

**Verbundprojekt:
Recycling von Elektromotoren – MORE**

**Teilprojekt:
Ökobilanz der Recyclingverfahren**

Projekt gefördert im Rahmen des Programms
„Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität
(STROM)“ des BMBF

Berlin, Darmstadt,
17.10.2014

Autorinnen und Autoren

Frank Walachowicz – Siemens AG
Andrew March – Siemens AG
Sebastian Fiedler – Siemens AG

Matthias Buchert – Öko-Institut e. V.
Jürgen Sutter – Öko-Institut e. V.
Cornelia Merz – Öko-Institut e. V.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	8
1. Zusammenfassung	9
2. Hintergrund der Studie und Aufbau des Berichts	13
3. Ziele und Untersuchungsrahmen	14
3.1. Ziele und Anwendungen der Studie	14
3.2. Festlegung des Untersuchungsrahmens	15
3.2.1. Funktion und funktionelle Einheit	15
3.2.2. Festlegung der Systemgrenzen	17
3.2.3. Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität	22
3.2.4. Allokation	24
3.2.5. End-of-Life Allokation	25
3.2.6. Berücksichtigte Wirkungskategorien	25
3.2.7. Methoden der Auswertung	29
3.2.8. Konformität und kritische Prüfung	29
3.2.9. Einschränkungen, Verwendung und Zielgruppen	30
3.2.10. Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts	30
4. Sachbilanz	30
4.1. Prozessbeschreibung Primärherstellung NdFeB-Magnete	30
4.2. Prozessbeschreibung Reuse (Route 1)	31
4.2.1. Motordemontage	31
4.2.2. Entmagnetisierung	31
4.2.3. Magnetreinigung	32
4.2.4. Magnetpolierung	32
4.3. Prozessbeschreibung Route 2 – Werkstoffliches Recycling	32
4.4. Prozessbeschreibung Route 3 - Rohstoffliches Recycling	32
4.4.1. Vorbehandlung: Mahlen, Oxidieren, Lösen	33
4.4.2. Eisenfällung	34
4.4.3. Kobaltfällung	34
4.4.4. Verfahren 1: Oxalatfällung	34

4.4.5.	Verfahren 2: Fraktionierte Fällung	34
4.4.6.	Verfahren 3: Solventextraktion	35
4.5.	Datengrundlage	36
4.5.1.	Spezifische Daten Primärherstellung NdFeB-Magnete	36
4.5.2.	Spezifische Daten Reuse	36
4.5.2.1.	Spezifische Daten Magnettrennung von Rotor	37
4.5.2.2.	Spezifische Daten Infrarotstrahler	40
4.5.2.3.	Spezifische Daten Magnetreinigung und Polierung	41
4.5.3.	Spezifische Daten werkstoffliches Recycling	43
4.5.4.	Spezifische Daten rohstoffliches Recycling	43
4.5.5.	Generische Datensätze	44
4.5.6.	Normierung	45
4.5.7.	Modellierung der Gutschriften	46
4.6.	Einschätzung der Datenqualität	47
5.	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	47
5.1.	Route 1 - Reuse	48
5.1.1.	Treibhauspotenzial (GWP)	48
5.1.2.	Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP elem. u.r.)	48
5.1.3.	Versauerungspotenzial (AP)	49
5.1.4.	Eutrophierungspotenzial (EP)	50
5.1.5.	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)	50
5.1.6.	Kumulierter Energieaufwand (CED total)	51
5.1.7.	Zusammenfassende Darstellung	51
5.2.	Route 2 – Werkstoffliches Recycling	54
5.2.1.	Treibhauspotenzial (GWP)	55
5.2.2.	Versauerungspotenzial (AP)	56
5.2.3.	Eutrophierungspotenzial (EP)	57
5.2.4.	Photochemisches Ozonbildungspotenzial (POCP)	58
5.2.5.	Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP, elem)	58
5.2.6.	Kumulierter Energieaufwand, KEA, n.e. (CED, total)	61
5.2.7.	Normierte Ergebnisse	61
5.3.	Route 3 – Rohstoffliches Recycling	62
5.3.1.	Treibhauspotenzial (GWP)	63

