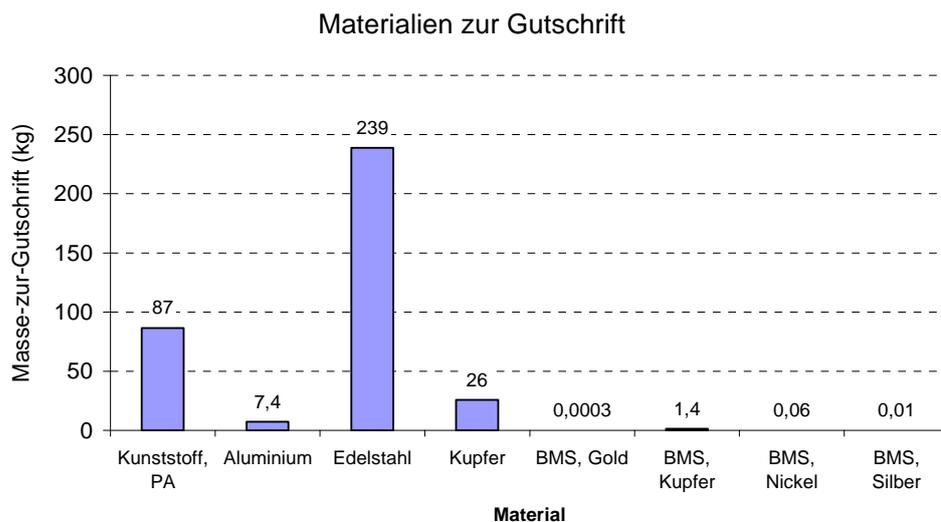


Abbildung 4.3 Massen der Materialien, für die bei der Batterie- und Modulerlegung (Dismantling) Gutschriften erteilt wurden (bereinigt um Aufbereitungsverluste)
 Gesamtmasse zur Gutschrift im DM: 361 kg

Pyrometallurgie, Kobalt-Nickel-Raffination und Schlackeaufbereitung

Die Zusammensetzung der Zellen, des Eingangsmaterialstromes zur Pyrometallurgie, ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Massenmäßig bestehen die Zellen hauptsächlich aus Kohlenstoff und Sauerstoff, die für den Prozess keine Wertprodukte darstellen. Allerdings stellen sie einen internen Energieeintrag dar, der die extern benötigte Energie verringert.

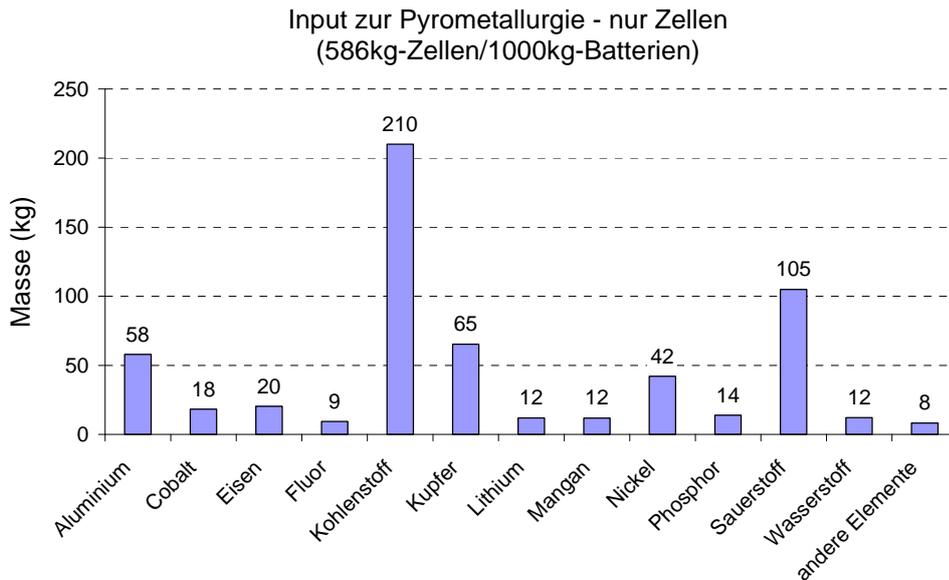


Abbildung 4.4 Elementare Zusammensetzung der Zellen, die als Eingangstrom der Pyrometallurgie zugeführt werden

Die wesentlichen Wertprodukte im Input des Prozesses sind Kobalt (18 kg/FU⁶), Kupfer (65 kg/FU) und Nickel (42 kg/FU). Zusammen mit dem Eisen, einem Teil des Mangans und einem geringen Teil des eingetragenen Kohlenstoffs gehen diese Elemente fast vollständig in den Legierungsstrom (siehe Abbildung 4.5). Die restlichen Metalle gehen als Oxide und Silikate in die Schlacke (siehe Abbildung 4.6). Der dritte feste Outputstrom aus der Pyrometallurgie ist der Flugstaub aus der Abgasreinigung. Hiervon fallen maximal 3 % an, gemessen an der insgesamt pro Schmelzkampagne eingesetzten Materialmenge, für die im Rahmen dieser Studie eine Deponierung vorgesehen wird.

⁶ FU: funktionelle Einheit

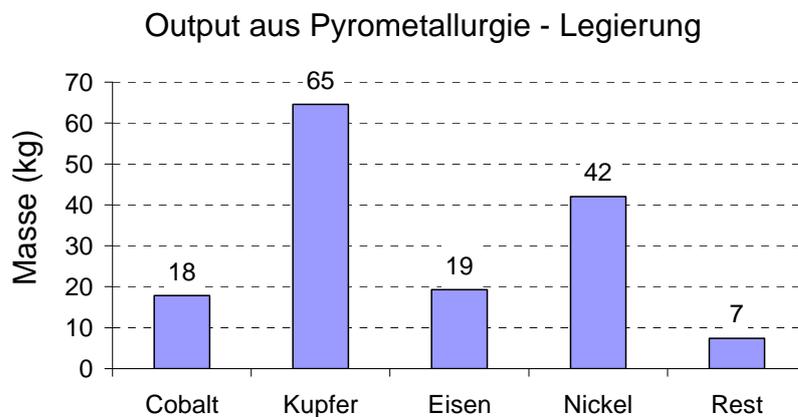


Abbildung 4.5 Zusammensetzung der Legierung; Gesamtmasse: 151 kg

Die Legierung wird in der Kobalt-Nickel-Raffinierung, einer bereits großtechnisch in Belgien betriebenen Anlage, in batteriefähiges Kobalt- und Nickelsulfat aufbereitet, wobei im Nebenstrom Kupfer als sogenannter Kupferzement anfällt. Dieser muss ebenfalls weiter aufbereitet werden, um am Ende als gutschriftenfähiges Recyclingkupfer zur Verfügung zu stehen.

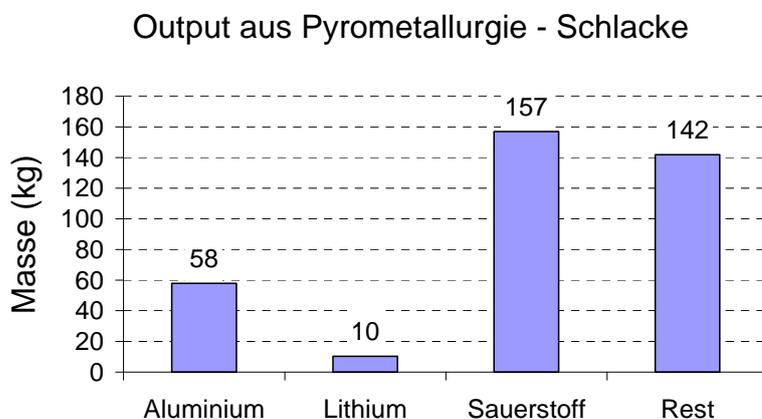


Abbildung 4.6 Zusammensetzung der Schlacke; Gesamtmasse: 367 kg

Die Schlackeaufbereitung, u. a. mit dem Ziel der Gewinnung batteriefähigen Lithiumcarbonats, befindet sich momentan im frühen Forschungsstadium. Für die Studie wird vorausgesetzt, dass am Ende des Prozesses ein batteriefähiges Produkt steht, für das Lithiumcarbonat aus der Primärgewinnung gutgeschrieben werden kann.

Die Mengenströme aller Wertstoffe aus der weiteren Aufbereitung, für die Gutschriften erteilt werden, sind in Abbildung 4.7 dargestellt.

Die Masse an Schwefelsäure ergibt sich daraus, dass aus dem LiBRi-Prozess Kobalt- und Nickelsulfate entstehen, wie sie für die Produktion von Kathodenmaterial eingesetzt werden. Bei der Herstellung des Kathodenmaterials aus primären Metallen müssten somit zunächst auch Sulfate erzeugt werden, für die die stöchiometrische Schwefelsäuremenge gebraucht würde. Somit ersetzen die Produkte aus der Kobalt-Nickel-Raffinierung neben Primärmetallen auch Schwefelsäure.

Gutschriften im LiBRi-Prozess

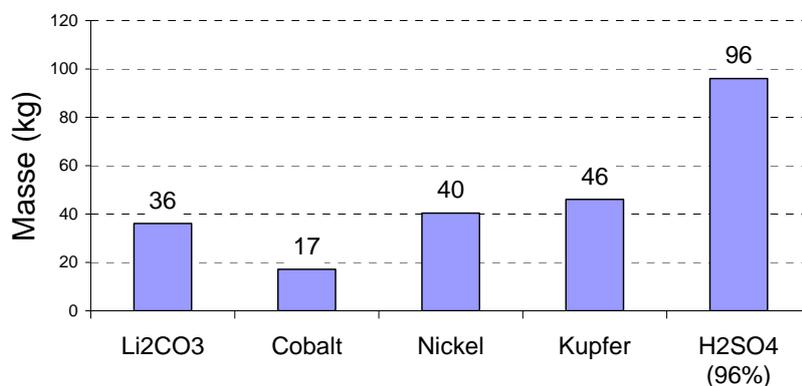


Abbildung 4.7 Materialien aus der Zellaufbereitung, für die Gutschriften erteilt werden (bereinigt um Aufbereitungsverluste); Gesamtmasse zur Gutschrift bei LiBRi aus CN, SR: 235 kg

Für alle Prozessschritte (Pyrometallurgie, Kobalt-Nickel-Raffination, Schlackeaufbereitung) werden Hilfsstoffe und Energie (elektrisch und thermisch) benötigt. Eine Dokumentation dieser Inputströme ist an dieser Stelle aufgrund von Industriegeheimnissen nicht möglich. Eine Zusammenstellung befindet sich im vertraulichen Anhang zu dieser Studie (siehe Annex 4).

Ozonerstörungspotenzial – ODP, Wasserverbrauch

Die Datenherkunft von zwei weiteren Indikatoren wurde analysiert und ihre Aussagefähigkeit getestet. In beiden Fällen erscheinen uns die Indikatoren zu wenig fundiert, als dass sich ihre Aussage sinnvoll bewerten lassen könnte. Für beide Indikatoren – ODP und Wasserverbrauch – wurden die Einzelergebnisse auf der Prozessebene überprüft.

ODP

Das ODP beschreibt den Ozonabbau in der Stratosphäre durch Ozone Depleting Substances (ODS), wie z. B. Chlorfluorkohlenwasserstoffe. Die Produktion und der Einsatz von ODS sind im Montrealer Protokoll bzw. für Europa durch EC 2037/2000 beschränkt bzw. verboten. In den Ergebnissen dieser Ökobilanz wird der ODP-Indikator durch Halon-Emissionen bei der Primärförderung von Buntmetallen sowie durch R11/R145-Emissionen bei der

Stromproduktion bzw. stromintensiven Produkten, z. B. flüssigem Sauerstoff, dominiert. So kann die R11/R145-Emission der Urkette zugeordnet werden. Als Effekt halbiert sich die Emission, wenn die stromintensiven Produkte nicht wie hier in Belgien bezogen werden, sondern in Deutschland. Die Halon-Emissionen sind hingegen Ölförderung und -transport in der ecoinvent-Datenbank zuzuordnen.

Die ODS-Emissionsdaten verändern sich deutlich über die Jahre. So haben sich z. B. die weltweiten Halon-Emissionen von 6174 t/a in 1990 auf 1931 t/a in 2005 und auf 1482 t/a in 2010 reduziert [HTOC 2010]. So fand allein von 2005 bis 2010 eine Reduktion um 23 % statt.

Nach einer Normierung ist der normierte ODP-Indikator (netto) um den Faktor 10 geringer als das EP (netto), bzw. um den Faktor 18 geringer als GWP (netto). Der deutlich geringere Abdeckungsgrad ist aus den Prozessstufen selbst nicht erklärbar. Aus dem Screening von ODS in diversen Datenbanken und eigener Recherche kam VHK [VHK 2005] zu dem Schluss, dass ODS-Emissionen gering (negligible) sind und ihre Erfassung lückenhaft (sketchy) ist.

Der ODP-Indikator ist unserer Ansicht nach aufgrund der oben skizzierten Problematik nicht anwendbar.

Wasserverbrauch

Bei der prozessspezifischen Analyse des Wasserverbrauchs konnte Folgendes festgestellt werden:

- Der größte Anteil (> 90 %) des aufgeführten Wassers resultiert aus der Aufbereitung und Herstellung von Metallen. Diese Daten müssen als „grobe“ Schätzung klassifiziert werden.
- Zwischen den verschiedenen untersuchten Varianten der Aufbereitung von Lithiumionenbatterien ergibt sich kein nennenswerter Unterschied im Wasserverbrauch in den zentralen Aufbereitungsstufen. Unterschiede zwischen den Varianten resultieren aus den vorgelagerten Ketten der Buntmetallherstellung.
- Zur Bewertung des Wasserverbrauchs fehlen Angaben mit geographischem Bezug.
- Insgesamt kann auf eine aktuelle Diskussion hinsichtlich der Bewertung des Wasserverbrauchs verwiesen werden; dennoch lassen die konkrete Datenlage und der Stand der Methodik eine Einbeziehung in diese Ökobilanz nicht zu. Bezüglich der Fortschritte der Methodik siehe [Berger et al. 2010].

Aus den obigen Gründen erscheint es nicht sinnvoll, den Indikator Wasserverbrauch weiter zu betrachten und ihn zur Bewertung heranzuziehen.

5 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Im Folgenden stellt dieses Kapitel die potenziellen Umweltwirkungen des LiBRi-Verfahrens vor. Dabei wird der Reihe nach auf die betrachteten Wirkungskategorien Treibhauspotenzial (GWP), elementarer Ressourcenverbrauch ($ADP_{elem.}$), Versauerungspotenzial (AP), Eutrophierungspotenzial (EP), photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP) sowie nicht erneuerbarer Kumulierter Energieaufwand (KEA n.e.) eingegangen. Zunächst werden in Kapitel 5.1 die Wirkungskategorien GWP, $ADP_{elem.}$ und AP nach Prozessschritten detailliert vorgestellt. Auf die Wirkungskategorien EP, POCP und KEA n.e. wird zudem vergleichend eingegangen. Kapitel 5.2 zeigt die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zusammenfassend für die vier Prozesse des LiBRi-Verfahrens.

Eine Tabelle mit einer detaillierten Aufstellung der Ergebnisse der Basisbilanz befindet sich in Annex 3.

Kapitel 5.3 stellt die normierten Gesamtergebnisse für die Lasten und Gutschriften des LiBRi-Verfahrens dar.

5.1 Ergebnisdarstellung nach Prozessschritten

5.1.1 Treibhauspotenzial (GWP)

Im ersten Schritt des LiBRi-Verfahrens, der Batterie- und Modulzerlegung (Dismantling), entstehen durch die Zerlegung selbst keine wesentlichen Beiträge zum GWP. Effekte zeigen sich jedoch beim Recycling der Wertmetalle und des Kunststoffes, wobei die Gutschriften für das Recyclingmaterial die Lastschriften für die Recyclingprozesse deutlich überwiegen (siehe Abbildung 5.1).

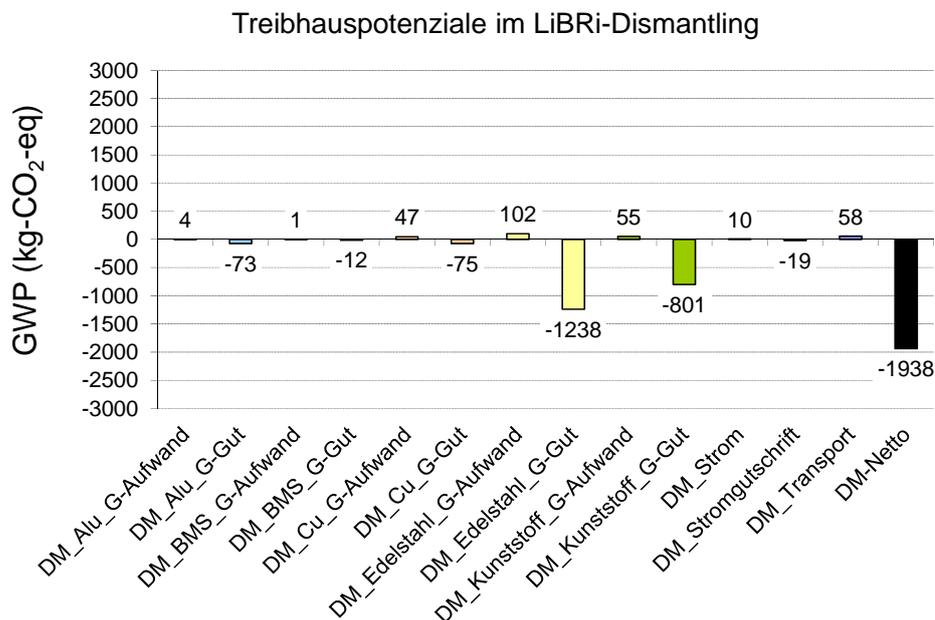


Abbildung 5.1 Treibhauspotenziale bei der Batterie- und Modulzerlegung

Insbesondere treten hier hohe Gutschriften für Edelstahl und Kunststoff auf. Dies ist zum einen durch die mengenmäßig hohen Beiträge der beiden Materialien begründet (vgl. Abbildung 4.2), zum anderen spiegelt sich darin der Aufwand, der für die primäre Herstellung von Edelstahl (Chrom-Nickel-Legierung) und Polyamid (hier PA 6) nötig ist. In der Gesamtheit ergibt sich dadurch für diesen Schritt eine deutliche Nettogutschrift.

Bei der Pyrometallurgie treten Treibhausgasemissionen (beim thermischen Prozess „lediglich“ CO₂) auf, die vor allem auf die direkten Emissionen aus der Befeuerung des Prozesses zurückzuführen sind (siehe Abbildung 5.2). Zudem resultieren Emissionen aus dem Hilfsstoffeinsatz und den Vorketten der verwendeten Heizenergieträger⁷ sowie aus dem Strombedarf des Prozesses.

⁷ In dieser und allen folgenden Graphiken in diesem Kapitel werden der Hilfsstoffeinsatz und der Einsatz von Energieträgern außer Strom (z. B. Erdgas, Prozessdampf) kumuliert angegeben. Der Strombedarf wird jeweils getrennt ausgewiesen.

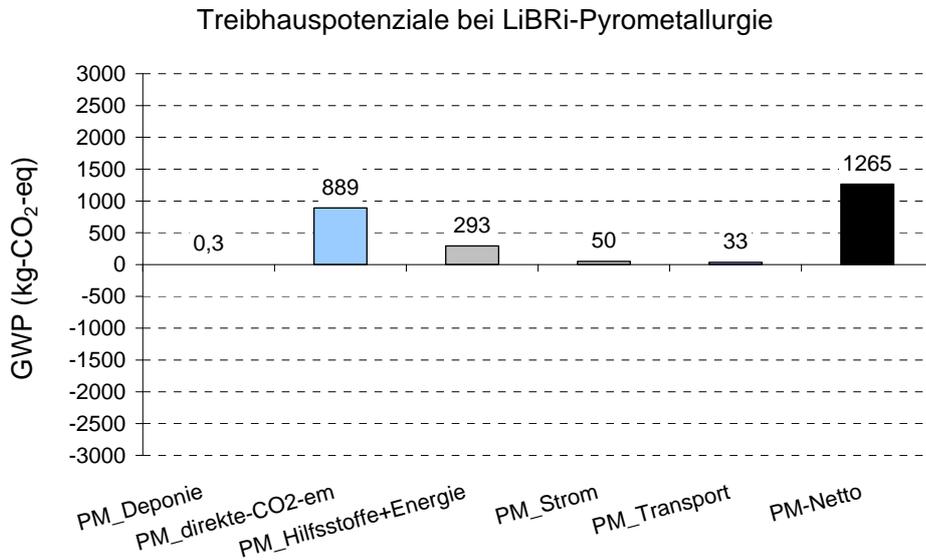


Abbildung 5.2 Treibhauspotenziale des pyrometallurgischen Schrittes

Gutschriften entstehen in diesem Prozess keine, da hier nur die Vorprodukte (Legierung, Schlacke) für die nachgeschalteten Aufbereitungsprozesse produziert werden.

Die Aufbereitung der Legierung erfolgt in der Kobalt-Nickel-Raffination (siehe Abbildung 5.3).