5.3.2.	Versauerungspotenzial (AP)	68
5.3.3.	Eutrophierungspotenzial (EP)	72
5.3.4.	Photochemisches Ozonbildungspotenzial (POCP)	76
5.3.5.	Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP, elem)	80
5.3.6.	Primärenergieverbrauch, gesamt (CED, total)	88
5.3.7.	Normierte Darstellung	92
6.	Auswertung	94
6.1.	Identifizierung der signifikanten Parameter	95
6.2.	Beurteilung	95
6.2.1.	Vollständigkeitsprüfung	95
6.2.2.	Sensitivitätsprüfung	96
6.2.2.1.	Sensitivität: geringerer Dysprosiumgehalt	96
6.2.2.2.	Sensitivität: anderer Datensatz für Extraktionsmittel	98
6.2.3.	Konsistenzprüfungen	99
6.3.	Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen	100
7.	Exkurs: Motorherstellung und Recycling	103
7.1.	Prozessbeschreibung Motordemontage	104
7.2.	Datengrundlage Motordemontage	105
7.3.	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	106
7.3.1.	Treibhauspotenzial (GWP)	106
7.3.2.	Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP, elem. ultimate reserve)	107
7.3.3.	Versauerungspotenzial (AP) Motorherstellung	108
7.3.4.	Eutrophierungspotenzial (EP)	109
7.3.5.	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)	109
7.3.6.	Kumulierter Energieaufwand (CED total)	110
8.	Literatur	111
	Annex 1: Externes kritisches Gutachten	114
	Annex 2: Verwendete generische Datensätze	117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Demontage und Reinigung von aufgeklebten und vergrabenen Magneten	16
Abbildung 3-2:	Systemgrenzen Route 1	18
Abbildung 3-3:	Systemgrenzen Route 2	19
Abbildung 3-4:	Systemgrenzen Route 3, Verfahren 1	20
Abbildung 3-5:	Systemgrenzen Route 3, Verfahren 3	21
Abbildung 3-6:	Systemgrenzen Primärproduktion NdFeB-Magnete	22
Abbildung 4-1:	Verfahren des rohstofflichen Recyclings	33
Abbildung 4-2:	Prozessschritte der Solventextraktion	35
Abbildung 4-3:	Ökobilanzprozesskette zur Magnetabscherung	38
Abbildung 4-4:	Das Rotorblatt wird auf der Anlage montiert, und die Zähne pressen die Magneten aus; die Magnete fallen schließlich nach unten.	39
Abbildung 4-5:	Ökobilanzprozesskette zur Magnetauspressung	40
Abbildung 4-6:	Anordnung der Auspressanlage	41
Abbildung 4-7:	Ökobilanzprozesskette zu Infrarotstrahler und Förderband	41
Abbildung 4-8:	Ökobilanzprozesskette für Reinigung und Reinigungsabfälle	42
Abbildung 4-9:	Ökobilanzprozesskette für Polierung der Magnete und Polierungsabfälle	42
Abbildung 5-1:	GWP Prozessaufteilung zur Magnetwiederverwendung	48
Abbildung 5-2:	AP Prozessaufteilung zur Magnetwiederverwendung	49
Abbildung 5-3:	EP Prozessaufteilung zur Magnetwiederverwendung	50
Abbildung 5-4:	POCP Prozessaufteilung zur Magnetwiederverwendung	50
Abbildung 5-5:	CED Prozessaufteilung zur Magnetwiederverwendung	51
Abbildung 5-6:	Überblick Gesamte Prozessaufteilung zur Magnetwiederverwendung	52
Abbildung 5-7:	Unterschiede zwischen Abscher- und Auspressprozessen	53
Abbildung 5-8:	Aufteilung des Reinigungsprozesses	53
Abbildung 5-9:	Werkstoffliches Recycling: Primärproduktion vs. Sekundärproduktion (GWP)	55
Abbildung 5-10:	Werkstoffliches Recycling: Primärproduktion vs. Sekundärproduktion (AP)	56
Abbildung 5-11:	Werkstoffliches Recycling: Primärproduktion vs. Sekundärproduktion (EP)	57
Abbildung 5-12:	Werkstoffliches Recycling: Primärproduktion vs. Sekundärproduktion (POCP)	58

Abbildung 5-13:	Werkstoffliches Recycling: Primärproduktion vs. Sekundärproduktion (ADP, elem. reserve base)	59
Abbildung 5-14:	Werkstoffliches Recycling: Primärproduktion vs. Sekundärproduktion (ADP, elem. ultimate reserve)	60
Abbildung 5-15:	Werkstoffliches Recycling: Primärproduktion vs. Sekundärproduktion (CED, total)	61
Abbildung 5-16:	Werkstoffliches Recycling: Primärproduktion vs. Sekundärproduktion (CED, total)	62
Abbildung 5-17:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (GWP), Allokation nach Masse	63
Abbildung 5-18:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (GWP), ökonomische Allokation	64
Abbildung 5-19:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (GWP), Allokation nach Masse	65
Abbildung 5-20:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (GWP), ökonomische Allokation	66
Abbildung 5-21:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (GWP), Beiträge der Hilfsstoffe	67
Abbildung 5-22:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (GWP), Beiträge der Hilfsstoffe	68
Abbildung 5-23:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (AP), Allokation nach Masse	69
Abbildung 5-24:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (AP), ökonomische Allokation	70
Abbildung 5-25:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (AP), Allokation nach Masse	71
Abbildung 5-26:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (AP), ökonomische Allokation	72
Abbildung 5-27:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (EP), Allokation nach Masse	73
Abbildung 5-28:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (EP), ökonomische Allokation	74
Abbildung 5-29:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (EP), Allokation nach Masse	75
Abbildung 5-30:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (EP), ökonomische Allokation	76
Abbildung 5-31:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (POCP), Allokation nach Masse	77
Abbildung 5-32:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (POCP), ökonomische Allokation	78

Abbildung 5-33:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (POCP), Allokation nach Masse	79
Abbildung 5-34:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (POCP), ökonomische Allokation	80
Abbildung 5-35:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (ADP, elem. ultimate reserve), Allokation nach Masse	81
Abbildung 5-36:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (ADP, elem. ultimate reserve), ökonomische Allokation	82
Abbildung 5-37:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (ADP, elem. reserve base), Allokation nach Masse	83
Abbildung 5-38:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (ADP, elem. reserve base), ökonomische Allokation	84
Abbildung 5-39:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (ADP, elem. reserve base), Allokation nach Masse	85
Abbildung 5-40:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (ADP, elem. reserve base), ökonomische Allokation	86
Abbildung 5-41:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (ADP, elem. ultimate reserve), Allokation nach Masse	87
Abbildung 5-42:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (ADP, elem. ultimate reserve), ökonomische Allokation	88
Abbildung 5-43:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (CED, total), Allokation nach Masse	89
Abbildung 5-44:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (CED, total), ökonomische Allokation	90
Abbildung 5-45:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (CED, total), Allokation nach Masse	91
Abbildung 5-46:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (CED, total), ökonomische Allokation	92
Abbildung 5-47:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (CED, total), Allokation nach Masse	93
Abbildung 5-48:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (CED, total), ökonomische Allokation	94
Abbildung 6-1:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (GWP) – Szenario reduzierter Dy-Gehalt, Allokation der SE nach Masse	97
Abbildung 6-2:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (GWP) – Szenario reduzierter Dy-Gehalt, Ökonomische Allokation der SE	98
Abbildung 6-3:	Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (GWP) – Szenario Extraktionsmittel, Beiträge der Hilfsstoffe	99
Abbildung 7-1:	Systemgrenzen Motorherstellung, -nutzung und Recycling	104
Abbildung 7-2:	Motordemontage mit Metall-Recycling und Abfallverbrennung	105

Abbildung 7-3:	GWP Vergleich zw. neu hergestellten Motoren und Motoren mit wiederverwendeten Magneten	106
Abbildung 7-4:	ADP, <small>elem. ultimate reserve</small> . Vergleich zw. neuhergestellten Motoren und Motoren mit wiederverwendeten Magneten	107
Abbildung 7-5:	AP Vergleich zw. neuhergestellten Motoren und Motoren mit wiederverwendeten Magneten	108
Abbildung 7-6:	EP Vergleich zw. neuhergestellten Motoren und Motoren mit wiederverwendeten Magneten	109
Abbildung 7-7:	POCP Vergleich zw. neuhergestellten Motoren und Motoren mit wiederverwendeten Magneten	109
Abbildung 7-8:	CED Vergleich zw. Neuhergestellte Motoren und Motoren mit wiederverwendeten Magneten	110

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Charakterisierungsfaktoren für den ADP_{elem} [ultimate reserve für Nd und Dy: eigene Berechnungen; reserve base für Nd und Dy: Werte für „rare earths“ aus CML 2002; übrige Metalle: CML 2002]	28
Tabelle 4-1:	Route 3: Rohstoffliches Recycling: Energiebedarf	43
Tabelle 4-2:	Route 3: Rohstoffliches Recycling: Einsatz von Hilfsstoffen	44
Tabelle 4-3:	Verwendete Normierungsfaktoren	46
Tabelle A-1:	Für die MORE-Ökobilanz verwendete generische Datensätze (Route 1)	117
Tabelle A-2:	Für die MORE-Ökobilanz verwendete generische Datensätze (Routen 2 und 3)	120

1. Zusammenfassung

Hintergrund der Studie

Die gemeinsame Ökobilanz-Studie (engl. *Life Cycle Assessment (LCA)*) von Siemens AG und Öko-Institut e. V. im Rahmen des MORE-Projektes ist als begleitende Untersuchung für die Entwicklung von Wiederverwendungs- bzw. Recyclingverfahren für NeodymEisenBor-Magnete (NdFeB-Magnete) aus Elektromotoren aus dem Automobilsektor angelegt. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)“ geförderte Projekt MORE – Motor Recycling (ausführlicher Projekttitel: „Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben“ ist ein strategisches Verbundprojekt der Partner Siemens AG (Federführung), Daimler AG, Umicore AG & Co KG, Vacuumschmelze GmbH, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl f. Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Technische Universität Clausthal, Inst. f. Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik, Öko-Institut e. V. sowie Fraunhofer Ges., Institut f. System- und Innovationsforschung, Karlsruhe.

Der strategische Charakter von MORE ergibt sich vor dem Hintergrund der großen Bedeutung des Anwendungsfeldes NdFeB-Magnete im Bereich der strategischen Technologiemetalle „Seltene Erden“. Die Elektromobilität wird als einer der zukünftigen Wachstumsbereiche für NdFeB-Magnete eingeschätzt, die in Elektrofahrzeugen für permanent erregte Synchronmotoren (Elektromotoren) eingesetzt werden [Schüler et al. 2011]. Recyclinglösungen für die strategischen Technologiemetalle „Seltene Erden“ werden zur Zeit erst entwickelt [Binnemans et al. 2013]. Das Projekt MORE hat den Anspruch für das Anwendungsfeld NdFeB-Magnete hierzu entscheidende Grundlagen zu liefern.

Wiederverwendungs- und Recyclingrouten sowie funktionelle Einheiten

Die Motivation für das MORE Projekts war die Entwicklung neuer Recyclingverfahren für Elektromotoren aus Fahrzeugen mit besonderem Schwerpunkt der Komponente NdFeB-Magnete. Im Rahmen von MORE wurden drei entwickelte Verfahrensrouten mit Ökobilanzen modelliert. Diese drei festgelegten Routen (in Klammern federführender Partner) und ihre entsprechende funktionelle Einheiten sind folgende:

- Route 1 (Siemens): Reuse – Wiederverwendung von gereinigten NdFeB-Magneten
Funktionelle Einheit: Herstellung von 1kg NdFeB-Magnet durch Wiederverwendung
- Route 2 (VAC): Remelt - Werkstoffliche Verwertung, Rückführung des Magnetmaterials in die Magnetproduktion (Herstellung von Sekundärmagneten)
Funktionelle Einheit: Herstellung 1 kg Sekundärmagnet (NdFeB-Magnet)
- Route 3 (IFAD): Remat: Rohstoffliche Verwertung, Rückgewinnung von Seltene Erden-Mischoxid bzw. Neodymoxid und Dysprosiumoxid aus gebrauchten Magneten
Funktionelle Einheit: Herstellung von 1kg Seltene Erden-Mischoxid (Verfahren 1) bzw. Neodym- und Dysprosiumoxid (Verfahren 3; Verhältnis 2 : 1, siehe unten) aus Sekundärmagnet (NdFeB-Magnet)

Das Konsortium hat entschieden, eine allgemeine generische Magnetkomposition zur Konkretisierung der funktionellen Einheiten für die Ökobilanzen zu Grunde zu legen. Das Konsortium hat sich im Rahmen von MORE einvernehmlich auf die folgende generische Zusammensetzung (in Gewichtsprozent) verständigt, welche den Anwendungsbereich von MORE (NdFeB-Magnete aus Elektromotoren von Hybrid- bzw. vollelektrischen Fahrzeugen, d. h. u.a. hoher Dysprosiumgehalt) repräsentativ abbildet:

- Neodym (Nd) – 20%
- Dysprosium (Dy) – 10%
- Kobalt (Co) – 2%
- Eisen (Fe) – 67%
- Bor (B) – 1%

Ergebnisse

Wie aus den umfangreichen Ergebnissen der Wirkungsabschätzungen hervorgeht, sind alle drei über LCA in MORE untersuchten Routen (Route 1, Reuse: Wiederverwendung von NdFeB-Magneten; Route 2: Remelt, werkstoffliches Recycling von NdFeB-Magneten; Route 3: Remat: Rückgewinnung von SE-Oxiden aus abgetrennten NdFeB-Magneten) bezüglich der untersuchten Wirkungskategorien vorteilhaft im Vergleich zur Primärproduktion von NdFeB-Magneten bzw. den entsprechenden SE-Oxiden. Diese Aussage gilt unter der Voraussetzung, dass die gebrauchten Magneten lastenfrei in die Verwertung eingehen.