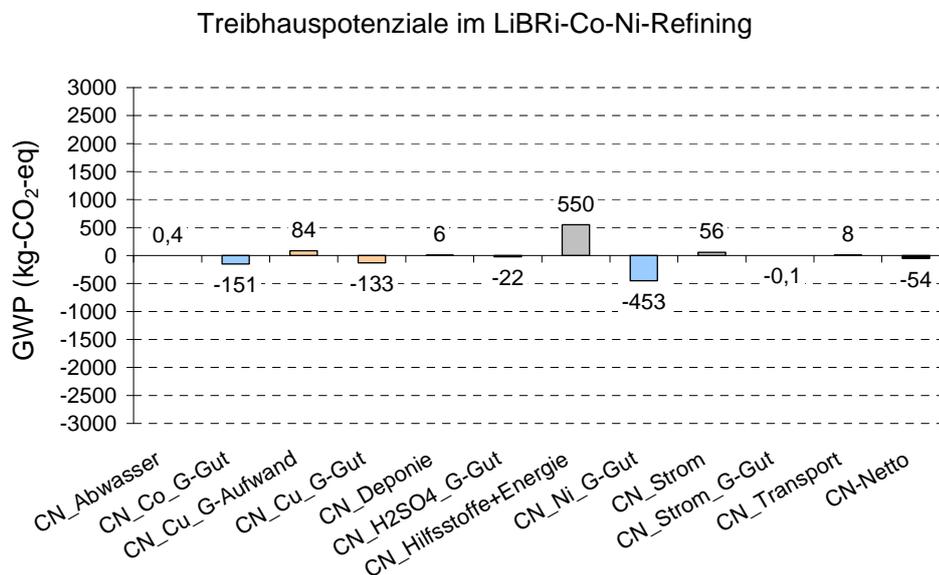


Abbildung 5.3 Treibhauspotenziale bei der Kobalt-Nickel-Raffination

Der wesentliche lastseitige Beitrag zum GWP entsteht hier durch den Hilfsstoff- und Energieeinsatz. Die Last wird allerdings durch die aus dem Prozess gewonnenen Recycling-

metalle (Kobalt, Kupfer, Nickel) kompensiert, so dass die Nettogutschrift ungefähr bei null liegt.

Bei der Aufbereitung der Schlacke werden zum jetzigen Stand der Forschungsarbeiten nennenswerte Mengen an Hilfsstoffen und Energie benötigt, die zu einer Belastung beim GWP in diesem Schritt führen (siehe Abbildung 5.4). Für das zurückgewonnene Lithium entstehen dahingegen nur geringe Gutschriften. Dies liegt einerseits daran, dass das Lithium in der Schlacke in einer relativ geringen Konzentration vorliegt (ca. 8%), obgleich das Lithium im pyrometallurgischen Prozess zuvor nahezu vollständig in die Schlacke übergeführt wird. Andererseits ist das Verfahren noch nicht optimiert und ca. 35 % des Lithiums gehen nach derzeitigem Entwicklungsstand bei der Aufbereitung verloren.

Treibhauspotenziale bei der LiBRi-Schlackeaufbereitung

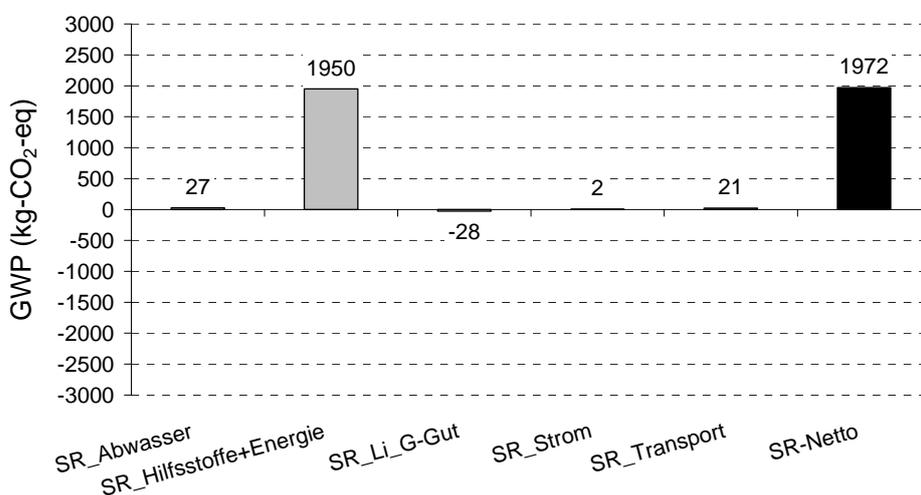


Abbildung 5.4 Treibhauspotenziale bei der Schlackeaufbereitung

In jedem Fall kann allein durch die Gutschriften für das Recyclinglithium keine positive Bilanz erzielt werden. Hierbei ist zu erwähnen, dass sich der Schlackeaufbereitungsprozess noch in einem frühen Forschungsstadium befindet und unterschiedliche Möglichkeiten einer Reduktion des Hilfsstoff- und Energieaufwandes bestehen. So kann z. B. durch Wärmeintegration mit dem vorhergehenden pyrometallurgischen Schritt eine Reduktion des Prozessdampfbedarfs erzielt werden. Ein geändertes Schlackeaufbereitungsverfahren (Anionenaustausch statt Fällung) könnte zu einer Reduktion des Hilfsmitelesatzes und einer höheren Lithiumrückgewinnung führen. Zudem wird eine Nutzung der festen Rückstände aus dem Prozess als Ersatzstoff angestrebt. Da zu diesen Möglichkeiten zum Zeitpunkt der Erstellung dieser LCA noch keine Daten vorlagen, können die Auswirkungen dieser Maßnahmen hier jedoch nicht quantifiziert werden.

5.1.2 Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP_{elem.})

Bei der Batterie- und Modulzerlegung 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). Trotz der relativ geringen Materialmenge (vgl. Abbildung 4.2) sind dabei 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 (vgl. ADP-Tabelle).

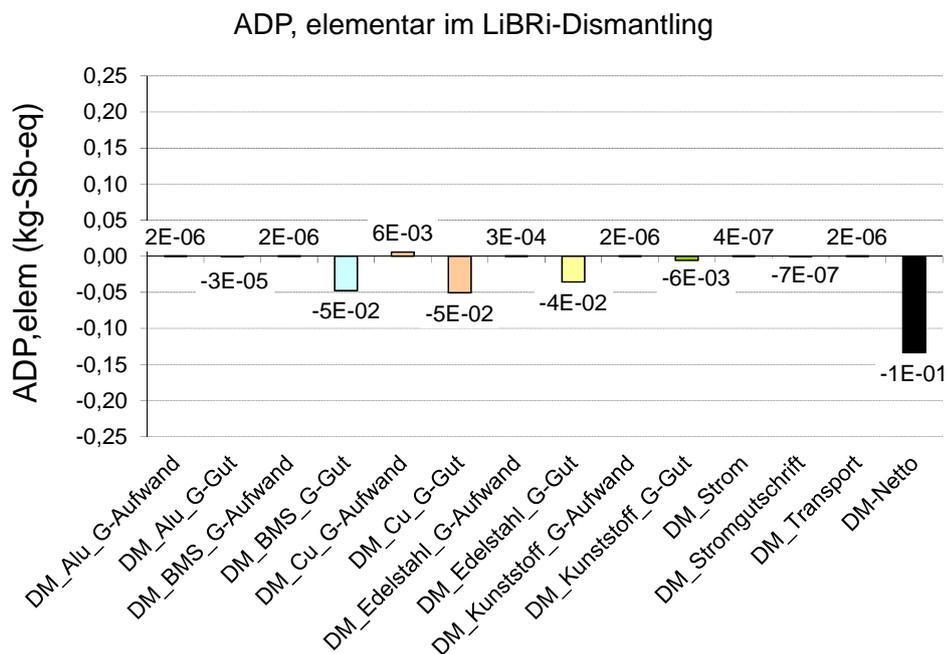


Abbildung 5.5 Elementarer Ressourcenverbrauch bei der Batterie- und Modulzerlegung

Im Vergleich zu den Gutschriften fallen beim Dismantling keine relevanten Lastschriften an, was insgesamt zu einer deutlichen Nettogutschrift führt.

Auch im pyrometallurgischen Schritt fallen keine nennenswerten Lasten in Hinblick auf den elementaren Ressourcenverbrauch an (siehe Abbildung 5.6).

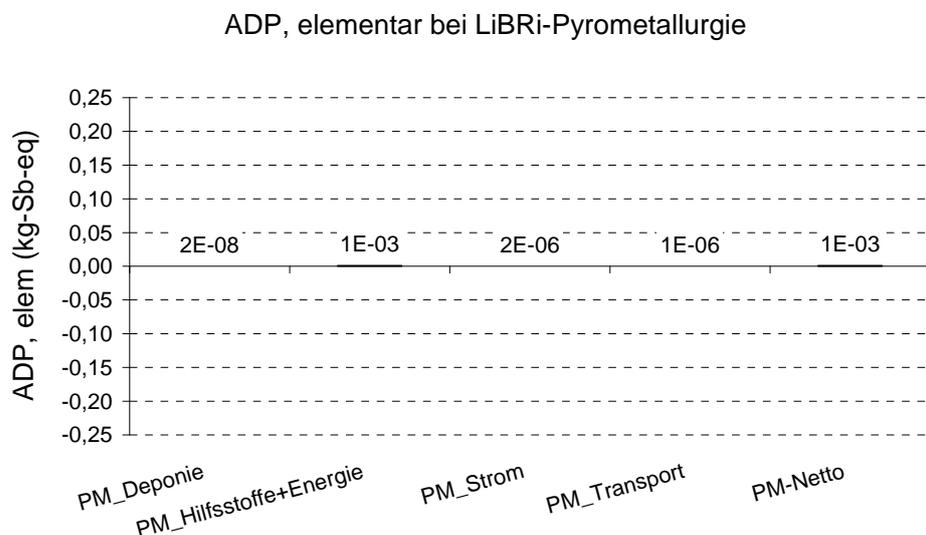


Abbildung 5.6 Elementarer Ressourcenverbrauch des pyrometallurgischen Schrittes

Bei der Kobalt-Nickel-Raffination werden hingegen wieder Wertmetalle gewonnen, was zu Gutschriften beim $ADP_{elem.}$ führt (siehe Abbildung 5.7). Im Vergleich zu den Gutschriften ergeben sich keine nennenswerten Lasten, so dass dieser Schritt eine deutliche Nettogutschrift erhält, was von einem Prozess zum Metallrecycling in dieser Kategorie zu erwarten ist.

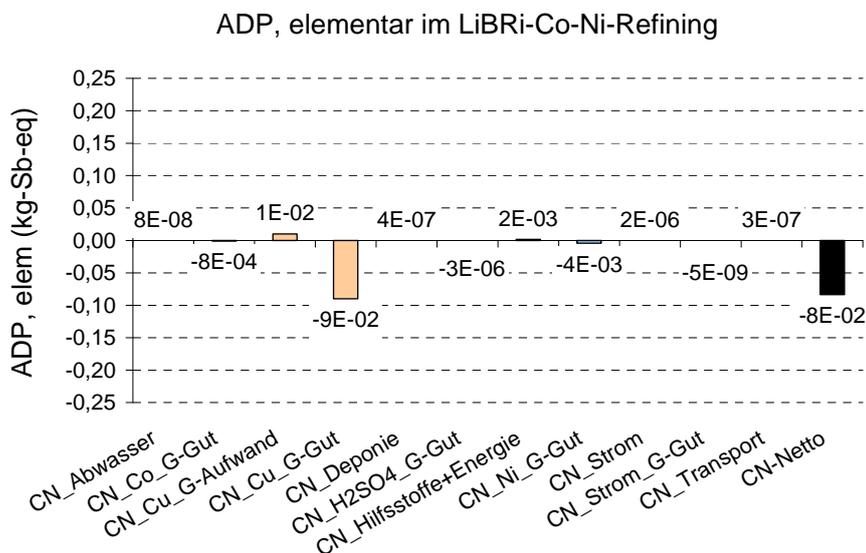


Abbildung 5.7 Elementarer Ressourcenverbrauch bei der Kobalt-Nickel-Raffination

Allerdings fällt auf, dass die Metalle, für deren Gewinnung dieser Aufbereitungsschritt ausgelegt ist (Kobalt und Nickel) nur vergleichsweise geringe Gutschriften erhalten,

wohingegen Kupfer, das als Nebenprodukt anfällt, sehr hohe Gutschriften bekommt. Dies liegt wiederum in der unterschiedlichen Bewertung der drei Metalle bei der Berechnung des $ADP_{elem.}$ (vgl. ADP-Tabelle). Mengenmäßig fallen Kupfer und Nickel in fast gleichen Strömen an, der Kobaltstrom ist ungefähr halb so groß (vgl. Abbildung 4.7). Der vermiedene Einsatz an Schwefelsäure sowie der vermiedene Strom für die Erzeugung der Kobalt- bzw. Nickelsulfatlösungen fallen nicht ins Gewicht.

Ebenso wie die Pyrometallurgie fällt die Schlackeaufbereitung in dieser Kategorie kaum ins Gewicht (siehe Abbildung 5.8). Wie beim Treibhauspotenzial zeigt sich dabei auch hier, dass die Gutschriften aus dem gewonnenen Lithiumcarbonat die hohen Lasten aus dem Hilfsstoff- und Energieeinsatz bei Weitem nicht kompensieren. Das Verhältnis ist beim $ADP_{elem.}$ allerdings deutlich günstiger: Die Gutschrift beträgt hier fast 20 % der Nettolastschrift. Um den Prozess, auch aus ökologischer Sicht, sinnvoll zu machen, sind hier, wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, weitere Optimierungen notwendig.

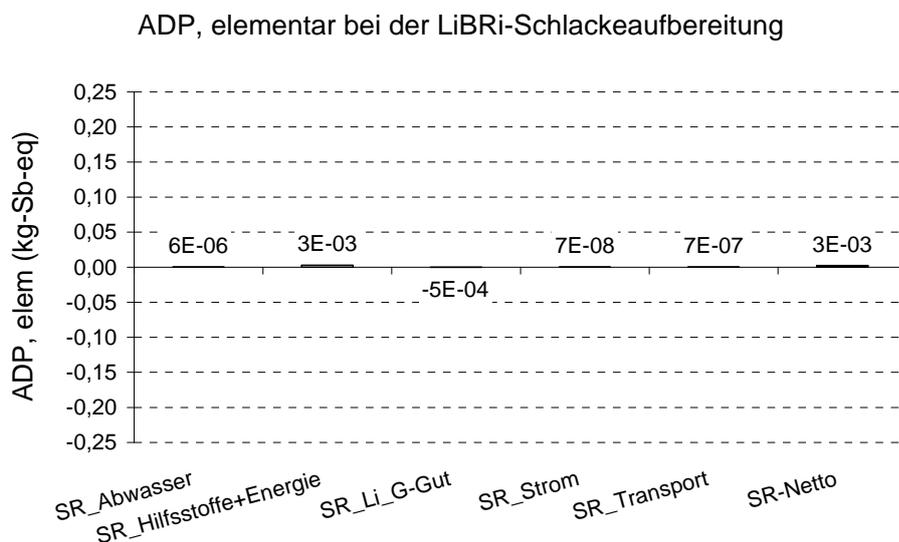


Abbildung 5.8 Elementarer Ressourcenverbrauch bei der Schlackeaufbereitung

5.1.3 Versauerungspotenzial (AP)

Beim Versauerungspotenzial entstehen die wesentlichen Gutschriften aus dem Recycling für Kupfer, Edelstahl und Kunststoff (siehe Abbildung 5.9). Das Recycling des BMS hat hier einen geringeren Einfluss. Die Gutschriften für das Kupfer sind fast genauso hoch wie für den Edelstahl, obwohl fast zehnmal so viel Edelstahl wie Kupfer zurückgewonnen wird (vgl. Abbildung 4.3).

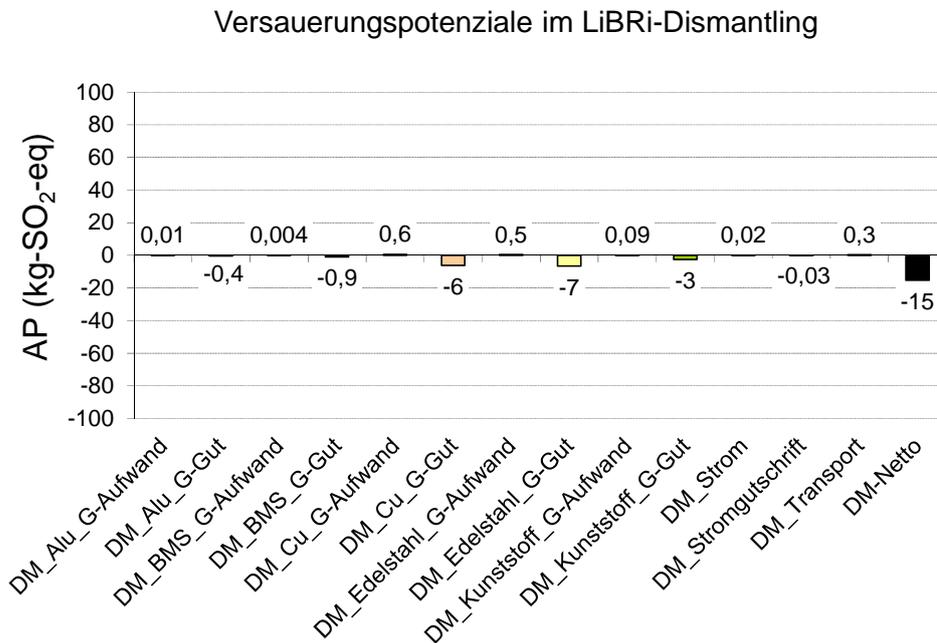


Abbildung 5.9 Versauerungspotenziale bei der Batterie- und Modulerlegung

Die mit der Batterie- und Modulerlegung verbundenen Lasten fallen gegenüber den Gutschriften kaum ins Gewicht.

Der pyrometallurgische Schritt hat kaum einen Einfluss auf das Versauerungspotenzial des LiBRi-Verfahrens (siehe Abbildung 5.10). Der Hilfsstoff- und der nichtelektrische Energieeintrag machen wiederum den höchsten Effekt aus, zudem tragen Strombedarf und Transporte zur Nettolastschrift bei.

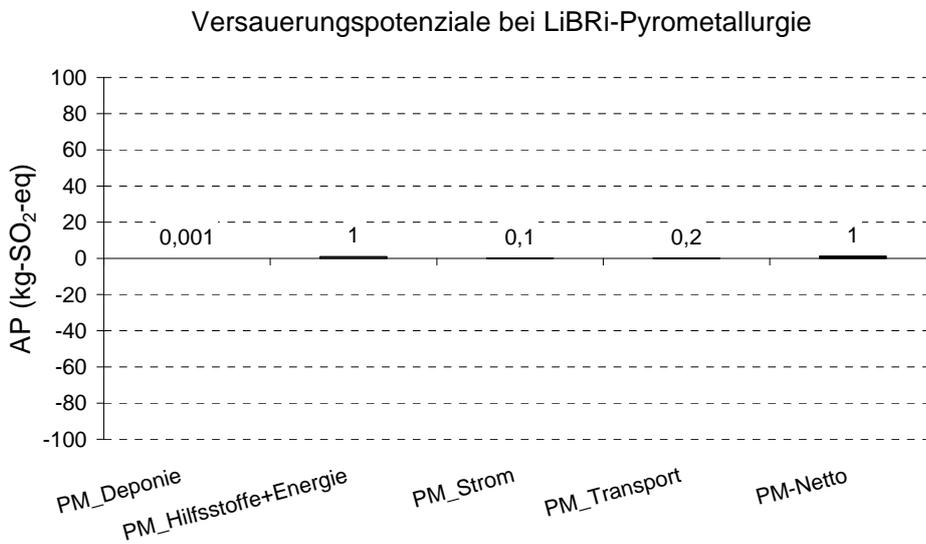


Abbildung 5.10 Versauerungspotenziale des pyrometallurgischen Schrittes

Auch beim Versauerungspotenzial überwiegen bei der Kobalt-Nickel-Raffination die Gutschriften aus der vermiedenen Primärproduktion von Metallen wieder deutlich die mit der Aufbereitung verbundenen Lasten (siehe Abbildung 5.11). Insbesondere Nickel weist hier sehr hohe Gutschriften auf, da es in der Primärgewinnung aus sulfidischen Erzen gewonnen wird, wobei ein hohes Versauerungspotenzial besteht.

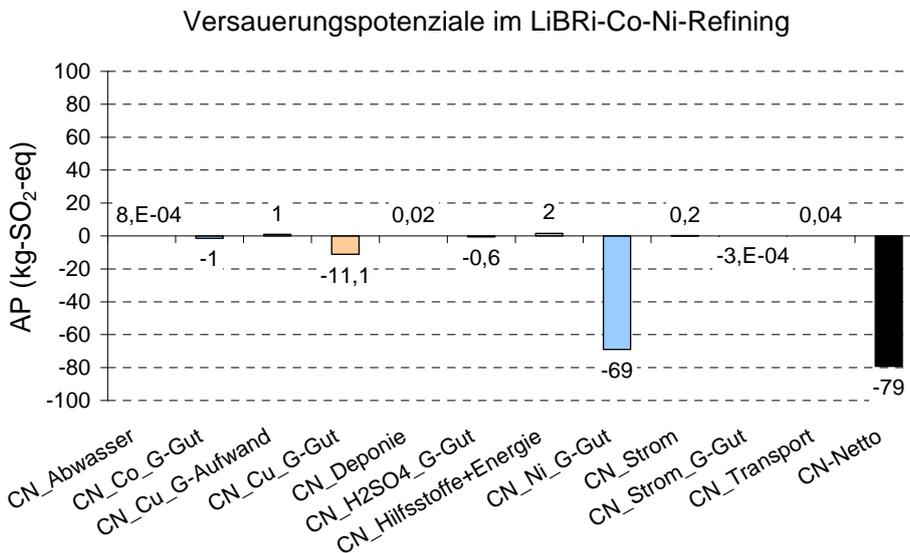


Abbildung 5.11 Versauerungspotenziale bei der Kobalt-Nickel-Raffination

Bei der Schlackeaufbereitung zeigt sich ein ähnliches Bild wie in Kapitel 5.1.1 und 5.1.2 beschrieben: Die Gutschrift für das zurückgewonnene Lithium ist eher gering (knapp 10 %

der Nettolastschrift), wohingegen für den Prozess ein hoher Hilfsstoff- und Energieeinsatz nötig ist (siehe Abbildung 5.12). Die Gründe hierfür sind in Kapitel 5.1.1 dargestellt.

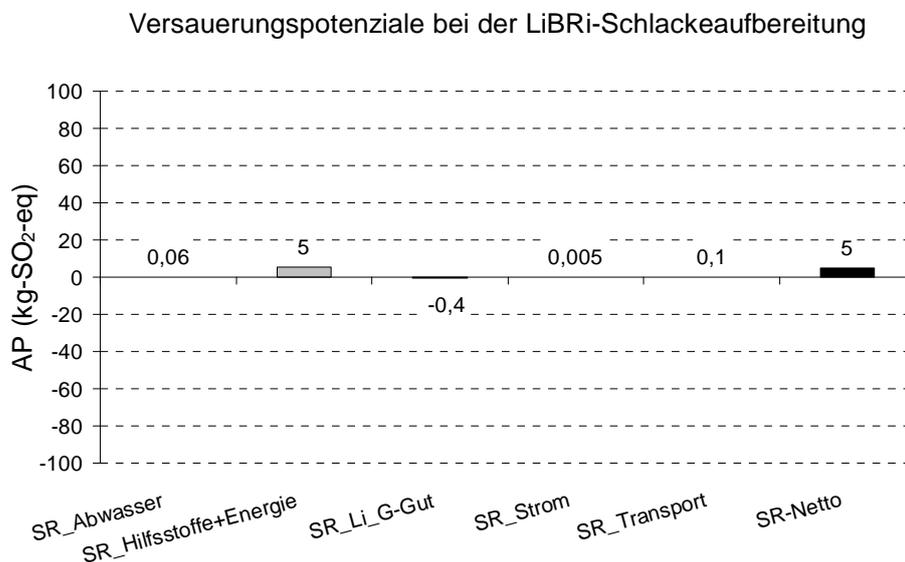


Abbildung 5.12 Versauerungspotenziale bei der Schlackeaufbereitung

5.1.4 Eutrophierungspotenzial, Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial und nicht erneuerbarer Kumulierter Energieaufwand (EP, POCP, KEA n.e.)

Ebenso wie bei den in Kapitel 5.1.1 bis 5.1.3 beschriebenen Wirkungskategorien ist die Batterie- und Modulzerlegung auch bei EP, POCP und KEA n.e. mit im Vergleich zu den Gutschriften nur geringen Lasten verbunden. Die wesentlichen Gutschriften entstehen v. a. durch das Edelstahl- und Kunststoffrecycling; auch Kupfer leistet, insbesondere beim POCP, einen Beitrag.

In ähnlicher Weise entsprechen sich auch die Effekte beim pyrometallurgischen Schritt: Die wesentlichen Belastungen sind auf den Hilfsstoff- und Energieeinsatz zurückzuführen, beim KEA n.e. fällt außerdem der Strombedarf noch ins Gewicht. Bei EP und POCP liegen wie beim AP die Belastungen aus dem Transport bei über 10 % der Gesamtlast.

Bei der Kobalt-Nickel-Raffination sind wie beim $ADP_{elem.}$ und beim AP die Aufwendungen in den Kategorien EP und POCP gegenüber den Gutschriften vernachlässigbar. Die wesentlichen Gutschriften entstehen dabei ebenfalls für Kobalt, Kupfer und Nickel, wobei beim POCP wie beim AP Nickel den wesentlichen Einfluss ausübt. Der KEA n.e. verhält sich im Wesentlichen wie das GWP. Allerdings tritt hier eine leichte Nettolastschrift auf.

Bei der Schlackeaufbereitung entstehen für den noch nicht optimierten Hilfsstoff- und Energieeinsatz in allen Kategorien vergleichsweise hohe Lasten, wohingegen die Gutschrift für das durch den Prozess bereitgestellte Lithiumcarbonat gering ist. Das Verhältnis ist dabei

für EP und POCP etwas günstiger (Lithiumgutschrift 6-7 % der Nettolastschrift) als für den KEA n.e. (Lithiumgutschrift ca. 2 % der Nettolastschrift).

Eine detaillierte Auflistung der Ergebnisse für alle Wirkungskategorien, Prozessschritte und Unterteilungen wie in Kapitel 5.1.1 bis 5.1.3 beschrieben, befindet sich in Annex 3. Das folgende Kapitel zeigt die quantitativen Ergebnisse aller Wirkungskategorien für den Gesamtprozess im Überblick.

5.2 Zusammenfassende Darstellung

Die folgenden Graphiken (Abbildung 5.13 bis Abbildung 5.18) stellen die Ergebnisse bei der Wirkungsabschätzung des LiBRi-Verfahrens in der Gesamtschau über die vier Prozessschritte Dismantling, Pyrometallurgie, Kobalt-Nickel-Raffination und Schlackeaufbereitung dar. Aus diesem Überblick können Schlüsse gezogen werden, in welchen Prozessschritten die wesentlichsten Belastungen bzw. Gutschriften auftreten und welche Prozessschritte für die Ökobilanz des LiBRi-Verfahrens eine eher untergeordnete Rolle spielen. Daraus wird ersichtlich, an welchen Stellen die Rückgewinnung der Materialien mit den meisten Umweltvorteilen verbunden ist und wo die größten Stellschrauben für eine Optimierung liegen.

Für die detaillierte Analyse des jeweiligen Prozessschrittes kann dann auf die ausführliche Auswertung in Kapitel 5.1 zurückgegriffen werden.

Beim Treibhauspotenzial treten sowohl Last- als auch Gutschriften auf. Der Schritt des Dismantling trägt dabei am meisten zu den Gutschriften bei. Die höchsten Lasten fallen beim pyrometallurgischen Schritt sowie bei der Schlackeaufbereitung an. Die Gut- und Lastschriften in der Kobalt-Nickel-Raffination kompensieren sich ungefähr.

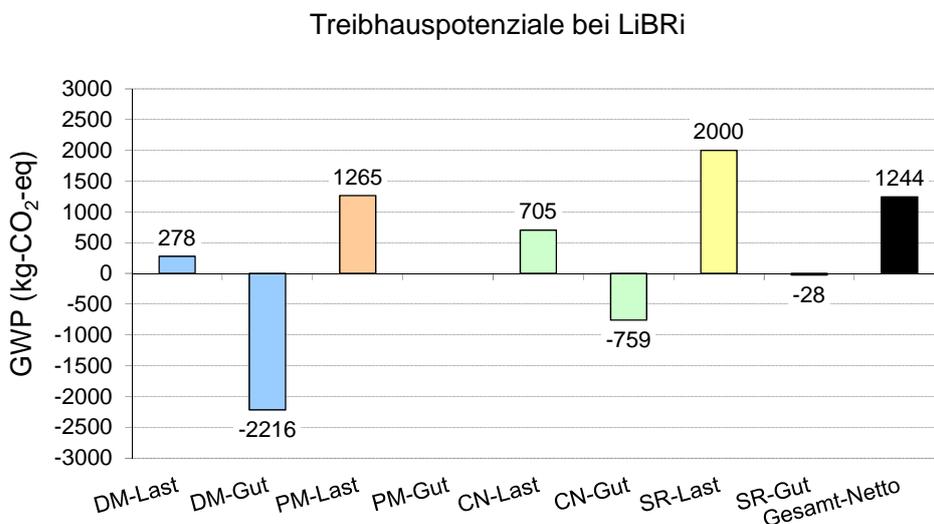


Abbildung 5.13 Treibhauspotenziale des LiBRi-Verfahrens

Unter Berücksichtigung aller vier Prozessschritte ergibt sich für das LiBRi-Verfahren beim GWP eine Nettolastschrift von gut 1000 kg-CO₂-eq/1000 kg-Batterien. Es ist jedoch zu erkennen, dass bei einem Verzicht auf die Rückgewinnung des Lithiums aus der Schlacke eine positive GWP-Bilanz erreicht würde. Dabei muss wiederum im Hinterkopf behalten werden, dass sich die Schlackeaufbereitung noch in einem frühen Entwicklungsstadium befindet und Optimierungspotenziale für den Prozess gegeben sind.

In der Kategorie „elementarer Ressourcenverbrauch“ (siehe Abbildung 5.14) weist das LiBRi-Verfahren deutliche Gutschriften auf. Die Lastschriften sind demgegenüber vernachlässigbar klein. Dieses Bild ist charakteristisch für einen Recyclingprozess, der auf die Rückgewinnung von Metallen abzielt. Wiederum ist zu beachten, dass der höchste Beitrag zur Ressourcenschonung durch die Batterie- und Modulzerlegung und die folgende stoffliche Verwertung der Bestandteile erzielt wird.

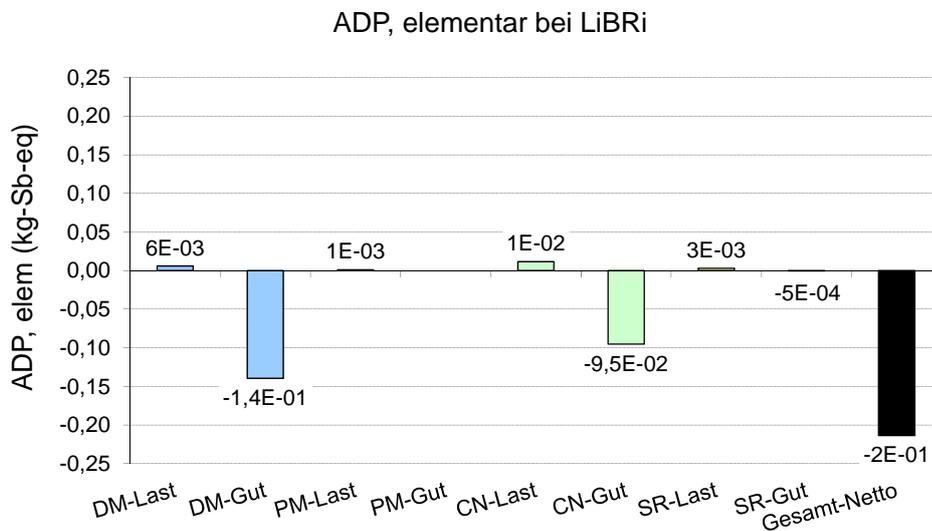


Abbildung 5.14 Elementarer Ressourcenverbrauch des LiBRi-Verfahrens

Das Versauerungspotenzial (Abbildung 5.15), das Eutrophierungspotenzial (Abbildung 5.16) und das photochemische Oxidantienbildungspotenzial (Abbildung 5.17) zeigen ein ähnliches Bild wie der elementare Ressourcenverbrauch: Hohe Gutschriften werden im Dismantling und bei der Kobalt-Nickel-Raffination erzielt, was zu Nettogutschriften für den Gesamtprozess führt.

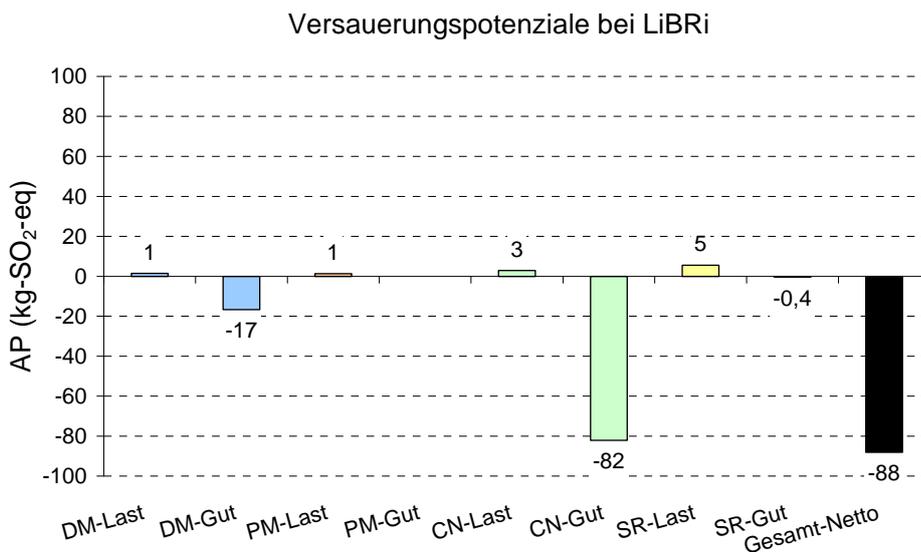


Abbildung 5.15 Versauerungspotenziale des LiBRi-Verfahrens

Im Gegensatz zum $ADP_{elem.}$ und zum AP fallen beim EP die Lastschriften etwas stärker ins Gewicht. Die Nettogutschrift ist jedoch weiterhin deutlich.

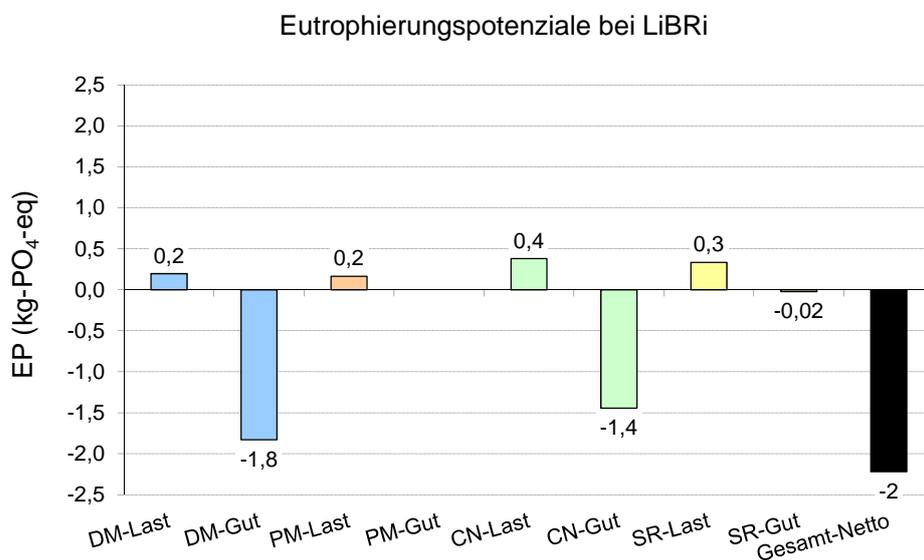


Abbildung 5.16 Eutrophierungspotenziale des LiBRi-Verfahrens

Die mit dem noch im Forschungsstadium befindlichen Schlackeaufbereitungsschritt verbundenen Emissionen sind in diesen Kategorien im Vergleich zu den in den anderen Prozessschritten erzielten Gutschriften gering.

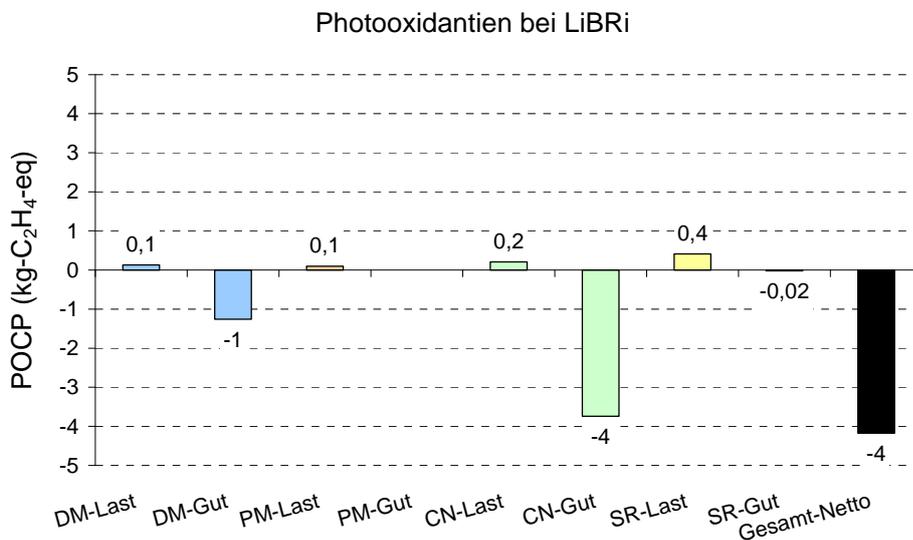


Abbildung 5.17 Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial des LiBRi-Verfahrens

Der nicht erneuerbare Kumulierte Energieaufwand zeigt ein ähnliches Bild wie das GWP: Die relevantesten Gutschriften werden durch die Batterie- und Modulzerlegung und das anschließende Recycling der Wertstoffe erzielt. Die höchste Belastung ist mit dem Schritt der Schlackeaufbereitung verbunden, wobei hier durch Wärmeintegration ein hohes Reduktionspotenzial bzgl. des benötigten Prozessdampfes besteht (siehe auch Kapitel 5.1.1). Im Gegensatz zum GWP ist der für die Pyrometallurgie benötigte KEA n.e. geringer als der für die Kobalt-Nickel-Raffination. Dies liegt darin begründet, dass die zu recycelnden Zellen einen hohen Kohlenstoffanteil besitzen (vgl. Abbildung 4.4), der dem Prozess ohne Last zugeführt wird, jedoch im Prozess zu Kohlendioxidemissionen führt.

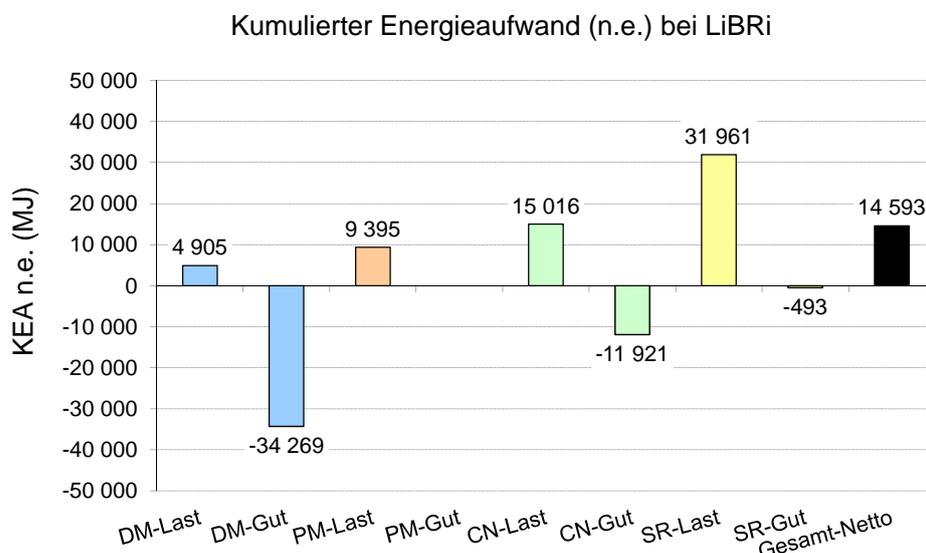


Abbildung 5.18 Nicht erneuerbarer Kumulierter Energieaufwand des LiBRi-Verfahrens

In summa weist das LiBRi-Verfahren beim KEA n.e. eine Nettolastschrift auf.

5.3 Normierte Darstellung

Für die Normierung der Bilanzergebnisse des LiBRi-Verfahrens wurden die Lasten und die Gutschriften jeweils über alle vier Teilschritte (Dismantling, Pyrometallurgie, Kobalt-Nickel-Raffination, Schlackeaufbereitung) aufsummiert und mit globalen Jahresemissions- bzw. Verbrauchswerten normiert. Die verwendeten Normierungsfaktoren sind in Tabelle 5.1 (erste Zeile „Welt“) 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 5.1 Verwendete Normierungsfaktoren [Quelle: CML, 2010]

Wirkungs- kategorie Bezugs- raum	GWP	ADP _{elem.}	AP	EP	POCP
	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
EU 25	5,02E+12	8,46E+07	2,81E+10	1,32E+10	8,48E+09
EU 25/ Welt	0,12	0,24	0,12	0,08	0,09

Zum Vergleich sind die Normierungsfaktoren für EU 25 dargestellt [CML 2010]. Es wird deutlich, dass diese für alle Kategorien bis auf den elementaren Ressourcenverbrauch bei ca. 10 % des Weltwertes liegen.

Das Ergebnis der Normierung ist in Abbildung 5.19 dargestellt.

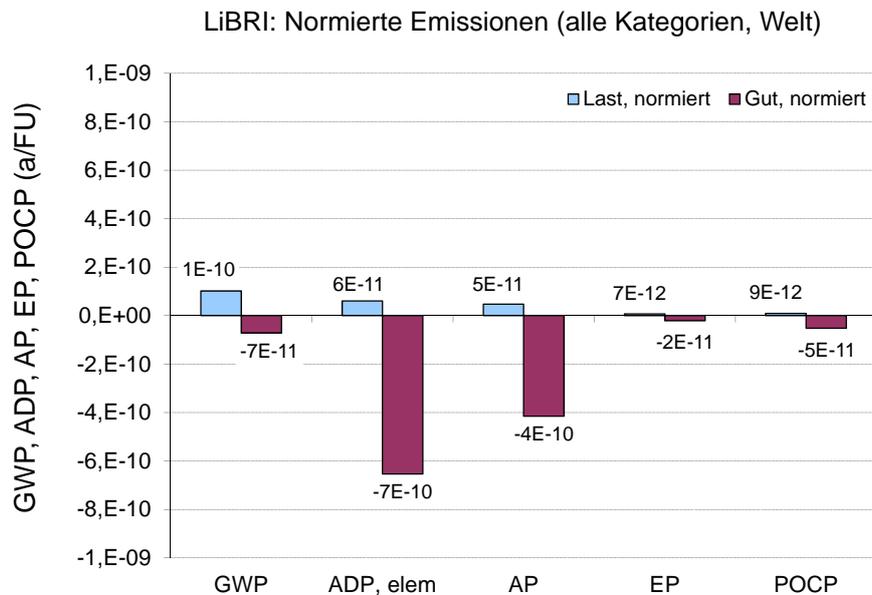


Abbildung 5.19 Normierte Emissionen des LiBRi-Verfahrens

Zunächst wird deutlich, dass alle untersuchten Kategorien zumindest ungefähr in der gleichen Größenordnung liegen: Die normierten Lasten variieren zwischen knapp 10^{-11} und 10^{-10} , die normierten Gutschriften zwischen 10^{-11} und $7 \cdot 10^{-10}$. Dabei fallen die Gutschriften in den Kategorien $ADP_{elem.}$ und AP am deutlichsten ins Gewicht, wohingegen die Lastschrift beim GWP am ausgeprägtesten ist.