Route 1: Reuse

Die mechanische Abtrennung von NdFeB-Magneten von Elektromotoren und deren Wiederverwendung (nach Entmagnetisierung, Reinigung und Polierung) ist ökologisch eindeutig vorteilhaft. Im Vergleich zu einem Elektromotor mit NdFeB-Magneten aus der Primärherstellung schneidet ein Elektromotor mit wiederverwendeten NdFeB-Magneten nach allen untersuchten Wirkungskategorien (GWP, ADP elementar, AP, EP, POCP und CED total) positiv ab, d. h. zeigt ökologische Vorteile, vielfach deutliche ökologische Vorteile. Die Detailanalysen der Demontage- und Reinigungsschritte zeigen, dass vor allen die Teilschritte Reinigen (Siliziumcarbid!) und Entmagnetisieren (elektrische Energie) die größten ökologischen Belastungen verursachen, die jedoch durch die Gutschriften für die wiederverwendeten NdFeB-Magneten überaus deutlich übertroffen werden. Einschränkend muss erwähnt werden, dass die Ergebnisse der Route 1 auf Laborergebnissen beruhen, die während des Verbundprojektes MORE gewonnen wurden. Aus dem Kreis der MORE-Partner wurde gegen Projektende darauf hingewiesen, dass im Falle einer Motordemontage in einer semi-industriellen bzw. industriellen Anlage vor allem im Teilschritt Entmagnetisierung noch einfach zu erschließende und deutliche Optimierungspotenziale zur Reduzierung des Verbrauchs an elektrischer Energie durch den Infrarotstrahler bestehen (Optimierung der Einwirkungszone und -zeit der Infrarotstrahlung auf die NdFeB-Magnete). Die Ökobilanz-ergebnisse können daher auch vor diesem Hintergrund für die Route 1 als sehr robust eingeschätzt werden.

Ein weiteres interessantes und wichtiges Ergebnis ist, dass die Einbauvarianten in den Motoren – d. h. Motoren mit geklebten oder vergrabenen Magneten – für die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Wiederverwendung von Magneten ist, wie in MORE gezeigt wurde, technisch möglich, wird heute jedoch nicht praktiziert, da es noch kein standardisiertes Rotordesign gibt (vgl. Hauptbericht zum Verbundprojekt MORE, [Siemens 2014]).

Route 2: Remelt

Das werkstoffliche Recycling von NdFeB-Magneten, d. h. den (anteiligen) Einsatz von abgetrennten Sekundärmagneten zur Produktion neuer NdFeB-Magnete zeigt ebenfalls eindeutig ökologische Vorteile, und zwar durchgehend in allen untersuchten Wirkungskategorien. Die Bilanz ist ökologisch vorteilhaft, obgleich lediglich 30% Zumischung von Sekundärmaterial zur Produktion der neuen NdFeB-Magneten angesetzt wurde. Diese Zumischung ist aus Qualitätsgründen notwendig. Die Remanenzen solcher Magnete liegen allerdings ca. 3 % niedriger als von Magneten aus 100 % Primärmaterial und es ist fraglich, ob für solche Magnete ein Absatzmarkt vorhanden ist.

Route 3, Remat: Verfahren 1 und 3

Im Rahmen der Arbeiten von MORE zum rohstofflichen Recycling von NdFeB-Magneten wurden drei verschiedene Verfahren untersucht. Verfahren 2 stellt einen Reaktionsweg dar, der sich im Laufe der Arbeiten von MORE überholt hat. Daher wurde auch auf eine Ökobilanzierung von Verfahren 2 verzichtet. Verfahren 1 produziert ein Mischoxid der Seltenen Erden (hauptsächlich Neodym und Dysprosium). Nach Verfahren 3 werden nach einer Solventextraktionsstufe Neodymoxid und Dysprosiumoxid in sehr hoher Reinheit erhalten. Dieses Material wäre geeignet über eine Schmelzflusselektrolyse zu Neodym- sowie Dysprosiummetall umgesetzt zu werden. Diese Metalle könnten dann direkt wieder zur Herstellung von NdFeB-Magneten eingesetzt werden. Verfahren 3 stellt ohne Zweifel die ausgereifteste Verfahrensvariante des rohstofflichen Recyclings dar, welche im Rahmen von MORE entwickelt wurde (vgl. Hauptbericht zum Verbundprojekt MORE). Auch für das rohstoffliche Recycling der NdFeB-Magnete zeigen sich im Vergleich zur Primärkette der SE-Oxide Vorteile für alle untersuchten Wirkungskategorien. Verfahren 3 zeigt im Vergleich zu Verfahren 1 noch etwas bessere Ergebnisse und unterstreicht die Vorteilhaftigkeit dieses Weges im Vergleich zu Verfahren 1 (Produktion von SE-Mischoxiden).

Einschränkungen

Einschränkungen bzgl. der Datenqualität betreffen für alle Routen die Datenqualität der Primärdaten der SE sowie im Falle von Route 1 und Route 3 die Tatsache, dass die Prozessdaten auf Laborergebnissen beruhen. Im Zuge von MORE konnten von PE International über Projektpartner spezifische Daten zur Primärherstellung der SE Neodym und Dysprosium erhalten werden. Die Schwierigkeiten bei der Erhebung von Sachbilanzdaten zu der Primärherstellung der SE sind bekannt und mit der Tatsache verbunden, dass deutlich mehr als 90% der SE in China gewonnen und verarbeitet werden (schwieriger Datenzugang, Quellen häufig nur in chinesischer Sprache usw.). In Gesprächen mit PE International konnten jedoch Unklarheiten zum Datensatz ausgeräumt und gegen Projektende ein aktualisierter

Datensatz erhalten werden. Die Aktualisierung der SE-Primärdaten betraf vor allem die Aktualisierung der Daten nach der ökonomischen Allokation, was angesichts der starken Preisschwankungen bei SE eine große Rolle spielt. Die ökonomische Allokation, die für die Ökobilanzen in MORE zu Grunde gelegt wurde, basiert auf den Preisen vom Sommer 2013.