Dieses Bild ist für einen Prozess zum Metallrecycling zu erwarten, im Hinblick auf das AP insbesondere deswegen, weil in dem Prozess auch Nickel zurückgewonnen wird. Auf das $ADP_{elem.}$ hat v. a. die Rückgewinnung der Edelmetalle aus dem BMS und des Kupfers einen Einfluss. Treibhausgasemissionen entstehen hauptsächlich im pyrometallurgischen Schritt und momentan auch in der Schlackeaufbereitung.

6 Auswertung

Das folgende Kapitel wertet die in Kapitel 4.4 und 5 dargestellten Ergebnisse aus. Hierzu werden zunächst Parameter und Annahmen, die das Ergebnis der Ökobilanz wesentlich beeinflussen, herausgearbeitet und diskutiert (Kapitel 6.1). Davon ausgehend wird die Relevanz der Aussagen der Ökobilanz 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 der Ökobilanz ergeben.

6.1 Identifizierung der signifikanten Parameter

Die Ergebnisse der Normierung (Kapitel 5.3, Abbildung 5.19) zeigen, dass die Wirkungskategorien $ADP_{elem.}$, AP und in geringerem Maße GWP die Bewertung dominieren. Die anderen Kategorien (EP, POCP) sind von untergeordneter Bedeutung und werden daher an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

- a. Verbrauch elementarer Ressourcen ($ADP_{elem.}$)
- b. Versauerungspotenzial (AP)
- c. Treibhauspotenzial (GWP)

Übergreifend in diesen drei Wirkungskategorien zeigen folgende Materialflüsse bzw. Prozessschritte einen signifikanten Einfluss auf das Gesamtergebnis:

- d. Gutschriften aus dem Wertstoffrecycling bei der Batterie- und Modulzerlegung (Dismantling, DM)
- e. Gutschriften aus der Rückgewinnung von Kupfer, Nickel und teilweise von Kobalt in der Kobalt-Nickel-Raffination (CN)
- f. GWP-Last des pyrometallurgischen Schritts (PM) und der Schlackeaufbereitung (SR)

Zu a:

Die Normierung der Wirkungskategorien zeigt für den Verbrauch elementarer Ressourcen ($ADP_{elem.}$) die höchste Relevanz, was für die Ökobilanz eines Prozesses zur Rückgewinnung von Metallen der Erwartung entspricht. 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 [van Oers et al., 2002]. So wird z. B. in der in dieser Studie verwendeten Methode der Verbrauch von Kupfer deutlich höher bewertet als der Verbrauch von Kobalt, Nickel oder Lithium. Diese Charakterisierungsfaktoren weisen den Metallen einen Stellenwert zu, der nicht den ingenieurtechnischen und ökonomischen Erwartungen entspricht. Aus

diesem Grund wird der Einfluss der Wahl unterschiedlicher Charakterisierungsfaktoren in einer Sensitivitätsanalyse untersucht (Kapitel 6.2.2.4).

Neben der Bewertung des Verbrauchs elementarer Ressourcen ist die Bewertung des Verbrauchs fossiler Ressourcen für die ökologische Bewertung eines Verfahrens wesentlich. Dies wird bereits in der Wirkungskategorie KEA n.e. abgedeckt. Hiermit wird die Frage, ob der Verbrauch elementarer Ressourcen ($ADP_{\text{elem.}}$) oder der fossiler Ressourcen (ADP_{fossil}) bei der Gesamtbetrachtung des ADP ($ADP_{\text{gesamt}} = ADP_{\text{elem.}} + ADP_{\text{fossil}}$) dominiert, in einer weiteren Sensitivitätsanalyse untersucht (Kapitel 6.2.2.5).

Der Beitrag der einzelnen Ströme zum $ADP_{\text{elem.}}$ wird in Punkt d und e diskutiert.

Zu b:

Das Versauerungspotenzial geht aus der Normierung als Kategorie mit der zweithöchsten Relevanz hervor. Da es sich bei der Versauerung um regionale Umweltschäden handelt, wird hierfür eine Disaggregation des Ergebnisses nach Regionen durchgeführt (vgl. Kapitel 6.2.2.6). Da der Hauptbeitrag zum Versauerungspotenzial aus der Gutschrift für die Primärproduktion von Nickel resultiert, muss der verwendete Datensatz vertieft diskutiert werden. Hierzu wird eine Sensitivitätsrechnung mit einem alternativen Datensatz durchgeführt (vgl. Kapitel 6.2.2.2).

Der Beitrag der einzelnen Ströme zum AP wird in Punkt d und e diskutiert.

Zu c:

Das Treibhauspotenzial wird einerseits durch die Gutschriften aus dem Dismantlingschritt bestimmt; die Beiträge der einzelnen Materialströme werden unter Punkt d diskutiert. Lastseitig spielen die Treibhausgasemissionen aus dem pyrometallurgischen Schritt und insbesondere aus der Schlackeaufbereitung die wesentliche Rolle (siehe Punkt f).

Zu d:

Auf Gutschriftenseite wird das Ergebnis der Ökobilanz wesentlich durch das Recycling der Wertstoffe aus der Batterie- und Modulerlegung (DM) beeinflusst. Hier führt neben den Gutschriften für die aus BMS, Kupferkabeln und dem Rahmen zurückgewonnenen Wertstoffe insbesondere das Recycling des Edelstahlgehäuses zu hohen Gutschriften. Momentan befinden sich im Hinblick auf Leichtbau jedoch andere Materialien (Aluminium und Carbon-Fibre-Composite (CFK)) in der Entwicklung. Um die Beeinflussung des LCA-Ergebnisses durch die Verwendung dieser zukünftigen Gehäusematerialien zu testen, wurde die in Kapitel 6.2.2.1 vorgestellte Sensitivitätsbetrachtung durchgeführt.

Neben der Art der Materialien, die zum Recycling gelangen, ist auch die Effizienz wesentlich, mit der diese Materialien in Sekundärrohstoffe umgewandelt werden. In der vorliegenden Ökobilanz liegt dabei die Erfassung der Altbatterien außerhalb der Systemgrenze (vgl. Kapitel 3.2.1, 3.2.2). Für die Aufbereitung wird angenommen, dass 100 % des in Batterie- und Modulgehäuse vorhandenen Wertmaterials (PA 6, Edelstahl, Kupfer, Aluminium,

Wertmetalle im BMS) einer stofflichen Verwertung zugeführt werden, Verluste werden nur für das Umschmelzen (mittlere Umschmelzeffizienzen aus Literaturwerten) berücksichtigt. Dies muss bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden, da die Höhe der im DM erzielten Gutschriften für jedes Material linear abhängig von der Recyclingeffizienz ist, so dass sinkende Effizienzen in gleichem Maße die Gutschriften reduzieren. Das DM sollte dementsprechend sorgfältig erfolgen, um eine hohe ökonomische wie ökologische Wertschöpfung zu erreichen. In der Zerlegeanlage von Umicore in Hanau wird dies bereits realisiert.

Zu e:

Die Kobalt-Nickel-Raffination zielt auf die Rückgewinnung von Nickel und Kobalt ab, wobei jedoch auch die Aufbereitung des Nebenproduktes Kupfer zu hohen Gutschriften in der Bilanz führt. Insbesondere in der Wirkungskategorie $ADP_{elem.}$ ist Kupfer ausschlaggebend (siehe Punkt a). Im Vergleich zu den Gutschriften aus der Nickelrückgewinnung sind die Gutschriften für das wiedergewonnene Kobalt, insbesondere in den Kategorien AP und POCP, gering, obwohl die primäre Nickel- und Kobaltproduktion mit ähnlichen Umweltlasten einhergeht. Zum einen liegt dies daran, dass in dem untersuchten Prozess nur etwa halb so viel Kobalt wie Nickel zurückgewonnen wird (siehe Abbildung 4.7), zum anderen wird das Ergebnis durch die Wahl des für die vermiedene Primärproduktion gutgeschriebenen Datensatzes beeinflusst, der v. a. für die Kobaltproduktion deutliche Unsicherheiten enthält. Um diesen Einfluss aufzuzeigen, wird die in Kapitel 6.2.2.3 beschriebene Sensitivitätsanalyse mit variierten Datensätzen für die substituierte Primärproduktion von Kobalt durchgeführt.

Zu f:

Wesentliche Umweltlasten entstehen im LiBRi-Prozess durch Treibhausgasemissionen in den Schritten Pyrometallurgie und Schlackeaufbereitung. Hier werden Optimierungspotenziale v. a. in der Wärmeintegration der beiden Prozessschritte vermutet. Im Rahmen dieser Arbeit konnte dieser Einfluss jedoch nicht abgeschätzt werden, da sich das Konzept noch nicht in der Umsetzung befindet. Ein weiteres Optimierungspotenzial in Hinblick auf den Energiebedarf der Pyrometallurgie steckt in der an die Prozessführung angepassten Mischung der Zelltypen. Hierzu lagen für diese Studie jedoch ebenfalls keine Daten vor.

In Hinblick auf die Wirkungskategorie „Humantoxizität“ stellen potenzielle Flusssäureemissionen aus der Verbrennung der fluorhaltigen Zellkomponenten einen ökologischen Hotspot dar. Im neuerdings im industriellen Maßstab umgesetzten pyrometallurgischen Prozess von Umicore werden diese mit einer entsprechenden Rauchgasreinigung abgefangen, so dass die HF-Emissionen der Pyrometallurgie unter 20 kg/a liegen.

6.2 Beurteilung

Um die Aussagekraft der erstellten Ökobilanz 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 Dismantling, und Kobalt-Nickel-Raffination ist die Datenlage als gut zu betrachten, da sie sich auf ein Verfahren im Pilot- bzw. industriellen Maßstab stützt. Auch für den pyrometallurgischen Prozessschritt ist die Beschreibung ausreichend, da hier ebenfalls Daten aus einer Pilotanlage sowie Simulationsrechnungen für den großtechnischen Maßstab zugrunde liegen. Eine Validierungsrechnung anhand der Daten der industriellen Anlage in Antwerpen, die sich seit Sommer 2011 im Betrieb befindet, ist hier erstrebenswert. Demgegenüber ist der Prozessschritt der Schlackeaufbereitung aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums zukünftig noch vertieft zu untersuchen und konnte in dieser Ökobilanz möglicherweise nur unzureichend beschrieben werden.

Energie- und Hilfsstoffeinsatz bei der Schlackeaufbereitung

Der Einsatz von Hilfsstoffen und Energie führt bei der Schlackeaufbereitung zu hohen Umweltlasten (insbes. GWP und KEA n.e.; vgl. Abbildung 5.4, Abbildung 5.13 und Abbildung 5.18). Energie wird dabei vorwiegend für das Einengen von Flüssigkeit verwendet. Eine Reduktion des Energiebedarfs ist hier durch die Nutzung von Abwärme aus dem vorangehenden pyrometallurgischen Schritt angestrebt. Diese wird allerdings erst wirtschaftlich rentabel, wenn sich das Verfahren zur Schlackeaufbereitung in einem ausreichend großen Maßstab befindet. In der Prozessentwicklung werden außerdem Möglichkeiten untersucht, den Hilfsstoffeinsatz in qualitativer und quantitativer Hinsicht zu optimieren. Zudem wird an der Erhöhung der Effizienz der Lithiumrückgewinnung gearbeitet.

6.2.2 Sensitivitätsprüfung

Im Folgenden wird die Sensitivität der Ergebnisse der Ökobilanz gegenüber einer Variation von ausgewählten, ergebnisrelevanten Einflussgrößen (vgl. Kapitel 6.1) dargestellt und diskutiert.

6.2.2.1 Alternativmaterialien für das Batteriegehäuse

Im Basisszenario dieser Studie wird als Material für das Batteriegehäuse Edelstahl angenommen (vgl. Tabelle 4.1). Andere mögliche Materialien sind Aluminium oder Carbon-

fibre Composites (CFK). Diese Sensitivität untersucht den Effekt der Wahl eines anderen Gehäusematerials auf das Ergebnis der Ökobilanz des Batterierecyclings.

Vorstellung der Sensitivität

Sowohl Aluminium als auch CFK sind deutlich leichter als Stahl, was ihre Nutzung im Automobilbau interessant macht. Die zugrunde gelegten Massen für die Bilanzierung sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1 Für die Bilanzierung zugrunde gelegte Massen für das Aluminium- und das CFK-Gehäuse

Parameter	Aluminium	Reduktion ggü. Edelstahl	CFK	Reduktion ggü. Edelstahl
Gehäusemasse (kg)	147	-37,5 %	100	-57,5 %
Gesamtmasse zum Recycling, FU (kg)	912	-10 %	864	-15 %

Für die Interpretation der Bilanzergebnisse muss beachtet werden, dass sich durch die leichteren Gehäusematerialien die FU ändert. Da vorausgesetzt wird, dass sich nur das Gehäusematerial ändert, alle anderen Massen jedoch konstant gehalten werden, sinkt das betrachtete Bezugsgewicht. Die Anzahl der recycelten Batteriesysteme pro FU bleibt konstant.

Für Aluminium wird wie bei Edelstahl davon ausgegangen, dass es zu 100 % einer stofflichen Verwertung zugeführt wird. Die Umschmelzeffizienz beträgt 90 %.

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 völligen und vollständigen Verbrennung ausgegangen wird.

Die für die Umrechnung zugrunde gelegten Werte zeigt Tabelle 6.2.

Tabelle 6.2 Für die Modellierung der Steinkohlesubstitution im Zementwerk zugrunde gelegte Daten

Parameter	Kohlenstoffanteil	Quelle	Heizwert (MJ/kg)	Quelle
Carbon	100 %	elementar	34	elementar
Epoxid (Mittelwert versch. Harze)	70 %	Saechtling, 1998	29,2	bauforumstahl.de
CFK (50 % Carbon/ 50 % Epoxid)	85 %	---	31,6	---
Steinkohle (DE-Importmix-2005)	73 %	GEMIS v.4.6	27,5	GEMIS v.4.6

Die aus den veränderten Gehäusematerialien resultierenden Materialmengen, für die beim Recycling bzw. der thermischen Verwertung Gutschriften erteilt werden, sind in Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2 dargestellt.

Beim Aluminium sind 95 % der Masse (134 kg) auf das Gehäuse zurückzuführen. Die verbleibenden 25 kg Edelstahl stammen aus Kabeln und dem Rahmen (siehe Tabelle 4.1).

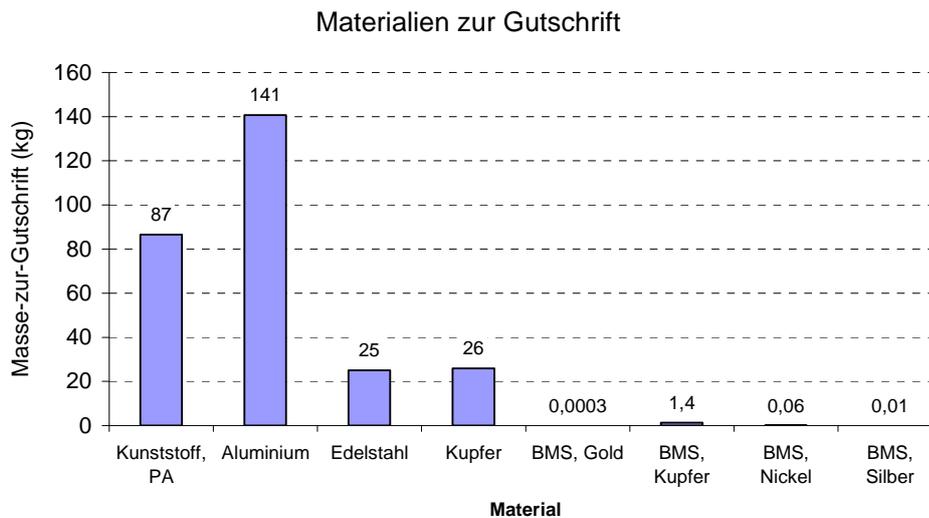


Abbildung 6.1 Massen der Materialien, für die bei der Batterie- und Modulzerlegung (Dismantling) Gutschriften erteilt wurden (bereinigt um Aufbereitungsverluste), **Alu-Gehäuse**

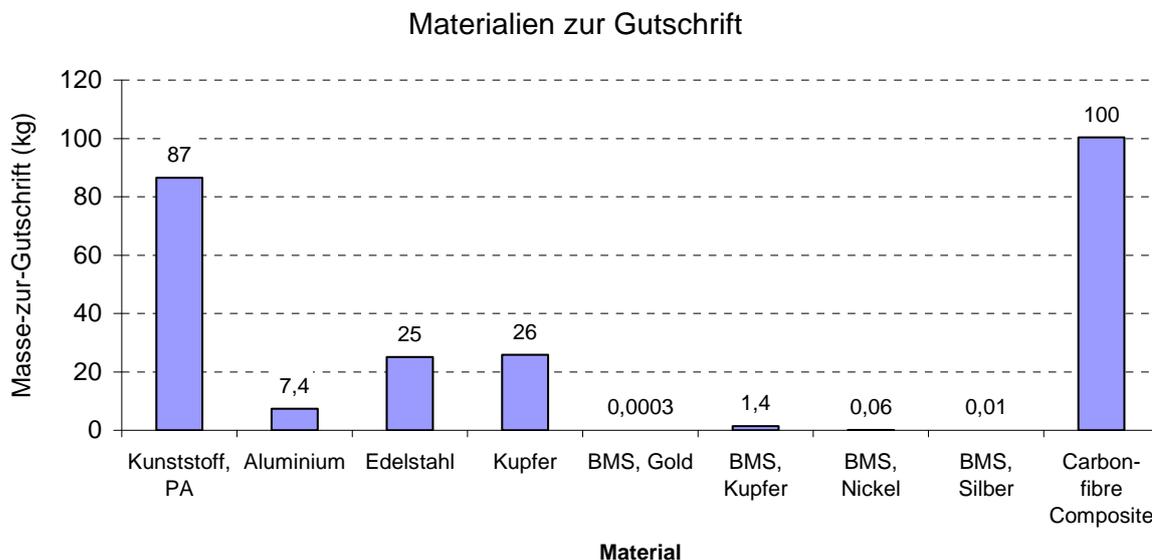


Abbildung 6.2 Massen der Materialien, für die bei der Batterie- und Modulzerlegung (Dismantling) Gutschriften erteilt wurden (bereinigt um Aufbereitungsverluste), **CFK-Gehäuse**

Ergebnis für das Aluminiumgehäuse

Im Wesentlichen findet hier aufgrund des erhöhten Aluminiumanteils und des erniedrigten Edelstahlanteils eine Verschiebung der Gutschriften vom Edelstahl zum Aluminium statt (vgl. Abbildung 6.3 bis Abbildung 6.5 vs. Abbildung 5.1, Abbildung 5.5 und Abbildung 5.9).

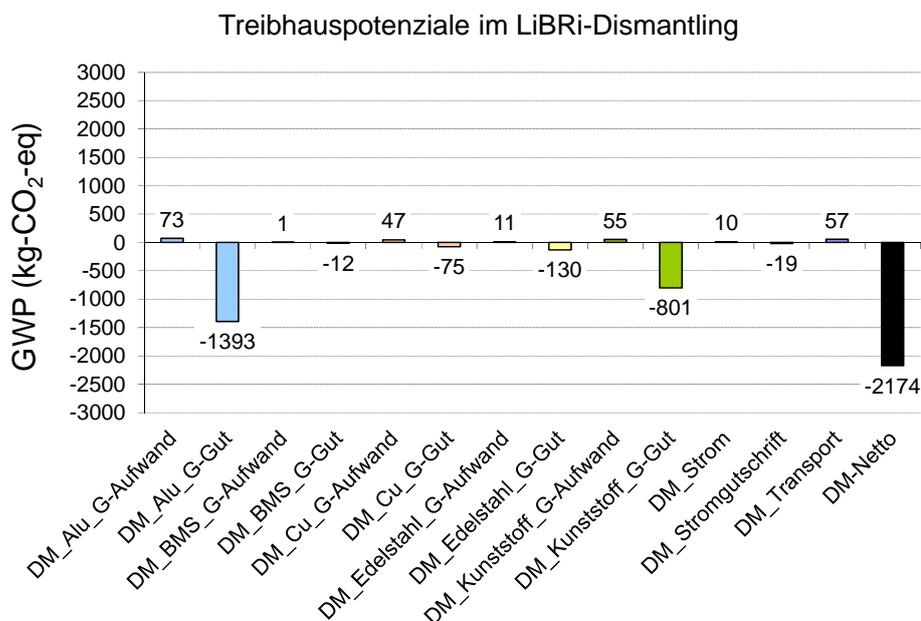


Abbildung 6.3 Treibhauspotenziale bei der Batterie- und Modulzerlegung, **Alu-Gehäuse**

Statt einer Gutschrift von ca. 1200 kg-CO₂-eq beim Edelstahl im Basisszenario werden jetzt ca. 1400 kg-CO₂-eq für das recycelte Aluminium gutgeschrieben. Die Gutschrift für das Aluminium ist also beim GWP trotz der geringeren eingesetzten Masse (vgl. Tabelle 6.1) höher. Dies liegt daran, dass hier jeweils zu 100 % Primärmetalle gutgeschrieben werden⁸ und der Energiebedarf, den Aluminium in seiner Primärherstellung hat, sehr hoch ist. Die Nettogutschrift des Dismantling erhöht sich dadurch leicht.

Im Gegensatz dazu verringert sich beim ADP_{elem.} die Gutschrift deutlich. Die Gutschrift für Aluminium erhöht sich zwar ca. um den Faktor 20, ihr Beitrag ist jedoch in dieser Kategorie nicht wesentlich. Die Reduktion der Gutschrift aus dem Edelstahlrecycling, von 0,04 kg-Sb-eq auf 0,004 kg-Sb-eq, beeinflusst jedoch das Ergebnis.