Sensitivitätsanalysen

Bei allen Ökobilanzen im Rahmen von MORE zu allen drei Routen wurden für die Gutschriften der SE jeweils nach Massenallokation und nach ökonomischer Allokation gerechnet. Für beide Allokationsverfahren gibt es Gründe; letztlich ist diese Vorgehensweise als durchgängiger Sensitivitätsansatz zu verstehen. Durch die große Bandbreite der Sachbilanzdaten für die Primärrouten der SE zeigt sich in den absoluten Werten eine große Bandbreite bei den Nettoergebnissen. Dabei stellen die Ergebnisse nach Massenallokation die konservativen Varianten dar. Unter Annahme des lastenfreien Eingangs der entsorgten Magnete führen die Ökobilanzergebnisse nach beiden Allokationsverfahren zu relativ gleichen Aussagen. Dies unterstreicht die Robustheit der Ökobilanzergebnisse von MORE und relativiert damit auch Datenunsicherheiten bei den SE-Primärdaten.

Eine weitere Sensitivitätsanalyse betraf nach Anregung des Critical Reviewers für Route 3 den Dysprosiumgehalt der generischen NdFeB-Magnetzusammensetzung. Statt 20 Gew% Neodym und 10% Gew% Dysprosium wurden in einer Sensitivitätsanalyse 26 Gew% Neodym und 4% Dysprosium angesetzt. Dies adressiert aktuelle Bemühungen der Industrie den notwendigen Dysprosiumgehalt in NdFeB-Magneten soweit als technisch vertretbar und möglich zu begrenzen. Erwartungsgemäß wurden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung im Falle der Massenallokation nicht beeinflusst. Im Falle der ökonomischen Allokation zeigten sich deutliche Veränderungen, da Dysprosium aufgrund seines hohen Preises besonders hohe Gutschriften liefert. Die Ökobilanz fiel in diesem Fall zwar weniger deutlich positiv aus, bewegte sich jedoch immer noch im positiven Bereich im Sinne des Recyclings.

Schließlich wurde ebenfalls auf Anregung des Critical Reviewers für das Solventextraktionsmittel in Route 3, Verfahren 3 eine Sensitivität hinsichtlich der Vorkette für diese spezielle Verbindung gerechnet. Im Ergebnis zeigte sich trotz ca. doppelt so hoher Vorkettenbelastung für diesen Hilfsstoff kein nennenswerter Einfluss auf das Gesamtergebnis. Dies unterstreicht ebenfalls die klare Robustheit der Ökobilanzergebnisse.

Fazit und Empfehlungen

Wenn die entsorgten Magneten lastenfrei in die Bilanz eingehen, schneiden alle Routen in den Ökobilanzergebnissen positiv ab. Die Richtungssicherheit der jeweiligen Ergebnisse ist relativ hoch. Die jeweilige Wahl des Verfahrens in der Praxis (Route 1, 2 oder 3) wird vom Verschmutzungsgrad der Magneten und der Marktnachfrage abhängen. Die Ergebnisse basieren (Ausnahme Route 2) jedoch überwiegend auf Labordaten. Skaleneffekte bei Automatisierung und Upscaling, d. h. Minderungspotenziale sind noch denkbar als auch ggf. erhöhte Aufwendungen für die Motordemontage und Magnetabtrennung im Falle einer Automatisierung. Die Strahlenbelastung wurde aus methodischen Gründen und Daten Gründen heraus nicht als Wirkungskategorie in den Ökobilanzen quantifiziert. Ungeachtet dessen besteht hier ein weiterer großer ökologischer Vorteil im Falle der Wiederverwendung

bzw. dem werkstofflichen oder rohstofflichen Recycling von NdFeB-Magneten gegenüber der Primärroute.

Die vielversprechenden Ökobilanzergebnisse legen den Partnern von MORE nahe, die entwickelten Verfahren (Routen 1 bis 3) weiterzuentwickeln und möglichst zur industriellen Reife zu bringen.

2. Hintergrund der Studie und Aufbau des Berichts

Die gemeinsame LCA-Arbeit von Siemens AG und Öko-Institut e. V. im Rahmen des MORE-Projektes ist als begleitende Untersuchung für die Entwicklung von Wiederverwendungs- bzw. Recyclingverfahren für NeodymEisenBor-Magnete (NdFeB-Magnete) aus Elektromotoren aus dem Automobilsektor angelegt. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)“ geförderte Projekt MORE – Motor Recycling (ausführlicher Projekttitel: „Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtriebwerken“) ist ein strategisches Verbundprojekt der Partner Siemens AG (Federführung), Daimler AG, Umicore AG & Co KG, Vacuumschmelze GmbH, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl f. Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Technische Universität Clausthal, Inst. f. Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik, Öko-Institut e. V. sowie Fraunhofer Ges., Institut f. System- und Innovationsforschung, Karlsruhe.

Der strategische Charakter von MORE ergibt sich vor dem Hintergrund der großen Bedeutung des Anwendungsfeldes NdFeB-Magnete im Bereich der strategischen Technologiemetalle „Seltene Erden“. Die Elektromobilität wird als einer der zukünftigen Wachstumsbereiche für NdFeB-Magnete eingeschätzt, die in Elektrofahrzeugen für permanent erregte Synchronmotoren (Elektromotoren) eingesetzt werden [Schüler et al. 2011]. Recyclinglösungen für die strategischen Technologiemetalle „Seltene Erden“ werden zur Zeit erst entwickelt [Binnemans et al. 2013]. Das Projekt MORE hat den Anspruch für das Anwendungsfeld NdFeB-Magnete hierzu entscheidende Grundlagen zu liefern.

Die Siemens AG und das Öko-Institut waren arbeitsteilig für die Konzeption und Realisierung der Ökobilanzarbeiten verantwortlich. Die Siemens AG fokussierte im Schwerpunkt auf die Datenerhebung und Modellierung des Ausbaus, der Reinigung und der Wiederverwendung der NdFeB-Magnete sowie auf die Bilanzierung der Herstellung des kompletten Elektromotors für Elektrofahrzeuge. Das Öko-Institut war primär für die Datenerhebung und Modellierung der werkstofflichen und rohstofflichen Recyclingprozesse, die innerhalb von MORE entwickelt wurden, verantwortlich. Ungeachtet dessen stimmten die Partner alle methodischen Fragen wie funktionelle Einheiten, Systemgrenzen, Wirkungskategorien usw. kontinuierlich und einvernehmlich ab. Alle methodischen Festlegungen sowie Zwischen- und Endergebnisse der Ökobilanzen wurden zudem den Vertretern aller Partner im MORE-Projekt zeitnah präsentiert und mit ihnen ausführlich diskutiert.

Die Ökobilanzen innerhalb von MORE wurden gemäß ISO 14040/14044 durchgeführt. Die Aufgabe des unabhängigen externen Critical Reviewers wurde von Prof. Dr. Matthias Finkbeiner von der TU Berlin, Institut für Technischen Umweltschutz, Fachgebiet Sustainable Engineering, ausgeführt. Das Gutachten wurde von ihm als Experte und nicht im Namen

oder im Auftrag der TU Berlin erstellt. Im Rahmen eines begleitenden Critical-Review-Prozesses, nahm Herr Prof. Finkbeiner an zwei Treffen mit den Partnern Siemens AG und Öko-Institut e. V. 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.

3. Ziele und Untersuchungsrahmen

3.1. Ziele und Anwendungen der Studie

Ökobilanzen sind wichtig, um neue Technologien mit den entsprechenden konventionellen Technologien zu vergleichen. Das Verbundprojekt MORE forscht zu neuen Verfahren zum Recycling von Elektromotoren aus dem Automobilbereich (Traktionsmotoren für Hybrid- sowie vollelektrische Fahrzeuge). Im Mittelpunkt steht hier – neben dem Recycling der Hochvoltbatterien (siehe Referenzen Libri und Lithorec), die Rückgewinnung von Neodym-Eisen-Bor-Magneten (NdFeB-Magnete) bzw. der darin enthaltenen Seltenen Erden. Der größte Teil der Seltenen Erden (SE) Oxide-, SE Metalle- und SE Magnetproduktion wird aktuell in China durchgeführt. Starke Preisanstiege und Handelshemmnisse für Seltene Erden (vor allem 2010/2011) ließen weltweit ernsthafte Debatten über die Versorgungssicherheit bzgl. dieser Materialien aufkommen. Zudem ist die Primärproduktion der Seltenen Erden und ihrer Verbindungen in der VR China häufig im Zusammenhang mit ernststen Umweltbelastungen zu sehen. [Schüler et al. 2011].

Zunächst wird dieser Bericht verschiedene Prozessketten für die Wiederverwendung bzw. das Recycling von NdFeB-Magneten aus dem Automobilbereich (Traktionsmotoren) beschreiben, die Gegenstand der Forschungsaktivitäten im MORE-Verbund sind. Im Anschluss daran werden die Ökobilanzen der MORE Recyclingverfahren und deren Ergebnisse im Detail vorgestellt und diskutiert. Die durchgeführten Ökobilanzen sollen einerseits die ökologische Vorteilhaftigkeit der unterschiedlichen Wiederverwendungs- und Recyclingverfahren im Vergleich zur Primärroute der Seltenen Erden bzw. NdFeB-Magnete aufzeigen. Andererseits sollen durch die detaillierten Ergebnisse den MORE-Partnern wichtige Hinweise auf mögliche zukünftige Optimierungspotenziale ihrer entwickelten Verfahren aufgezeigt werden. Abschließend wird dieser Bericht Empfehlungen zur weiteren Entwicklung dieser Technologien geben. Da die unterschiedlichen Verfahren NdFeB-Magnete unterschiedlicher Qualität (unterschiedliche Verunreinigungsgrade usw.) adressieren, ist ein ökobilanzieller Vergleich der verschiedenen in MORE untersuchten Wiederverwendungs- und Recyclingrouten ausdrücklich nicht Ziel dieser Studie. Die Ergebnisse dieser Studie sind nicht für die Verwendung in zur Veröffentlichung vorgesehenen vergleichenden Aussagen bestimmt. In Absprache mit den Projektpartnern sollen Ergebnisse aus dieser Studie publiziert werden.

Die Zielgruppen für diese Studie sind zunächst die industriellen Projektpartner des Verbundprojektes MORE, die auf unterschiedlichen Stufen der Wertschöpfungskette Seltene Erden einsetzen (Magnethersteller, Elektromotorenhersteller, Hersteller von Hybrid- und vollelektrischen Fahrzeugen, Recyclingunternehmen) und die wichtige Repräsentanten für die jeweiligen Branchen darstellen. Neben Zielgruppen im wirtschaftlichen Bereich sind weitere Zielgruppen die deutsche und europäische Politik und Administration, die Informationen bzgl. der ökologischen Vorteilhaftigkeit der Recyclingverfahren erhält. Dies gilt gleichermaßen für die wissenschaftliche Fachöffentlichkeit.

3.2. Festlegung des Untersuchungsrahmens

3.2.1. Funktion und funktionelle Einheit

Die Motivation für das MORE Projekt war die Entwicklung neuer Recyclingverfahren für Elektromotoren aus Fahrzeugen mit besonderem Schwerpunkt der Komponente NdFeB-Magnete. Im Rahmen von MORE wurden drei entwickelte Verfahrensrouten mit Ökobilanzen modelliert. Diese drei festgelegten Routen (in Klammer federführender Partner) und ihre entsprechende funktionelle Einheiten sowie Referenzflüsse sind folgende:

- Route 1 (Siemens): Reuse – Wiederverwendung von gereinigten NdFeB-Magneten
Funktionelle Einheit: Herstellung von 1kg NdFeB-Magnet durch Wiederverwendung
- Route 2 (VAC): Remelt - Werkstoffliche Verwertung, Rückführung des Magnetmaterials in die Magnetproduktion (Herstellung von Sekundärmagneten)
Funktionelle Einheit: Herstellung 1 kg Sekundärmagnet (NdFeB-Magnet)
- Route 3 (IFAD): Remat: Rohstoffliche Verwertung, Rückgewinnung von Seltene Erden-Mischoxid bzw. Neodymoxid und Dysprosiumoxid aus gebrauchten Magneten
Funktionelle Einheit: Herstellung von 1kg Seltene Erden-Mischoxid (Verfahren 1) bzw. Neodym- und Dysprosiumoxid (Verfahren 3; Verhältnis 2 : 1, siehe unten) aus Sekundärmagnet (NdFeB-Magnet)

Es gibt eine Vor- und Nachkette zur Bewertung, weil die Magneteinheit erst nach der Trennung des Rotors vom Stator entnommen wird.