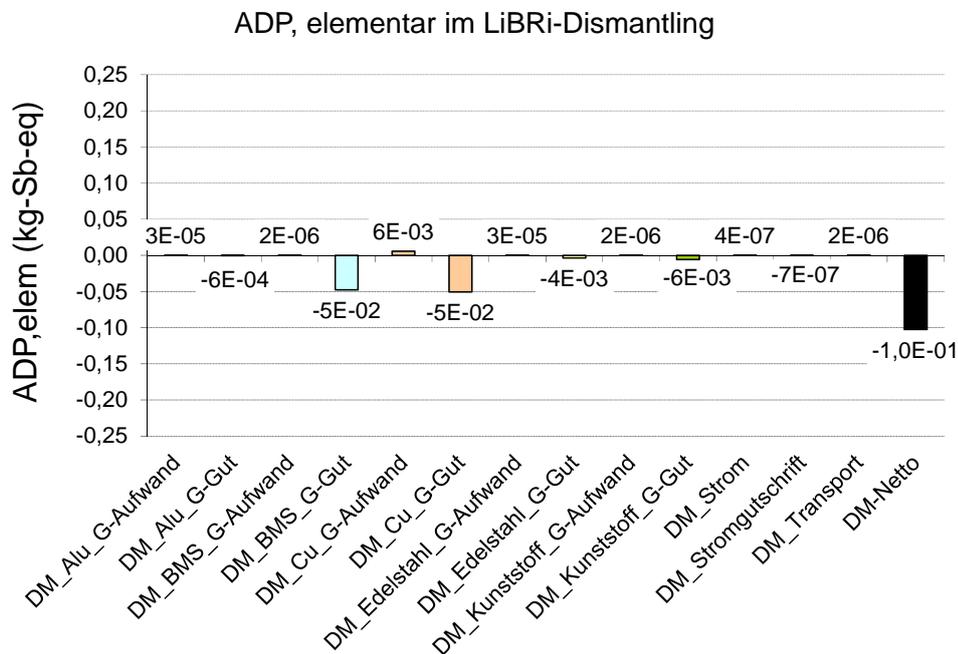


Abbildung 6.4 Elementarer Ressourcenverbrauch bei der Batterie- und Modulzerlegung, **Alu-Gehäuse**

Beim Versauerungspotenzial ändert sich das Gesamtergebnis kaum, da sich die Bewertung von Aluminium und Edelstahl in dieser Kategorie die Waage hält. Spezifisch ist das Aluminium hier höher bewertet, was trotz des geringeren Materialeinsatzes zu ungefähr gleich hohen Gutschriften durch die angenommene Substitution der Primärproduktion führt.

⁸ Es muss hier immer im Hinterkopf behalten werden, dass eine Gutschrift von 100 % Primärmetall beim Recycling zumindest eine Anrechnung von **100 % Primärmetall bei der Lastschrift für die Herstellung der Komponente** erfordert. In dieser Bilanz wird dies aufgrund der gewählten Systemgrenzen nicht deutlich. Generell steht die Gutschriftenvergabe für Sekundärmaterialien in Ökobilanzen im Moment stark in der Fachdiskussion.

Beim Eutrophierungspotenzial sinkt die Nettogutschrift leicht, da die höheren Gutschriften für das Recyclingaluminium die niedrigeren aus dem Edelstahlrecycling nicht ausgleichen. Beim photochemischen Oxidantienbildungspotenzial und beim nicht erneuerbaren Kumulierten Energieaufwand heben sich die Effekte wiederum ungefähr auf, so dass die Nettogutschrift quasi konstant bleibt.

Versauerungspotenziale im LiBRi-Dismantling

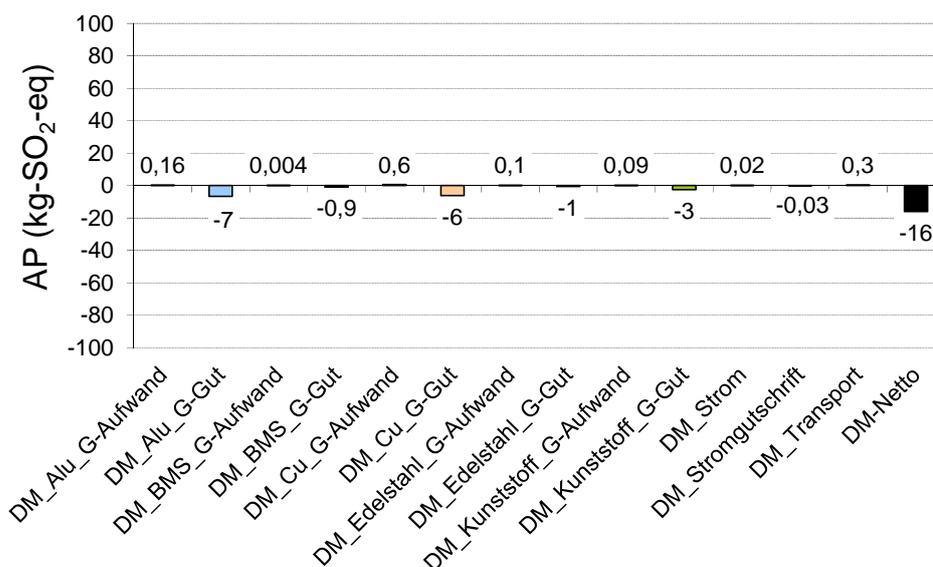


Abbildung 6.5 Versauerungspotenziale bei der Batterie- und Modulerlegung, **Alu-Gehäuse**

Treibhauspotenziale bei LiBRi

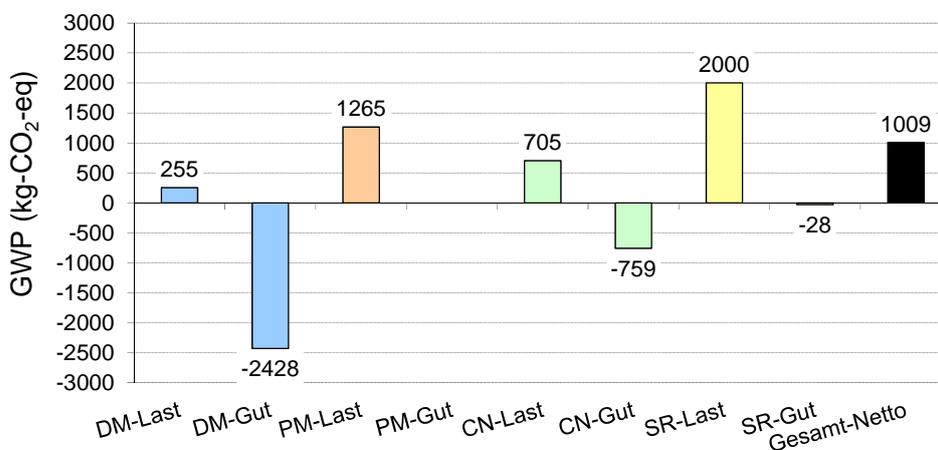


Abbildung 6.6 Treibhauspotenzial des LiBRi-Verfahrens, **Alu-Gehäuse**

Im Hinblick auf den Beitrag dieser Sensitivität zum Gesamtbild des LiBRi-Verfahrens zeigt sich für das GWP das in Abbildung 6.6 dargestellte Bild. Im Vergleich zu Abbildung 5.13 wirkt sich die höhere Gutschrift aus dem Dismantling bei der Verwendung eines Alugehäuses erkennbar (ca. -20 %) auf die Nettolastschrift des Gesamtprozesses aus.

Die reduzierte Gutschrift beim $ADP_{elem.}$ und EP hat ebenfalls eine Auswirkung auf das Nettoergebnis des Gesamtprozesses (-14 % bzw. -23 %). Bei AP, POCP und KEA n.e. ergibt sich aus der Variation des Gehäusematerials kein relevanter Einfluss auf das Ergebnis des Gesamtprozesses.

Ergebnis für das CFK-Gehäuse

Beim CFK-Gehäuse macht sich in den Ergebnissen vor allem die Reduktion der Gutschriften aus dem Edelstahlrecycling bemerkbar. Aus der thermischen Verwertung des CFK-Gehäuses als Ersatzbrennstoff in einem Zementwerk ergeben sich keine nennenswerten Gutschriften (Abbildung 6.7 bis Abbildung 6.9). Allerdings ist aufgrund der Steinkohle-Substitution die Verbrennung des CFK auch nicht mit GWP-Lasten verbunden.

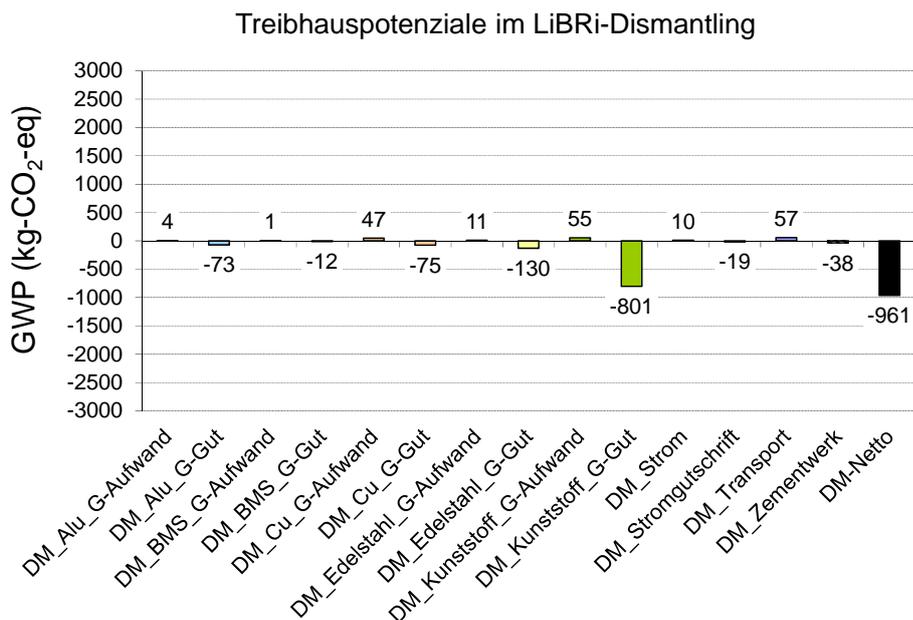


Abbildung 6.7 Treibhauspotenziale bei der Batterie- und Modulzerlegung, **CFK-Gehäuse**

Die Edelmetallgutschrift reduziert sich beim GWP deutlich, was zu einer Halbierung der Nettogutschrift führt. Auch beim $ADP_{elem.}$, AP, EP, POCP und KEA n.e. ist ein deutlicher Rückgang zu sehen, der zwischen ca. 30 % bis 50 % schwankt. 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.

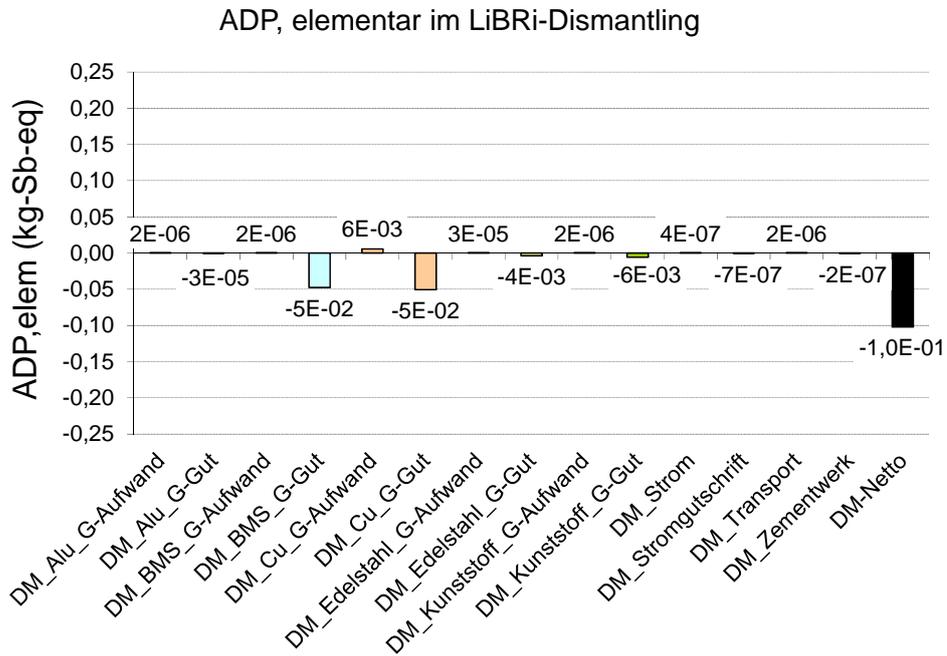


Abbildung 6.8 Elementarer Ressourcenverbrauch bei der Batterie- und Modulzerlegung, **CFK-Gehäuse**

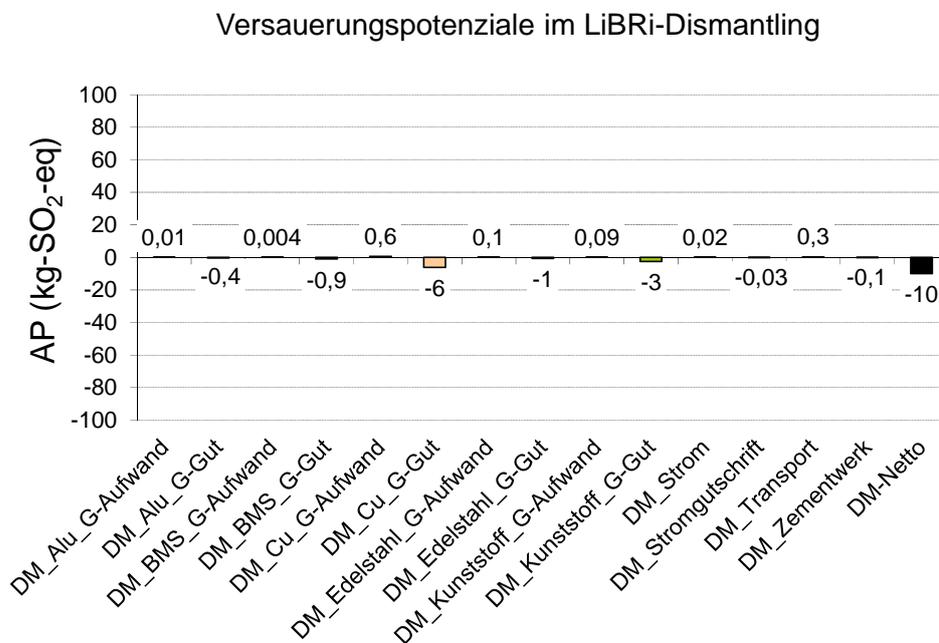


Abbildung 6.9 Versauerungspotenziale bei der Batterie- und Modulzerlegung, **CFK-Gehäuse**

Das Gesamtergebnis des LiBRi-Verfahrens verhält sich entsprechend, wie in Abbildung 6.10 am Beispiel des GWP gezeigt.

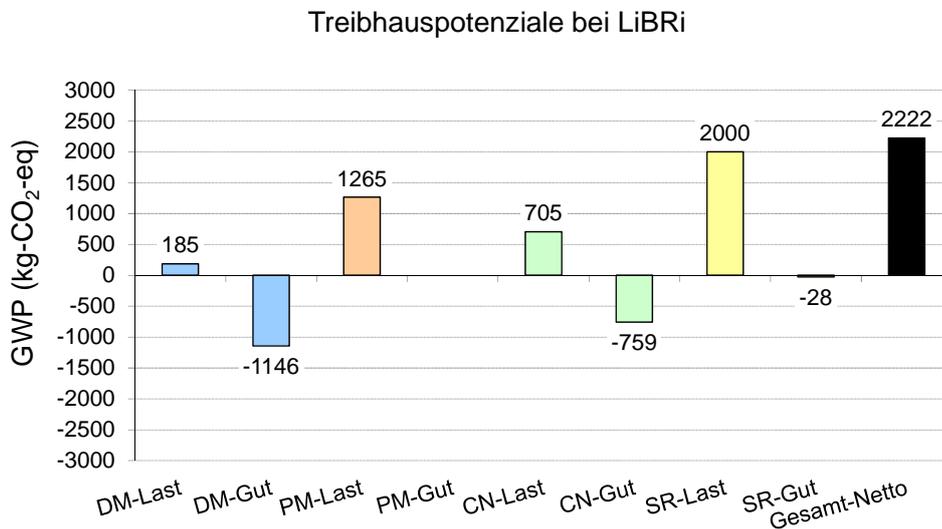


Abbildung 6.10 Treibhauspotenzial des LiBRi-Verfahrens, **CFK-Gehäuse**

Die Nettolast des Gesamtprozesses ist bei GWP und KEA n.e. in dieser Sensitivität fast doppelt so hoch. Beim EP reduziert sich die Nettogutschrift um etwa ein Drittel, bei ADP_{elem.} und POCP ebenfalls leicht (-14 % bzw. -12 %). Das Versauerungspotenzial des Gesamtprozesses bleibt quasi konstant, da in dieser Wirkungskategorie der weitaus wesentlichste Beitrag in einem anderen Prozessschritt stattfindet.

Eine stoffliche Verwertung des CFK-Gehäuses könnte zu höheren Gutschriften führen. Ebenso ist zu beachten, dass bei der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus die potenziellen Umweltwirkungen bei der Herstellung mitbetrachtet werden. Eventuell ergibt sich hier ein Vorteil für CFK, falls der Produktionsaufwand mit geringeren Lasten als die Primärherstellung von Edelstahl verbunden ist.

Zudem muss sowohl bei CFK als auch bei Aluminium berücksichtigt werden, dass diese durch ihre geringere Masse während der Nutzungsphase zu reduzierten Umweltwirkungen führen.

6.2.2.2 Sensitivität Nickel-Datensatz

In der Analyse der Ergebnisse wird deutlich, dass die Gutschriften für die Metalle einen dominierenden Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Der Einfluss einzelner Metalle auf die Indikatoren bleibt dabei meistens beschränkt. In einigen Fällen ist er allerdings herausragend. So dominiert Kupfer das Ergebnis des „Abiotic Depletion Potential“. Grund hierfür ist der hohe Faktor, der Kupfer im Bewertungsschema zugesprochen wird. Das

Ergebnis selber kann als relativ stabil angesehen werden, da die Entnahme von Kupfer quasi „stöchiometrisch“ berechnet wird und es Abweichungen zwischen verschiedenen Ökobilanzen nur über die Betrachtung/Erfassung von Verlusten geben kann. Diese sollten allerdings beschränkt bleiben.

Der andere Indikator, der über ein Metall dominiert wird, ist das Versauerungspotenzial (AP). Hierbei findet man eine herausragende Bedeutung für Nickel. Der Grund hierfür liegt im Bergbau sulfidischer Erze, die im Verlauf der Verhüttung Schwefeldioxid emittieren. Da nicht nur das Nickel sulfidisch vorliegt, sondern auch seine Begleiter (Eisen), ergibt sich hieraus ein großer „Hebel“, der je nach Erzqualität zu sehr hohen Emissionen führen kann. Während einige Anlagen diese Schwefeldioxidemissionen abfangen (Schwefelsäureproduktion), verfügen andere Nickelproduzenten (Norilsk) nach wie vor über keine „Entschwefelung“.

Um den Einfluss unterschiedlicher Ökobilanz-Datenbanken zu illustrieren, werden die Daten aus der in diesem Projekt für Buntmetalle genutzten ecoinvent-Datenbank mit den Daten des Nickelinstitutes verglichen [Ni-Institut 2003].

In der folgenden Tabelle sind die Emissionen für die Indikatoren per Kilogramm Nickel aufgelistet. In der Graphik werden die Unterschiede sichtbar, wobei die ecoinvent-Daten mit 100 indexiert werden.

Tabelle 6.3 Ergebnis der Umweltindikatoren für Nickel aus den Ökobilanzdaten ecoinvent und Nickelinstitut

		ecoinvent	Nickelinstitut
		Nickel	Nickel, Class I
GWP	kg CO ₂ -eq/kg	11,2	14,9
KEA	MJ/kg	156	225
ADP	kg Sb-eq/kg	0,000105	0,000124
AP	kg SO ₂ -eq/kg	1,71	1,21
Eutrophierung	Kg PO ₄ -eq/kg	0,018	0,00926
POCP	kg Et-eq/kg	0,0736	0,0513

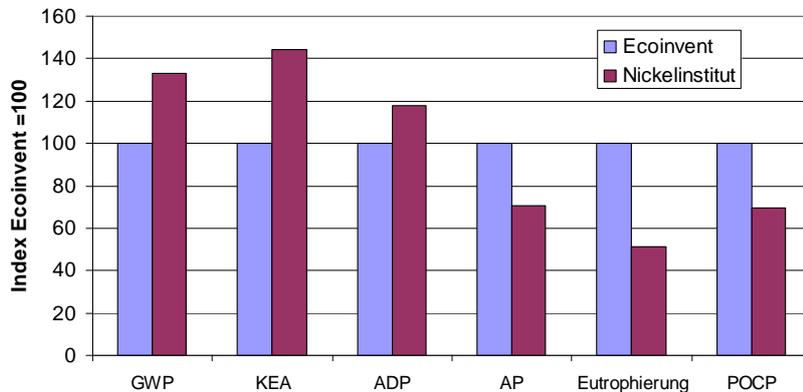


Abbildung 6.11 Differenz der Umweltindikatoren für Nickel aus den Ökobilanzdaten ecoinvent und Nickelinstitut. Die Indikatoren aus ecoinvent werden auf 100 indexiert.

Im Vergleich zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den beiden Datensätzen. Das Nickelinstitut weist einen höheren Energieeinsatz (KEA) und entsprechend auch höhere Treibhausgasemissionen (GWP) aus. Auch ist der ADP höher. Hier kann zum einen eine andere Erfassung/Methodik angewendet worden sein oder der Nickelverlust ist höher. Die letzte Begründung wäre mit dem höheren Energieverbrauch kongruent.

Die Indikatoren AP (SO₂) sowie Eutrophierung und POCP (NO_x) können durch nachgeschaltete Anlagen (Entschwefelung, Entstickung) deutlich reduziert werden. Da das Nickelinstitut mit seinen Daten nur die „westliche Welt“ abdeckt, ist zu vermuten, dass sich hier die erheblichen Bemühungen in Kanada zur Emissionsminderung widerspiegeln.

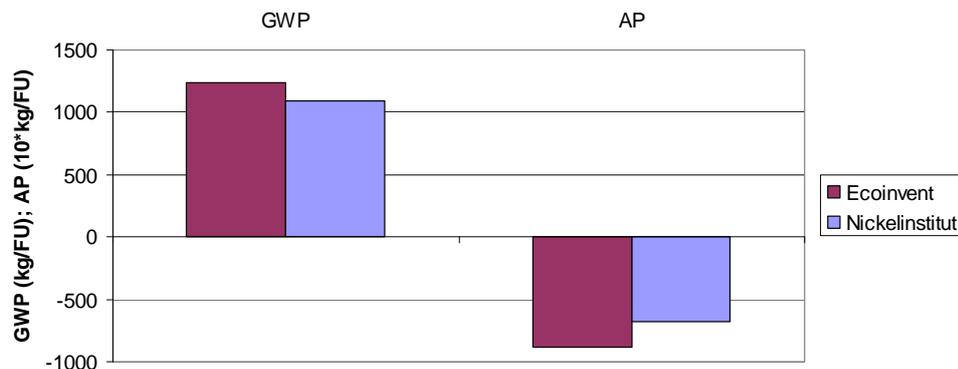


Abbildung 6.12 Auswirkungen der verschiedenen Datensätze für Nickel aus den Ökobilanzdaten ecoinvent und Nickelinstitut für das Treibhauspotenzial (GWP) und Versauerung (AP). GWP (kg/FU); AP (kg/FU * 10)

Ersetzt man den ecoinvent-Datensatz für Primärnickel durch den Datensatz des Nickelinstitutes, so verändern sich die Gesamtergebnisse. Der Primärnickel-Datensatz fließt als Gutschrift in das Gesamtergebnis (negativ) ein. Da die Treibhausgasemissionen (GWP) im Datensatz des Nickelinstitutes höher ausgewiesen werden, ist auch in diesem Fall die

Gutschrift höher, d. h. die Aufwendungen reduzieren sich („das Ergebnis wird besser“). Für die Versauerung führt der Datensatz des Nickelinstitutes zu einem gegenteiligen Effekt. Die Gutschrift ist geringer, also reduziert sich das Ergebnis.

Trotz der Auswahl eines Szenarios, in dem ein Metall einen dominierenden Einfluss auf ein Teilergebnis hat, bleibt die Gesamtaussage stabil. Eine Trendumkehr findet nicht statt. Obwohl hierzu keine grundsätzliche Untersuchung stattfand, bleibt zu vermuten, dass die Auswahl einer homogenen Datenbank zu mehr Richtungssicherheit führt. Unterstellt man, dass bei der Erfassung der Daten unterschiedliche Bearbeiter vermehrt zu differierenden Ergebnissen kommen, erhöht sich die relative Datenqualität bei der Auswahl eines homogenen Datensatzes.

6.2.2.3 Sensitivität Kobalt-Datensatz

Wie bereits in Abschnitt 4.2.2 angeführt, ist der verwendete Kobaltdatensatz in ecoinvent lediglich als Hilfsprozess gekennzeichnet, mit entsprechenden Abstrichen bei der Datenqualität und einer nur sehr kurzen Dokumentation. Der Datensatz für Primärkobalt in ecoinvent fußt auf dem entsprechenden Datensatz von Nickel, mit einigen spezifischen Modifizierungen (stöchiometrische Berücksichtigung des Reduktionsschrittes, 95 % Ausbeute, Energieeinsatz für typischen Großchemieprozess). 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. Eine Ausnahme hiervon stellen die gaseitigen HCl-Emissionen und die abwasserseitigen AOX-Emissionen im Refining dar.

Mit dem Ziel der Sensitivitätsrechnung hinsichtlich der Gutschriften für Primärkobalt konnte über Vermittlung von Mitgliedern der Umbrellagruppe LCA von PE International der Zugang zu einem speziellen Datensatz (für einige der untersuchten Wirkungskategorien innerhalb dieser Ökobilanz) für Primärkobalt geschaffen werden. Dieser Datensatz ist nicht in den Standard-Auslieferungsumfängen von PE International enthalten, da er initial für einen Industriekunden erstellt wurde. Mit dessen Erlaubnis wurde der Datensatz für diese Sensitivitätsrechnung freundlicherweise zusammen mit dem entsprechenden Datensatz für Primärnickel dem Öko-Institut zur Verfügung gestellt [PE 2005].

In die Primärdaten für Kobalt [PE 2005] sind Produktionsdaten aus Australien, Südafrika und Norwegen eingeflossen, die ca. 30 % der globalen Kobaltproduktion abdecken. Die Daten für Primärkobalt wurden aus den differenzierten technologischen Daten aus den entsprechenden Multi-Output-Prozessen (gemeinsame Produktion von Nickel und Kobalt sowie untergeordnet von Platingruppenmetallen und Kupfer) über eine Marktpreisallokation,

basierend auf den durchschnittlichen Weltmarktpreisen zwischen 1992 und 2004 (durchschnittliches Preisverhältnis⁹ Kobalt/Nickel ca. 4,3:1), generiert.

In der nachfolgenden Tabelle sind zur Übersicht die Daten aus ecoinvent sowie [PE 2005] für die wichtigen Wirkungskategorien GWP, AP sowie KEA für Primärkobalt und Primärnickel gegenübergestellt. Für Primärnickel ist zudem der Datensatz des Nickel-Instituts [Ni-Institut 2003] aufgeführt.

Tabelle 6.4 Vergleich des Treibhauspotenzials (GWP), Versauerungspotenzials (AP) und des Kumulierten Energie-Aufwandes (KEA n.e.) für Kobalt und Nickel aus den Datenquellen PE, ecoinvent und Nickelinstitut

Wirkungskategorie	Primärkobalt		Primärnickel		
	[PE 2005]	ecoinvent	[PE 2005]	ecoinvent	Ni-Institut + CML 2010
GWP (kg-CO ₂ -eq/kg)	90	8,8	19,1	11,2	14,9
AP (kg-SO ₂ -eq/kg)	2,0	0,08	0,45	1,7	1,2
KEA n.e. (MJ/kg)	931	135	204	156	225

Der Vergleich der Daten für die Wirkungskategorie GWP zeigt beim Primärnickel für den Datensatz aus [PE 2005] mit 19,1 kg-CO₂-eq/kg höhere Werte als bei ecoinvent mit 11,2 kg-CO₂-eq/kg. Der Datensatz des Nickel-Institutes liegt dabei mit 14,9 kg-CO₂-eq/kg zwischen diesen beiden Werten. Im Fall der Daten für Primärkobalt sind die Unterschiede der Datensätze erheblich größer. Hier weist ecoinvent lediglich 8,8 kg-CO₂-eq/kg auf, während [PE 2005] für Primärkobalt 90 kg-CO₂-eq/kg nennt. Neben der völlig unterschiedlichen Datenherkunft und -qualität (siehe oben) spielt hier die Marktpreisallokation bei [PE 2005] eine wichtige Rolle. Im Falle von ecoinvent beruhen die Daten auf Massenallokationen und bei Kobalt zusätzlich auf gesetzten Annahmen. Die Methode der Marktpreisallokation wirkt sich bei Kobalt, als Outputprodukt mit der deutlich geringeren Gesamttonnage, im Vergleich zu Nickel bei den spezifischen Daten für die Wirkungskategorien erheblich stärker aus [PE 2005]. Dies wird auch beim Vergleich der Daten für Primärnickel und Primärkobalt bei den anderen Wirkungskategorien deutlich.

In den nachfolgenden beiden Abbildungen sind die Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen für den Schritt Kobalt/Nickel-Raffination sowie das gesamte LiBRi-Recyclingverfahren für die Wirkungskategorien Treibhausgaspotenziale (GWP) sowie Versauerungspotenziale (AP) aufgeführt.

Die Ergebnisse zeigen beim GWP erwartungsgemäß eine erheblich höhere Kobaltgutschrift für die Rückgewinnung der Kobaltverbindung aus dem Recyclingprozess nach [PE 2005] und damit einen beträchtlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Die höhere Nickelgutschrift

⁹ Das durchschnittliche Preisverhältnis für Kobalt/Nickel im Jahr 2010 beträgt ca. 2.

nach [PE 2005] fällt insgesamt erheblich weniger stark ins Gewicht. Im Gesamtergebnis für GWP nach der Sensitivitätsanalyse mit beiden Datensätzen bleibt festzuhalten, dass das Gesamtergebnis für GWP von der Lastseite moderat in den Gutschriftenbereich verschoben wird, das heißt, die Wahl des externen Kobaltdatensatzes hat einen beträchtlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Dies gilt nicht für die Wirkungskategorie Versauerung (AP); hier wirken sich die Unterschiede zwischen den Primärmetalldatensätzen nur moderat in den Unterschieden des Gesamtergebnisses aus.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass aufgrund erheblicher Dynamiken bei der globalen Kobaltproduktion in den letzten Jahren, wie neue Minen und Produktionsstätten, technologische Veränderungen, starke Preisveränderungen usw., für die nahe und mittlere Zukunft aktualisierte Datensätze für Primärkobalt und auch andere Primärmetalle wie Nickel sehr wichtig für Ökobilanzen rund um Batterien für die Elektromobilität sind. Der Beitrag [Jessup et al. 2008] unterstreicht diese globalen Veränderungen in der Produktion dieser Primärmetalle und den Bedarf an robusten Sachbilanzdaten hierzu.

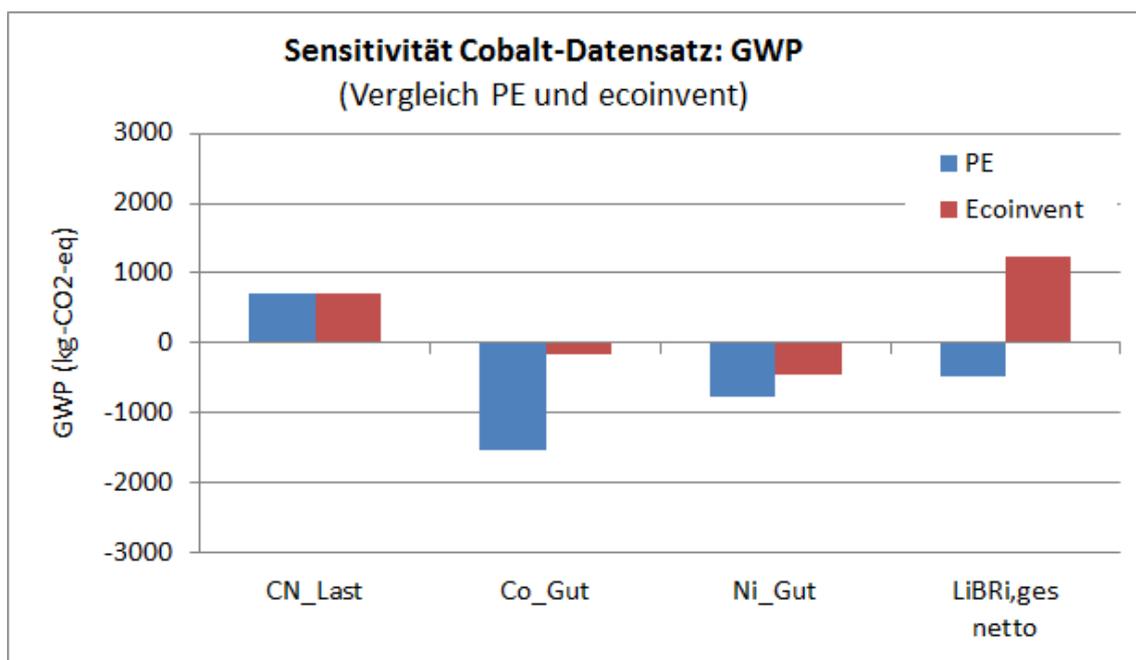


Abbildung 6.13 Vergleich ausgewählter Ergebnisse und des Gesamtergebnisses für das Treibhauspotenzial (GWP) des LiBRi-Verfahrens, nach ecoinvent und PE Datensatz für Kobalt und Nickel

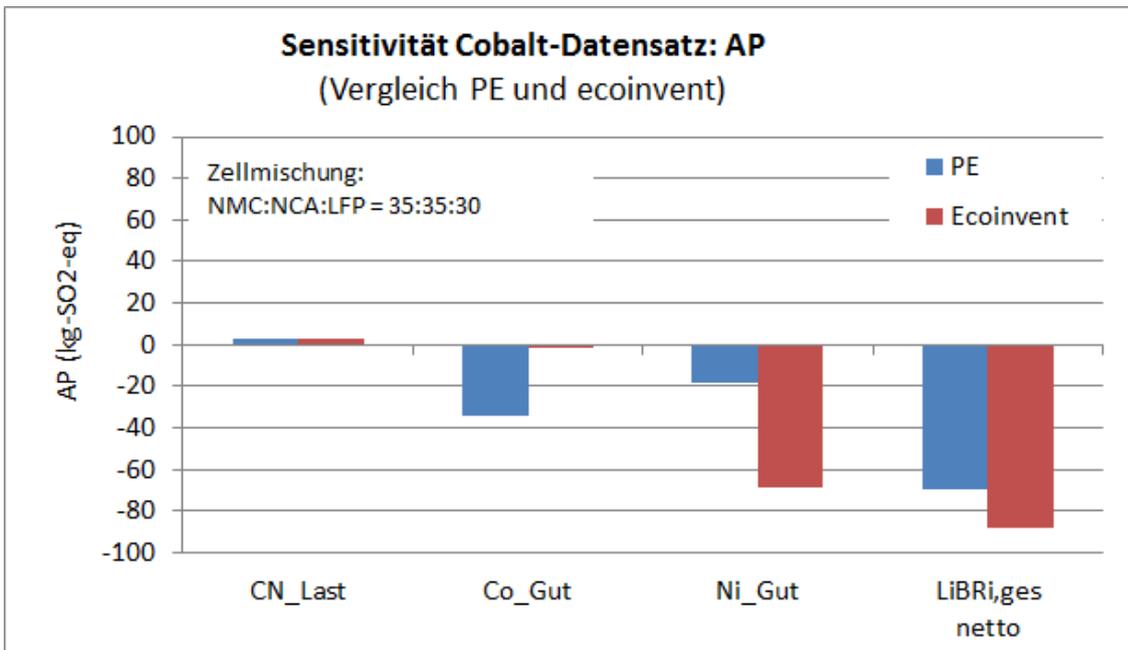


Abbildung 6.14 Vergleich ausgewählter Ergebnisse und des Gesamtergebnisses für das Versauerungspotenzial (AP) des LiBRi-Verfahrens, **nach ecoinvent und PE Datensatz für Kobalt und Nickel**

6.2.2.4 Sensitivität unterschiedlicher ADP-Bewertungsschemata

Das Bewertungsschema ADP_{elem} wurde von CML entwickelt und soll die Erschöpfung von mineralischen Ressourcen beschreiben. Das ADP_{elem} – wie in dieser Arbeit angewendet – ist die von CML vorgeschlagene Basisvariante, die die Ressourcen auf Basis des „ultimate reserve“-Datensatzes beschreibt. In diesem Datensatz werden die in der Erdkruste vorhandenen Mineralien als Maß für die Verfügbarkeit eingesetzt und im ADP_{elem} in Relation zu den Antimon-Daten als Bewertungsschema angewendet. CML regt dabei an, in einer Sensitivitätsanalyse auch andere Ressourcenbasen zu verwenden, um die Aussagekraft zu überprüfen. Wie von CML empfohlen, wird in dieser Sensitivitätsanalyse die „reserve base“ als Alternative eingesetzt. Die „reserve base“ umfasst dabei die mineralische Reserve, die technisch noch zugänglich ist.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Charakterisierungsfaktoren nach den beiden Ansätzen, jeweils relativ zu Antimon. Zur vereinfachten Darstellung wird dem ADP_{elem} die Datengrundlage angehängt (ur = ultimate reserve, rb = reserve base). Je größer ein Wert ist, desto geringer ist seine Reichweite und umgekehrt. Gold mit einem Charakterisierungsfaktor von 52 ist selten, während Aluminium mit einem Wert von $1,1E-9$ sehr weit verbreitet ist.

Tabelle 6.5 Charakterisierungsfaktoren für ADP auf Basis der „ultimate reserve“ und der „reserve base“

	ADP _{elem.,ur}	ADP _{elem.,rb}
	ultimate reserve	reserve base
Mineral/Element	(kg-SB-eq/kg Mineral)	(kg-SB-eq/kg Mineral)
Aluminium	1,1 E-9	2,5 E-5
Chrom	4,4 E-4	2 E-5
Kobalt	1,6 E-5	2,6 E-2
Kupfer	1,4 E-3	2,5 E-3
Gold	52	36
Eisen	5,2 E-8	1,7 E-6
Lithium	1,2 E-5	1,3 E-2
Mangan	2,5 E-6	2,4 E-5
Nickel	6,5 E-5	4,2 E-3
Silber	12	8,4

Die Funktionalität zwischen beiden Ansätzen lässt sich gut anhand von Lithium beobachten. Lithium ist, ähnlich anderen Metallen, in der Erdkruste relativ weit verbreitet. So ist sein Anteil an der Erdkruste nur wenig niedriger als der Anteil von Mangan, d. h. ein fünfmal höherer Wert in ADP_{elem.,ur}. Aufgrund seiner hohen Löslichkeit und Geologie bilden sich allerdings bzw. erhalten sich nur wenige Lithiumlagerstätten. Wie im ADP_{elem.,rb} zu beobachten ist, steigt daher der ADP_{elem.,rb} um den Faktor 1000 an, d. h. Lithium wird in dieser Betrachtung seltener in Relation zu Antimon-Äquivalenten. Andere Metalle, z. B. Chrom, weisen eine ausgeprägte Tendenz zur Lagerstättenbildung auf und ihr ADP_{elem.,rb} ist demzufolge kleiner als ihr ADP_{elem.,ur}.

Der Übergang zur „reserve base“ als Datengrundlage entspricht damit eher dem technischen Verständnis von der Ressourcenverfügbarkeit.

In der obigen Tabelle werden die wichtigsten in dieser Ökobilanz betroffenen Metalle aufgeführt. Für Lithium, Kobalt und Nickel verändern sich die Charakterisierungsfaktoren dramatisch. So steigt Kobalt (in Sb-eq) um das 1600-fache, Lithium um das 1080-fache und Nickel um das 65-fache. Andere wichtige Metalle hingegen verändern ihren Wert nur gering (Kupfer – Anstieg um 78 %) oder werden gar mit kleineren Faktoren bewertet (Chrom und Mangan). Die aus der Anwendung des ADP_{elem.,rb} resultierende Verschiebung in der

Bewertung gegenüber dem $ADP_{elem.,ub}$ wird in den folgenden Abbildungen dargestellt. Zu beachten sind hierbei die unterschiedlichen Skalen auf der Y-Achse.

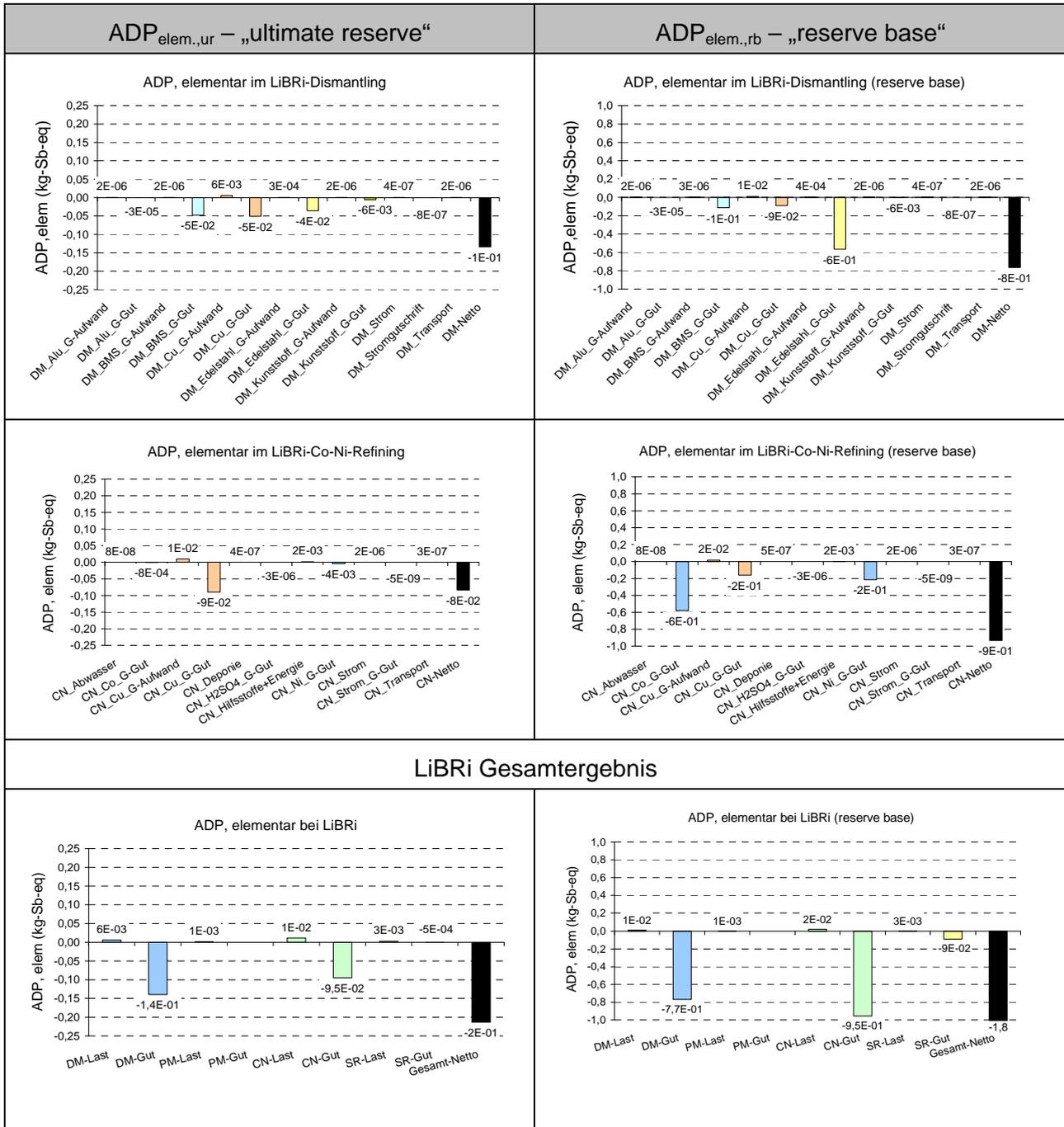


Abbildung 6.15 Gegenüberstellung der Ergebnisse für ADP_{elem} für die Charakterisierungsfaktoren ur = ultimate reserve und rb = reserve base.