Zunächst werden zwei Arten von Elektromotoren bewertet. Sie unterscheiden sich dadurch, dass die Magnete auf dem Rotor aufgeklebt oder die Magnete im Rotor „vergraben“ sind. Die Unterschiede, die sich aus dem allgemeinen Design der Motoren ergeben, machen ab dem ersten Schritt die Herausforderung aus, die Magnete von der Motoreinheit zu trennen. Diese Abtrennung der Magnete wurde innerhalb von MORE entwickelt und ist im Gesamtbericht zu MORE näher beschrieben [Siemens 2014]. Anschließend jedoch ist die Behandlung der getrennten Magnete bis zur Sekundärrohstoffherholung so ähnlich, dass beide Vorbehandlungswege im Sinne dieser LCA-Studie als gleich berücksichtigt werden.

Die Prozessketten, die in dieser Studie berücksichtigt werden, sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 3-1: Demontage und Reinigung von aufgeklebten und vergrabenen Magneten



Motoren, die für MORE von Daimler zur Verfügung gestellt wurden, haben vergrabene Magnete, die aus dem Rotor gepresst werden müssen. Im Gegensatz dazu haben die Siemens-Motoren aufgeklebte Magnete auf dem äußeren Rand. Die in MORE entwickelten Prozesse trennen jeden einzelnen Magneten vom Rotor ab. Der Rotor wird zunächst von dem Motor bzw. Stator per Hand separiert.

In beiden Fällen folgt auf die Abtrennung der Magnete vom Rotor ein Entmagnetisierungsschritt (siehe Abbildung oben). Die weitere Behandlung der NdFeB-Magnete in den verschiedenen Routen (1, 2 und 3) ist der Schwerpunkt dieses LCA-Berichts.

Nach der Magnettrennung gibt es verschiedene Möglichkeiten: entweder können die Magnete wiederverwendet (werden Route 1) oder die Magnetlegierung (Route 2, werkstoffliche Verwertung) oder die darin enthaltenen Seltenen Erden (Route 3) werden wiedergewonnen. In der Praxis wird die Vorauswahl für eine der drei Routen vor allem durch den Verschmutzungsgrad bzw. Alterungszustand der NdFeB-Magnete bestimmt. Je besser die Qualität der abgetrennten Magnete, umso eher kommen prinzipiell Route 1 oder auch Route 2 in Frage. Bei etwas größerer Verschmutzung/Alterung der NdFeB-Magnete bietet sich Route 3 (rohstoffliche Verwertung), also die Wiedergewinnung der Seltenen Erden in Form ihrer Oxide, an.

Nach erfolgreicher Magnettrennung sind die Magnete auf einen Infrarot-Entmagnetisierungsstrahler ausgerichtet und werden mit einem motorisierten Förderband durch den Strahler gezogen. Der Prozess entmagnetisiert die Magnete durch Wärmeeinwirkung und

überführt sie zu den nachfolgenden Reinigungsschritten. Hier werden die Magnete in einer Schleiftrommel gesammelt und mit Siliziumcarbid und Ethanol durch Drehung und Schüttlung geschliffen. Nach der Reinigung haften noch Schleifrückstände auf den Magneten, die entfernt werden müssen. Dazu werden die Magnete in der Schleiftrommel mit einem Kunststoffgranulat poliert.

Verschiedene Einsatzmöglichkeiten zur Wiederverwendung für abgetrennte NdFeB-Magnete sind denkbar, wie z. B. Windturbinen und diverse Elektromotoren. Die LCA berücksichtigt für Route 1 nur die EoL-Szenarien der Wiederverwendung in Elektromotoren, hingegen keine anderen Verwendungsmöglichkeiten.

Das Konsortium hat entschieden, eine allgemeine generische Magnetkomposition zur Konkretisierung der funktionellen Einheiten für die Ökobilanzen zu Grunde zu legen. Das Konsortium hat sich im Rahmen von MORE einvernehmlich auf die folgende generische Zusammensetzung (in Gewichtsprozent) verständigt, welche den Anwendungsbereich von MORE (NdFeB-Magnete aus Elektromotoren von Hybrid- bzw. vollelektrischen Fahrzeugen, d. h. u. a. hoher Dysprosiumgehalt) gut abbildet:

- Neodym (Nd) – 20%
- Dysprosium (Dy) – 10%
- Kobalt (Co) – 2%
- Eisen (Fe) – 67%
- Bor (B) – 1%

3.2.2. Festlegung der Systemgrenzen

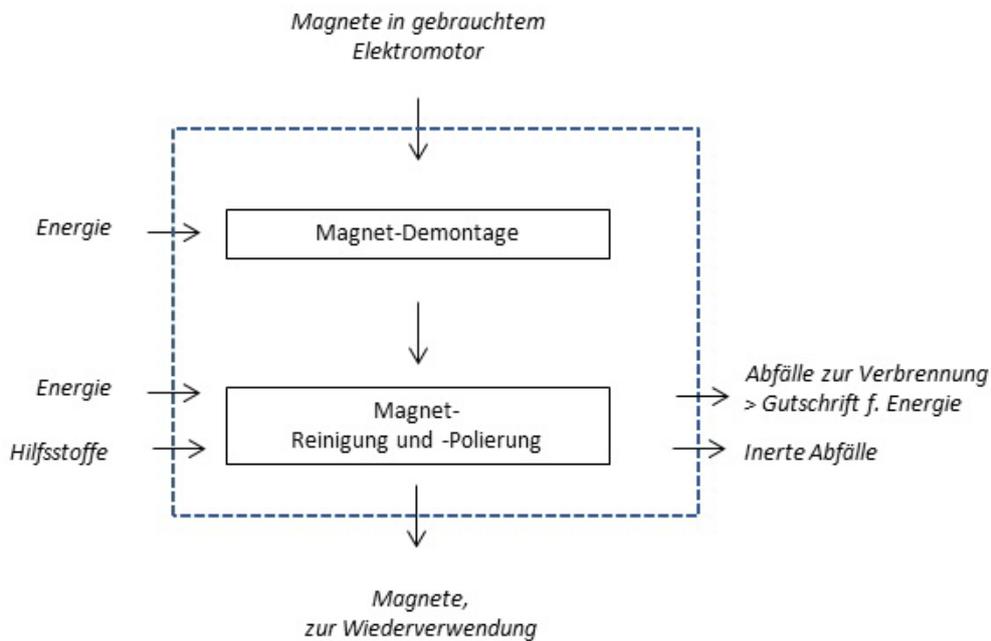
Die Nutzungsphase der Magnete wird nicht mitbilanziert. Diese Studie umfasst nur die EoL-Szenarien ab Recyclinganlage. Sammlung und Transport der gebrauchten Motoren werden nicht berücksichtigt.