Es lassen sich folgende wichtige Verschiebungen beobachten:

- Der Gesamtwert des ADP (Gutschrift) erhöht sich von $ADP_{elem.,ur} = -0,2$ auf $ADP_{elem.,rb} = -1,8$. Der ADP (Gutschrift) wird dadurch in seiner normierten Form höher, d. h. seine relative Bedeutung gegenüber dem GWP etc. nimmt zu.
- Der Lithium- $ADP_{elem.,rb}$ steigt zwar deutlich an, der Wert ist aber mit $-0,09$ für das Gesamtergebnis von geringer Bedeutung.
- Der Wert für das Dismantling steigt um das 5-fache und der Wert für das Co-Ni-Refining um das 10-fache.
- Alle drei Metalle – Kupfer, Kobalt und Nickel – werden im Kobalt-Nickel-Refining höher bewertet. Während im Co-Ni-Refining nach $ADP_{elem.,ur}$ der Hauptbeitrag zur Gutschrift aus dem Kupferrecycling resultiert, dominiert nach $ADP_{elem.,rb}$ das Kobaltrecycling.
- Im Dismantling-Schritt erhöhen sich die absoluten Werte für das BMS- und das Kupferrecycling. Einen überproportionalen Anstieg beobachtet man allerdings für das Edelstahlrecycling aufgrund des im Edelstahl enthaltenen Nickels.
- Für den Gesamtprozess zeigt sich eine deutliche Verschiebung. Während nach $ADP_{elem.,ur}$ das Kupferrecycling mit einem Anteil von ca. 60 % die Hauptursache der Gutschrift ist, sind nach $ADP_{elem.,rb}$ das Edelstahlrecycling mit einem Anteil von 30 % und das Kobaltrecycling ebenfalls mit einem 30 %-Anteil die Hauptquellen der Gutschrift. Nach $ADP_{elem.,rb}$ werden für das Kupferrecycling ein Anteil von ca. 15 %, für das Nickelrecycling ein Anteil von 12 % und für das Lithium ein Anteil von 5 % beobachtet (jeweils brutto).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich durch die Auswahl einer anderen Datengrundlage die Bedeutung des ADP insgesamt verstärkt hat. Die relative Bedeutung der einzelnen Recyclingschritte hat sich verschoben. Das Edelstahlrecycling und das Kobaltrecycling dominieren. Auch das Nickel- und Lithiumrecycling rücken in den Vordergrund. Das Kupferrecycling wird zwar auch nach dem $ADP_{elem.,rb}$ absolut höher bewertet, tritt allerdings relativ deutlich hinter dem Edelstahl- und Kobaltrecycling zurück.

6.2.2.5 Sensitivität ADP und KEA

Der ADP stellt allgemein eine Bewertung der Erschöpfung der Ressourcen dar. Er kann nicht nur, wie in dieser Ökobilanz nach Empfehlung der CML, für mineralische Ressourcen angewendet werden, sondern prinzipiell auch für fossile Brennstoffe. Damit ergibt sich die (eingeschränkte) Möglichkeit einer umfassenderen Analyse. Es ist zu beachten, dass der aufgeführte ADP_{gesamt} nicht mehr von CML fortgeschrieben wird. Damit können die folgenden Indikatoren verglichen werden:

1. KEA-n.e., nicht erneuerbarer Kumulierter Energie Aufwand (MJ): Der KEA n.e. summiert die eingesetzten bzw. gutgeschriebenen fossilen und nuklearen Energie.
2. ADP_{fossil} , Abiotic Depletion Potential der fossilen Brennstoffe. Der entsprechende ADP_{fossil} beinhaltet nur fossile Brennstoffe. Da von einer vollkommenen Substitutionsfähigkeit ausgegangen wird, wird die Endlichkeit der einzelnen Brennstoffe nicht einbezogen. In der Software wird der ADP aus der Masse der fossilen Brennstoffe berechnet. Da der Heizwert nicht identisch mit dem Heizwert des KEA ist, ergeben sich Abweichungen. Weiterhin fehlt die Einbeziehung der Nuklearenergie.
3. Der $ADP_{elem.,ur}$ ist in Kapitel 3 ausführlich beschrieben. In dieser Gegenüberstellung wird der ADP auf Basis der ultimate reserve genutzt.
4. ADP_{gesamt} setzt sich aus dem $ADP_{elem.,ur}$ und den fossilen Brennstoffe zusammen. In diesem ADP werden auch die Brennstoffe entsprechend ihrer Förderung und Reichweite charakterisiert. Der ADP_{gesamt} basiert auf älteren Charakterisierungsfaktoren. Dieses (veraltete) Bewertungsschema ADP_{gesamt} wird hier genutzt, um die Diskussion des mineralischen ADP um die Komponente der fossilen Brennstoffe zu erweitern.

In den nachfolgenden Abbildungen wird das Gesamtergebnis inklusive Breakdown nach Prozessabschnitten dargestellt.

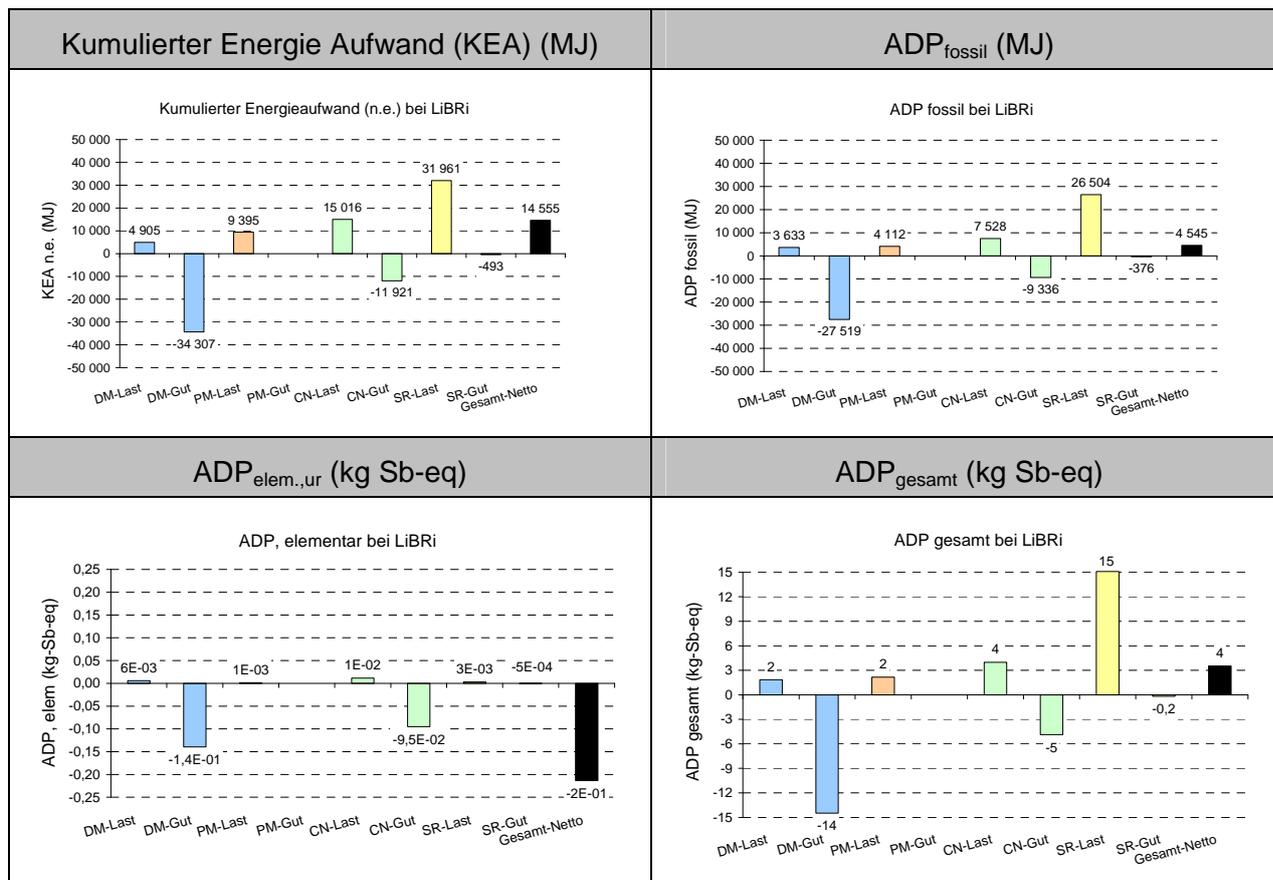


Abbildung 6.16 KEA, ADP_{fossil}, ADP_{elem.,ur} und ADP_{gesamt} für das Recycling von Lithiumbatterien (LiBRi)

Im Vergleich von KEA n.e. und ADP_{fossil} zeigt sich, dass sich zwar die absoluten Werte verändert haben, die Grundstruktur jedoch gleich geblieben ist. Die Unterschiede sind auf Umrechnungsungenauigkeiten sowie das Fehlen der Nuklearenergie im ADP_{fossil} zurückzuführen. Es ist daher wenig überraschend, dass dieser ADP_{fossil} ein leicht verzerrtes Spiegelbild des KEA abbildet.

Der Vergleich von ADP_{elem.,ur} mit dem ADP_{gesamt} zeigt keine Übereinstimmung. So sind zwar Gutschriften im ADP_{elem.,ur} für die Prozessabschnitte DM-Gut und CN-Gut im ADP_{gesamt} wiederfindbar, jedoch nicht ansatzweise in der entsprechenden absoluten Größenordnung. Aus der Gesamtgutschrift des ADP_{elem.,ur} ist eine Belastung im ADP_{gesamt} geworden. Der ADP_{gesamt} wird von der Energiebelastung des Prozessabschnitts SR (Schlackeaufbereitung) dominiert.

Ein Vergleich zwischen ADP_{fossil} und ADP_{gesamt} zeigt eine gute visuelle Übereinstimmung. Die absoluten Werte sind nicht vergleichbar, da die Maßeinheit von MJ auf kg SB-eq geändert wurde.

Insgesamt legt dieser Vergleich nahe, dass dem fossilen Brennstoffeinsatz eine höhere Bedeutung zukommt als dem Recycling der Metalle.

6.2.2.6 Sonderauswertung: Herkunft der Emissionen für saure Gase (AP)

Während einige Umweltindikatoren, z. B. das Treibhausgaspotenzial, globale Bedeutung haben und daher auch global bewertet werden, haben andere Umweltindikatoren zuerst lokale Bedeutung. Klassisches Beispiel hierfür ist der Wasserverbrauch. In einer niederschlagsarmen Gegend hat der Wasserverbrauch einen deutlich höheren Stellenwert. Entsprechend wäre er höher zu bewerten.

In dieser Ökobilanz weist das Versauerungspotenzial (AP) insgesamt mäßige Aufwendungen sowie eine hohe Gutschrift aus. Aus dem gezeigten Ergebnis wird allerdings nicht ersichtlich, wer die Aufwendungen zu tragen hat und wem die Gutschrift zugutekommt. Daher wird in dieser Sensitivitätsanalyse die Lokalität vertieft untersucht.

Um die Darstellung zu vereinfachen, wurden die Produktionsorte folgendermaßen klassifiziert:

- „global“: Die Herstellung von Gütern außerhalb Europas, z. B. die Primärproduktion von Kupfer, Nickel, Kobalt und Lithium.
- „lokal (Europa, v. a. DE, BE)“: Hierzu zählen Transporte, Herstellung von Hilfsstoffen, alle Recyclingaktivitäten (Aufarbeitung) sowie die Produktion von Edelstahl und Kunststoffen.
- „diverse“: Produktion von Gütern sowohl innerhalb als auch außerhalb Europas: Treibstoffe, Primäraluminium.

Die folgende Graphik zeigt das Ergebnis der Klassifizierung:

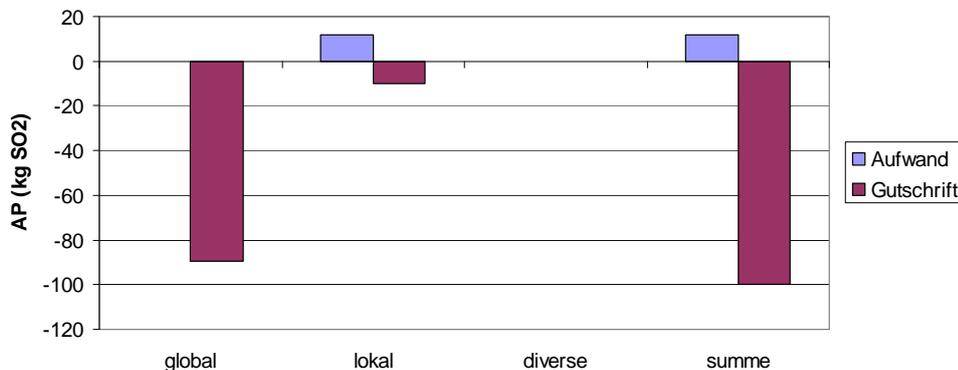


Abbildung 6.17 Differenzierung der Aufwendungen und Gutschriften nach Herkunft, global, lokal und diverse.

Die Gutschrift wird zu über 85 % außerhalb Europas realisiert. Aufwendungen finden dort nicht statt. Die Belastungen durch die Aufarbeitungen werden fast ausschließlich Europa (DE, BE) zugeordnet, da alle Aktivitäten zur Aufarbeitung der Sekundärmaterialien hier verortet sind. Dazu kommen die Emissionen aus dem Transport sowie zur Bereitstellung der

Hilfsstoffe. Die Rubrik „diverse“ weist maximale Gutschriften von 0,35 kg auf; sie sind in der Graphik daher nicht sichtbar.

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 großtechnische Prozesse, automatisierte Pilotanlagen (Industrie) bis zu manuellen Laborversuchen (frühes Forschungsstadium, Universität). Im Hinblick auf das Gesamtergebnis wird der Einfluss als gering eingeschätzt.

Im Forschungsverbund LiBRi ist der Materialfluss qualitativ gut verfolgbar. 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 Kobalt-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. Die Relevanz dieser Inkonsistenzen wird mit Hilfe einer Sensitivitätsrechnung für die Kobaltgutschrift ermittelt.

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

Für die Gesamtbewertung des Ergebnisses hat vor allem die Datenqualität der Primärherstellung von Kobalt einen sehr großen Einfluss auf das Ergebnis.

6.3 Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen

Die Gesamtauswertung der Ökobilanzergebnisse für das Mischungsszenario NMC:NCA:LFP = 35 %:35 %:30 % ergibt für die Wirkungskategorien Versauerungspotenzial (AP), Verbrauch an abiotischen Ressourcen ($ADP_{elem.}$, ohne Energieträger), Eutrophierung und Bildung von Photooxidantien z. T. deutliche Nettogutschriften. Nicht zuletzt die Ergebnisse bzgl. des Versauerungspotenzials und des Verbrauchs an abiotischen Ressourcen waren für ein Recyclingverfahren, das primär auf die Gewinnung von Sekundärmetallen bzw. deren

Verbindungen zielt, zu erwarten (Gutschriften bzgl. abiotischer Primärressourcen sowie Säurebildneremissionen aus der Erzaufbereitung).

Bezüglich der Wirkungskategorien Treibhausgasemissionen (GWP) und KEA n.e. ergeben sich insgesamt Nettolasten für den Recyclingprozess nach dem jetzigen Entwicklungsstand. Wesentliche Beiträge zu den Lasten ergeben sich vor allem aus den Modulen Pyrometallurgie sowie Lithiumcarbonatgewinnung aus der Schlackeaufbereitung. Ein Verzicht auf die Schlackeaufbereitung zur Lithiumcarbonatgewinnung bei gleichzeitiger Verwendung der Schlacke als Zementzuschlag ergäbe auch für GWP und KEA n.e. im Falle des LiBRi-Recyclingprozesses (unveränderte Beibehaltung der Module Zerlegung, Pyrometallurgie und Kobalt/Nickel-Raffination) aller Voraussicht nach eine Nettogutschrift.

Positive Beiträge, d. h. deutliche Nettogutschriften ergaben sich für alle Wirkungskategorien aus dem 1. Schritt „Entladung und Zerlegung“. Verantwortlich hierfür sind vor allem hohe Gutschriften für die Rückgewinnung von Wertstoffen wie z. B. 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 (vollständige Erfassung der entnommenen Komponenten für das Einbringen in Recyclingprozesse) der Batterien essentiell für ein positives Gesamtergebnis des gesamten Recyclingprozesses sind. Die Zellmaterialien sind zwar 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.

Die Normierungsergebnisse für die betrachteten Wirkungskategorien zeigen, dass $ADP_{elem.}$ und AP in ihrer spezifischen Relevanz ungefähr gleich, GWP und POCP etwas und EP deutlich geringer sind. Für die betrachtete Ökobilanz des LiBRi-Recyclingverfahrens wurden die Ergebnisse zu den Wirkungskategorien Treibhausgaspotenzial (GWP), Verbrauch abiotischer Ressourcen ($ADP_{elem.}$) sowie Säurebildner (AP) besonders intensiv ausgewertet, da sie bzgl. des betrachteten Recyclingsystems von besonderem Interesse sind.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen bzgl. alternativer (und leichter) Gehäusematerialien (Aluminium bzw. kohlefaserverstärkte Kunststoffe) unterstützen den Befund der Relevanz des 1. Schrittes Entladung und Zerlegung. Die Gutschriften für die Entnahme und das Recycling des Gehäusematerials fallen bei Aluminium moderat und bei kohlefaserverstärkten Kunststoffen deutlich geringer aus. Hier muss an dieser Stelle unbedingt 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 herkömmlichen (aber schwereren) Edelstahlgehäuse von Interesse. Aussagen hierzu können jedoch im Rahmen dieser Ökobilanz aufgrund der gesetzten Systemgrenzen nicht getroffen werden.

Aufgrund der hohen Bedeutung der Kobalt- und Nickelgutschrift für zurückgewonnene batteriefähige Kobalt- und Nickelverbindungen für die Ökobilanz im Falle des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien wurde eine Sensitivitätsrechnung bzgl. der externen Datensätze für Primärkobalt und -nickel durchgeführt. Dafür wurde der öffentlich zugängliche ecoinvent-Datensatz (in ecoinvent ist Primärkobalt als Hilfsprozess mit entsprechend eingeschränkter Qualität und Dokumentationsstiefe klassifiziert) durch einen speziellen Datensatz für Primärkobalt und -nickel ersetzt, der von PE International erstellt wurde [PE 2005]. Für die Wirkungskategorie GWP ergibt sich mit diesem Datensatz eine moderate Gesamtgutschrift (inkl. Lithiumcarbonatgewinnung aus der Schlackeaufbereitung) für den LiBRi-Recyclingprozess anstatt einer Gesamtlast. Dies ist in erster Linie auf erheblich höhere Gutschriften für Primärkobalt und untergeordnet auf höhere Gutschriften für Primärnickel zurückzuführen. Das Ergebnis dieser Sensitivitätsanalyse unterstreicht die hohe Relevanz externer Datensätze für das Gesamtergebnis. Für die wichtigen Batteriemetalle Nickel und vor allem Kobalt sind daher in naher Zukunft aktualisierte Datensätze für die Förderung und Produktion der Primärmetalle – vor dem Hintergrund starker Dynamiken in den globalen Produktionsstrukturen bei diesen Metallen (neue Minen, Refininganlagen, neue Aufbereitungstechnologien etc.) – von sehr hoher Bedeutung für die Ergebnisse von Ökobilanzen.

Die Ökobilanzergebnisse zum LiBRi-Recyclingverfahren müssen unter dem Vorbehalt bewertet werden, dass einerseits eine Reihe von Sachbilanzdaten auf Einzel- und Laborversuchen bzw. Prozesssimulationen beruhen. Andererseits sind bei einer großtechnischen Umsetzung durchaus noch nennenswerte Optimierungspotenziale möglich oder gar wahrscheinlich. Dies betrifft vor allem mögliche Nettoenergieeinsparungen in dem pyrometallurgischen Prozess und bei der hydrometallurgischen Behandlung der Schlacke.

Weiterhin muss darauf hingewiesen werden, dass der pyrometallurgische Prozess für die Aufnahme der Batteriezellen von Umicore in der Praxis mit einem gemischten Input aus Lithium-Ionen-Batterien und Nickelmetallhydrid-Batterien (diese können sowohl aus der Konsumerelektronik als auch aus dem Automobilsektor kommen) gefahren wird. Dies hat prozesstechnische Vorteile und sorgt auch heute bereits für eine bessere Kapazitätsauslastung der entsprechenden Anlage (Nickelmetallhydrid-Batterien sind z. B. in Hybridfahrzeugen schon länger und in größerer Stückzahl auf dem Markt). Da das Recycling von Nickelmetallhydrid-Batterien nicht Gegenstand des LiBRi-Projektes ist, wurden die Sachbilanzen etc. daher hier auf einen reinen Input von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien

(konkret nach der Szenarienmischung) bezogen. Schließlich ist hervorzuheben, dass die Ergebnisse dieser Ökobilanz für das Batterierecycling nach dem LiBRi-Verfahren keinesfalls mit den Ökobilanzergebnissen anderer Batterierecyclingverfahren verglichen werden können. Es wurde in diesem Sinne keine vergleichende Ökobilanz durchgeführt.

Der Wasserverbrauch durch das Recyclingsystem wurde nicht in die Sachbilanz einbezogen. Eine überschlägige Analyse hat ergeben, dass die wesentlichen Wasserverbräuche in externen Vorketten (z. B. Strombereitstellung, Metallherstellung) auftreten und nicht in den eigentlichen Kernprozessen des Recyclingprozesses. Daher wurde auf eine vertiefende Analyse verzichtet. Ebenfalls wurde auf die Bilanzierung des ODP (ozone depletion potential) verzichtet.

Die LCA-Arbeiten im Rahmen von LiBRi unterstreichen die Sinnhaftigkeit der LCA-Methodik bzgl. Recyclingverfahren im Forschungs- und Entwicklungsstadium: Sie hat einen Beitrag zur Transparenz und zum Verständnis der Prozesse und der mit ihnen möglicherweise verbundenen Umweltwirkungen geleistet. Die Sichtbarmachung allgemeiner Datenfragen (z. B. Kobalt) bei der Bilanzierung der Umweltwirkungen der im Rahmen der Elektromobilität benötigten Rohstoffe wurde erzielt. Hiervon sollten auch zukünftige Projekte profitieren können. Erneute LCA-Studien zur Validierung der Ergebnisse dieser Studie in einigen Jahren werden empfohlen, wenn das Recyclingverfahren nach LiBRi in allen wesentlichen Schritten in die großtechnische Umsetzung gelangt ist.

7 Referenzen

- ARE 2007 Aluminium Recycling in Europe; European Aluminium Association, Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters; Brüssel, 2007
- Berger et al. 2010 Berger, M.; Finkbeiner, M.: Water Footprinting: How to Address Water Use in Life Cycle Assessment? Sustainability, Vol. 2, 2010, 919-944
- CML 2001 Life cycle assessment. An operational guide to the ISO standard; Centre of Environmental Science (CML), Leiden University, 2001
- 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>
- EAA 2008 Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry, Life Cycle Inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe, EAA, 2008
- ecoinvent v2.01 Ökobilanz-Datenbank ecoinvent v2.01; <http://www.ecoinvent.org>; integriert in GaBi v4.4
- Ecotransit 2010 EcoTRANSIT, Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports Methodology and Data, 2nd Draft Report; IFEU Heidelberg, Öko-Institut, and IVE/RMCON; Berlin, Hannover, Heidelberg, 2010
- EC 2037/2000 Regulation on substances that deplete the ozone layer
- GaBi v4.4 Ökobilanz-Software und Datenbank GaBi v4.4, PE Europe GmbH;
<http://www.pe-europe.com>
- Guinée 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
- HTOC 2010 2010 Assessment Report of the Halons Technical Options Committee, ISBN: 9966-7319-9-7,
http://ozone.unep.org/Assessment_Panels/TEAP/Reports/HTOC/index.shtml
- IFEU 2002 Würdinger, E, et al.: Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen: Vergleichende Ökobilanz für Loose-fill-Packmittel aus Stärke bzw. Polystyrol, BlfA, IFEU, Flo-Pak, 2002
- 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 Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley et al, 2007: Technical Summary. In: 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
- Jessup et al. 2008 Jessup, A.; Mudd, G.M.: Environmental Sustainability Metrics for Nickel Sulphide Versus Nickel Laterite. 3rd International Conference on Sustainability Engineering & Science: Blueprints for Sustainable Infrastructure, Auckland, New Zealand, 9-12 Dec.2008
- Klöpffer 2009 Klöpffer, W.; Grahl, B.: Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf; Wiley-VCH, Weinheim, 2009
- Ni-Institut 2003 Nickel Institute 2003; Nickel Products LCI Report, revised version 2003: www.nickelinstitute.org
- PE 2005 PE 2005: GaBi 4 Master-Datenbank (erstellt, dokumentiert und geliefert für Industriekunden)
- 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
- Saechtling 1998 Oberbach, K.: Saechtling Kunststoff Taschenbuch, 27. Ausgabe, Carl Hanser Verlag München Wien, 1998
- Schmid 2006 Schmid, J. et al.: Gefährdungspotenzial durch Cyclopentan aus der Behandlung von VOC-Kühlgeräten. Im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg. 2006
- 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
- Umbrellagruppe 2011 Abstimmung der Umbrellagruppe LCA (Mitglieder LiBRi/LithoRec) 2011
- van Oers et al. 2002 van Oers, L.; de Koning, A.; Guinée, J.B.; Huppes, G.: Abiotic resource depletion in LCA – Improving the characterization factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook; Road and Hydraulic Engineering Institute, Netherlands, 2002
- VHK 2005 Van Holsteijn en Kemna BV: Methodology Study Eco-Design of Energy-using Products (MEEuP), commissioned by DG ENTR, Delft 2005. http://ec.europa.eu/energy/demand/legislation/doc/2005_11_28_finalreport1_en.pdf

Annex 1: Externes kritisches Gutachten

Kritische Prüfung der Studie

LCA DER RECYCLINGVERFAHREN DES VERBUNDPROJEKTES: ENTWICKLUNG EINES REALISIERBAREN RECYCLING-KONZEPTS FÜR DIE HOCHLEISTUNGSBATTERIEN ZUKÜNFTIGER ELEKTROFAHRZEUGE – LIBRI

Auftraggeber: Technische Universität Braunschweig
38106 Braunschweig, Deutschland

mit Förderung des

Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit,
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

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 25.10.2011 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 wurde parallel zur Erstellung der Ökobilanz durchgeführt.

Das Auftakttreffen mit dem Öko-Institut und der sogenannten „Umbrella-Gruppe“, die aus verschiedenen Projektpartnern der Forschungsverbände „LithoRec“ und „LiBRi“ besteht, fand am 10. November 2010 in Hanau bei der Firma Umicore statt. Neben ersten Festlegungen zu Ziel und Untersuchungsrahmen wurden auch der Umfang und der Prozess der Kritischen Prüfung festgelegt. Das zweite Treffen mit der „Umbrella-Gruppe“ wurde am 08. Februar 2011 beim Öko-Institut in Darmstadt durchgeführt. Wesentlicher Inhalt des Treffens war die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens.

Ein drittes, bilaterales Treffen wurde am 04. Juli 2011 bei der TU Berlin durchgeführt. In diesem Treffen wurden vorläufige Ergebnisse präsentiert und die Auswahl von Daten und methodischen Festlegungen der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung besprochen. Neben diesen physischen Treffen wurde am 21. September 2011 noch eine Telefonkonferenz abgehalten, bei der es im Schwerpunkt um den Umgang mit den sensitiven Datensätzen zur Kobaltherstellung ging. In all diesen Besprechungen hat der externe Sachverständige 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 23. September 2011. Der Sachverständige hat den Bericht umfassend analysiert und auf Normkonformität geprüft. Die Prüfung ergab insgesamt 31 Hinweise genereller, technischer und redaktioneller Art, die dem Auftraggeber am 29. September 2011 übermittelt wurden.

Alle kritischen Hinweise und die überwiegende Mehrzahl der Empfehlungen des Prüfers wurden in konstruktiver und umfassender Weise berücksichtigt.

Die finale Version des Abschlussberichtes wurde dem Prüfer am 25. Oktober 2011 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 Prüfungsverfahrens.

Bewertung

Die Ökobilanz dient zur projektbegleitenden Bewertung des sich in Entwicklung befindlichen Recyclingverfahrens des LiBRi-Projektes. Den beteiligten Verbundpartnern sollen damit zeitnah die ökologischen Vorteile und Schwachstellen aufgezeigt werden.

Die funktionelle Einheit und der Referenzfluss für die Ökobilanzen des LiBRi-Verfahrens ist das Recycling von 1000 kg Batterien einer angenommenen Mischung verschiedener Batterietypen (Nickel/ Mangan/Kobalt (NMC) = 35%, Nickel/Kobalt/Aluminium (NCA) = 35% und Lithiumeisenphosphat (LFP) = 30%). 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.

Einzelne Datensätze, wie z.B. die Kobalt- und Nickelherstellung für die Gutschrift zurückgewonnener Wertstoffe, haben einen starken Ergebniseinfluss, der durch Sensitivitätsanalysen eingeschätzt wurde. Es wird transparent darauf hingewiesen, dass die Ökobilanzergebnisse zum LithoRec-Recyclingverfahren 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 und 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
28. Oktober 2011

Annex 2: Verwendete generische Datensätze

Tabelle A 2-1: Für die LiBRi-Ökobilanz verwendete generische Datensätze

Zweck	Datensatz	Quelle	Kommentar
Wertstoffrecycling	RER: Aluminium Recycling inkl. Schrottaufbereitung (2005) EAA	GaBi (EAA, 2008)	
	RER: L_Kupfer, sekundär, ab Raffinerie	ecoinvent v2.01	
	RER: L_Elektrostahl, un- und niedriglegiert, ab Werk	ecoinvent v2.01	
	RER: G_Aluminium Massel Mix (2005) EAA	GaBi (EAA, 2008), invertiert	
	RER: G_Blasstahl, Chromstahl 18/8, ab Werk	ecoinvent v2.01, invertiert	
	RER: G_Kupfer, ab Regionallager	ecoinvent v2.01, invertiert	
	RER: G_Polyamid 6 Granulat (PA 6) ELCD/PlasticsEurope	GaBi (PlasticsEurope, 2005), invertiert	
Leiterplatten-recycling	GLO: L_Entsorgung, Leiterplatten-Aufbereitung (modifiziert nach Analyse von Umicore/Actia)	ecoinvent v2.01	
	SE: L_Gold, sekundär, ab Raffinierung	ecoinvent v2.01	
	SE: L_Kupfer, sekundär, aus Elektroschrott, ab Raffinierung	ecoinvent v2.01	
	SE: L_Nickel, sekundär, aus Elektroschrott, ab Raffinierung	ecoinvent v2.01	
	SE: L_Silber sekundär, ab Raffinierung	ecoinvent v2.01	
	GLO: G_Gold, aus Primärproduktion, ab Raffinerie	ecoinvent v2.01, invertiert	
	GLO: G_Kupfer, primär, ab Raffinerie	ecoinvent v2.01, invertiert	
	GLO: G_Nickel, 99.5 %, ab Werk	ecoinvent v2.01, invertiert	
	RER: G_Silber, ab Regionallager	ecoinvent v2.01, invertiert	

Zweck	Datensatz	Quelle	Kommentar	
Gutschriften für batteriefähige Komponenten	GLO: G_Cobalt, ab Werk	ecoinvent v2.01, invertiert		
	GLO: G_Lithiumcarbonat, ab Werk	ecoinvent v2.01, invertiert		
	GLO: G_Lithiumhydroxid, ab Werk	ecoinvent v2.01, invertiert		
	GLO: G_Nickel, 99.5 %, ab Werk	ecoinvent v2.01, invertiert		
	BE: G_Schwefelsäure (96 %) PE	GaBi v4.4, invertiert		
Energie	DE: Strom Mix ELCD/PE-GaBi	GaBi v4.4	1kV - 60kV	
	BE: Erdgas Mix PE	GaBi v4.4		
	BE: Prozessdampf aus Erdgas ELCD/PE-GaBi	GaBi v4.4	90 % Effizienz	
	GLO: Dampfumwandlung (nd) überhitzt PE	GaBi v4.4		
	EU-27: Druckluft ELCD/PE-GaBi	GaBi v4.4	7 Bar, hoher Wirkungsgrad	
	DE: G-DE_Strom Mix ELCD/PE-GaBi	GaBi v4.4, invertiert	1kV - 60kV, Verbrauchsmix, beim Verbraucher	
Hilfsstoffe	BE: Natriumhydroxid Mix PE	GaBi v4.4		
	BE: Sauerstoff PE, flüssig	GaBi v4.4		
	BE: Stickstoff PE, flüssig	GaBi v4.4		
	BE: Schwefelsäure (96 %) PE	GaBi v4.4		
	BE: Wasserstoffperoxid (50 %) PE	GaBi v4.4		
	DE: Kalk (CaO; Feinkalk) PE	GaBi v4.4		
	DE: Kalkhydrat (Ca(OH) ₂) PE	GaBi v4.4		
	DE: Kalkstein Mehl (CaCO ₃ ; getrocknet) PE	GaBi v4.4		
	DE: Salzsäure (32 %) PE	GaBi v4.4		
	DE: Soda (Na ₂ CO ₃) PE	GaBi v4.4		
	NL: Propylenglykol PE	GaBi v4.4	über PO-Hydrierung	
	DE: Propylenglykol PE	GaBi v4.4	über PO-Hydrierung	
		RER: Graphit, ab Werk	ecoinvent v2.01	

Zweck	Datensatz	Quelle	Kommentar
	RER: Sand 0/2 ELCD/PE-GaBi, ungetrocknet	GaBi v4.4	nass und trocken Steinbruch
	RER: Stahl ECCS worldsteel	GaBi v4.4 (worldsteel, Ref.Jahr 2007)	Hochofenroute, Produktionsmix, ab Werk
	RER: entionisiertes Wasser ELCD/PE-GaBi	GaBi v4.4	Umkehrosiose
	RER: Prozesswasser ELCD/PE-GaBi	GaBi v4.4	aus Oberflächenwasser/ Grundwasser
Entsorgung	EU-27: Abwasserbehandlung (anorganisch und organisch leicht belastet) ELCD/PE-GaBi	GaBi v4.4	industrielles Abwasser nach Richtlinie 9172717EEC, bezüglich städtischer Abwasserbehandlung
	EU-27: Deponie von Eisenmetallen ELCD/PE-GaBi <t-agg>	GaBi v4.4	Deponie inklusive Sicker- wasserbehandlung, ohne Sammlung, Transport und Vorbehandlung
	RER: Hausmüll ELCD/PE-GaBi <t-agg> [Verbrennung]	GaBi v4.4	ohne Energierückgewinnung
	DE: Polypropylen (PP) PE <t-agg> [Verbrennung]	GaBi v4.4	ohne Energierückgewinnung
Transport	GLO: LKW ELCD/PE-GaBi	GaBi v4.4	> 34 - 40 t zGG / 27t Nutzlast / EURO 3
	GLO: LKW PE	GaBi v4.4	14 - 20 t zGG / 11,4t Nutzlast / EURO 3
	GLO: LKW PE	GaBi v4.4	12-14 t zGG / 9,3t Nutzlast / EURO 3
	DE: Diesel PE	GaBi v4.4	50 ppm Schwefel, Verbrauchsmix, ab Raffinerie

Annex 3: Detaillierte Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für das LiBRi-Verfahren

Legende

DM: Dismantling, Batterie- und Modulzerlegung

PM: Pyrometallurgie

CN: Kobalt-Nickel-Raffination

SR: Schlackeaufbereitung

Tabelle A 3-1: LCIA-Ergebnisse der Basisbilanz zum LiBRi-Prozess

Ergebnisse Basisbilanz - LiBRi -	GWP	ADP _{elem.}	AP	EP	POCP	KEA n.e.
	(kg-CO ₂ - eq/ t-Batterien)	(kg-Sb-eq/ t-Batterien)	(kg-SO ₂ - eq/ t-Batterien)	(kg-PO ₄ - eq/ t-Batterien)	(kg-Eth.- eq/ t-Batterien)	(MJ/ t-Batterien)
DM_Alu_G-Aufwand	3,8E+00	1,6E-06	8,4E-03	6,2E-04	6,2E-04	5,4E+01
DM_Alu_G-Gut	-7,3E+01	-3,1E-05	-3,5E-01	-1,5E-02	-2,0E-02	-9,6E+02
DM_BMS_G-Aufwand	1,2E+00	1,7E-06	4,4E-03	1,0E-03	6,3E-04	1,5E+01
DM_BMS_G-Gut	-1,2E+01	-4,8E-02	-9,5E-01	-2,8E-02	-4,8E-02	-1,8E+02
DM_Cu_G-Aufwand	4,7E+01	5,7E-03	5,7E-01	3,5E-02	3,5E-02	7,9E+02
DM_Cu_G-Gut	-7,5E+01	-5,1E-02	-6,2E+00	-2,2E-01	-3,2E-01	-1,2E+03
DM_Edelstahl_G-Aufwand	1,0E+02	2,5E-04	4,9E-01	8,6E-02	5,9E-02	2,2E+03
DM_Edelstahl_G-Gut	-1,2E+03	-3,6E-02	-6,6E+00	-9,8E-01	-6,3E-01	-2,1E+04
DM_Kunststoff_G-Aufwand	5,5E+01	2,1E-06	9,4E-02	7,7E-03	6,1E-03	8,6E+02
DM_Kunststoff_G-Gut	-8,0E+02	-5,7E-03	-2,6E+00	-5,9E-01	-2,4E-01	-1,0E+04
DM_Strom	9,9E+00	3,9E-07	1,7E-02	1,4E-03	1,1E-03	1,6E+02
DM_Stromgutschrift	-1,9E+01	-7,2E-07	-3,2E-02	-2,6E-03	-2,1E-03	-2,9E+02
DM_Transport	5,8E+01	2,1E-06	2,8E-01	6,6E-02	3,0E-02	8,5E+02
DM_Summe, Gut	-2,2E+03	-1,4E-01	-1,7E+01	-1,8E+00	-1,3E+00	-3,4E+04
DM_Summe, Last	2,8E+02	5,9E-03	1,5E+00	2,0E-01	1,3E-01	4,9E+03
PM_Deponie	3,0E-01	2,4E-08	1,0E-03	8,4E-03	1,5E-04	3,3E+00
PM_direkte-CO2-em	8,9E+02					
PM_Hilfsstoffe+Energie	2,9E+02	1,1E-03	1,1E+00	1,1E-01	7,9E-02	7,4E+03
PM_Strom	5,0E+01	2,1E-06	1,4E-01	1,3E-02	9,3E-03	1,6E+03
PM_Transport	3,3E+01	1,2E-06	1,5E-01	3,5E-02	1,5E-02	4,8E+02
PM_Summe, Gut	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
PM_Summe, Last	1,3E+03	1,1E-03	1,4E+00	1,6E-01	1,0E-01	9,4E+03
CN_Abwasser	3,6E-01	8,0E-08	7,7E-04	2,5E-04	4,5E-05	1,1E+00
CN_Co_G-Gut	-1,5E+02	-8,5E-04	-1,4E+00	-3,2E-01	-1,6E-01	-2,3E+03
CN_Cu_G-Aufwand	8,4E+01	1,0E-02	1,0E+00	6,2E-02	6,2E-02	1,4E+03
CN_Cu_G-Gut	-1,3E+02	-9,0E-02	-1,1E+01	-3,8E-01	-5,7E-01	-2,1E+03
CN_Deponie	5,7E+00	4,4E-07	1,9E-02	1,6E-01	2,7E-03	6,1E+01
CN_H2SO4_G-Gut	-2,2E+01	-2,7E-06	-6,3E-01	-6,4E-03	-3,7E-02	-1,1E+03
CN_Hilfsstoffe+Energie	5,5E+02	1,6E-03	1,7E+00	1,4E-01	1,3E-01	1,2E+04

Ergebnisse Basisbilanz - LiBRi -	GWP	ADP _{elem.}	AP	EP	POCP	KEA n.e.
	(kg-CO ₂ - eq/ t-Batterien)	(kg-Sb-eq/ t-Batterien)	(kg-SO ₂ - eq/ t-Batterien)	(kg-PO ₄ - eq/ t-Batterien)	(kg-Eth.- eq/ t-Batterien)	(MJ/ t-Batterien)
CN_Ni_G-Gut	-4,5E+02	-4,2E-03	-6,9E+01	-7,3E-01	-3,0E+00	-6,3E+03
CN_Strom	5,6E+01	2,4E-06	1,5E-01	1,4E-02	1,0E-02	1,7E+03
CN_Strom_G-Gut	-1,2E-01	-5,2E-09	-3,4E-04	-3,1E-05	-2,3E-05	-3,8E+00
CN_Transport	8,1E+00	2,9E-07	3,8E-02	8,7E-03	4,0E-03	1,2E+02
CN_Summe, Gut	-7,6E+02	-9,5E-02	-8,2E+01	-1,4E+00	-3,7E+00	-1,2E+04
CN_Summe, Last	7,0E+02	1,2E-02	2,9E+00	3,8E-01	2,0E-01	1,5E+04
SR_Abwasser	2,7E+01	6,0E-06	5,8E-02	1,9E-02	3,4E-03	8,0E+01
SR_Deponie	1,5E+01	1,2E-06	5,0E-02	4,1E-01	7,1E-03	1,6E+02
SR_Hilfsstoffe+Energie	1,9E+03	3,0E-03	5,3E+00	2,9E-01	4,0E-01	3,2E+04
SR_Li_G-Gut	-2,8E+01	-5,1E-04	-4,2E-01	-2,3E-02	-2,3E-02	-4,9E+02
SR_Strom	1,7E+00	7,4E-08	4,8E-03	4,4E-04	3,2E-04	5,4E+01
SR_Transport	2,1E+01	7,5E-07	1,0E-01	2,3E-02	1,0E-02	3,1E+02
SR_Summe, Gut	-2,8E+01	-5,1E-04	-4,2E-01	-2,3E-02	-2,3E-02	-4,9E+02
SR_Summe, Last	2,0E+03	3,0E-03	5,5E+00	3,3E-01	4,1E-01	3,2E+04
LiBRi-Gesamt-Netto	1,2E+03	-2,1E-01	-8,8E+01	-2,2E+00	-4,2E+00	1,5E+04

Annex 4 (vertraulich): Zusammenstellung der Rohdaten