Die Nutzungsphase der Magnete wird nicht mitbilanziert. Diese Studie umfasst nur die EoL-Szenarien ab Recyclinganlage. Sammlung und Transport der gebrauchten Motoren werden nicht berücksichtigt. Die gebrauchten Magnete gehen in der Bilanzierung lastenfrei ins Recycling bzw. zur Wiederverwendung. Alle Ergebnisse dieser Studie gelten nur für diesen End-of-Life-Allokationsansatz.

Die Systemgrenze für die **Wiederverwendung von NdFeB-Magneten (Route 1)** umfasst die folgenden Schritte:

- Annahme des ausgebauten Elektromotors (end-of-life Motor),
- Separation des Rotors vom Motor,
- Mechanische Abtrennung der NdFeB-Magnete vom Rotor,
- Entmagnetisierung, Reinigung und Polierung der NdFeB-Magnete

Abbildung 3-2: Systemgrenzen Route 1

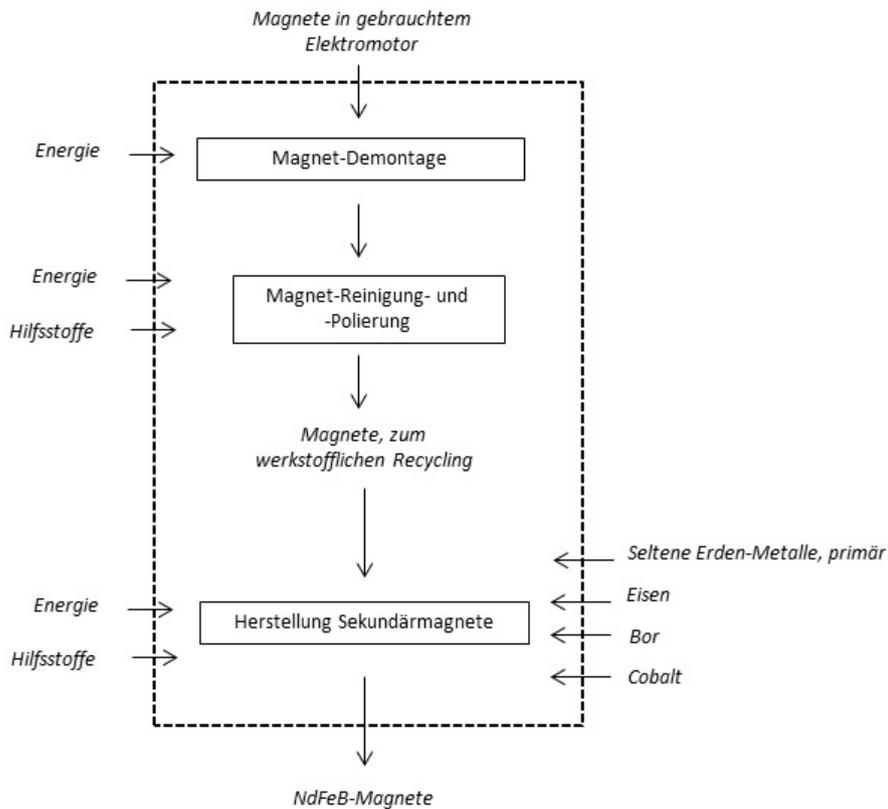


Die Systemgrenze für die **werkstoffliche Verwertung der NdFeB-Magnete (Route 2)**, d. h. die Rückführung des Magnetmaterials in die Magnetproduktion (Herstellung von Sekundärmagneten), umfasst die folgenden Schritte:

- Annahme des ausgebauten Elektromotors (end-of-life Motor),
- Separation des Rotors vom Motor,
- Mechanische Abtrennung der NdFeB-Magnete vom Rotor,
- Entmagnetisierung, Reinigung und Polierung der NdFeB-Magnete,
- Aufmahlen des Magnetmaterials,
- Herstellung von neuen NdFeB-Magneten durch Zugabe des Sekundärmaterials zu Primärmaterial (Verschneidung des Materials)

Die Remanenzen solcher Magnete liegen ca. 3 % niedriger als von Magneten aus 100 % Primärmaterial und es ist fraglich, ob für solche Magnete ein Absatzmarkt vorhanden ist.

Abbildung 3-3: Systemgrenzen Route 2



Die Systemgrenze für die **rohstoffliche Verwertung der NdFeB-Magnete (Route 3)**, d. h. die Rückgewinnung von Neodymoxid und Dysprosiumoxid aus gebrauchten Magneten, umfasst die folgenden Schritte:

- Annahme des ausgebauten Elektromotors (end-of-life Motor),
- Separation des Rotors vom Motor,
- Mechanische Abtrennung der NdFeB-Magnete vom Rotor,
- Entmagnetisierung der NdFeB-Magnete,
- Chemischer Aufschluss des NdFeB-Magnetmaterials und gezielte Gewinnung von Seltene Erden-Mischoxid (Verfahren 1) bzw. Neodymoxid und Dysprosiumoxid (Verfahren 3) in ausreichender Reinheit: bereit für die Neuherstellung von Magneten (nach Herstellung von Neodym- sowie Dysprosiummetall)

Abbildung 3-4: Systemgrenzen Route 3, Verfahren 1

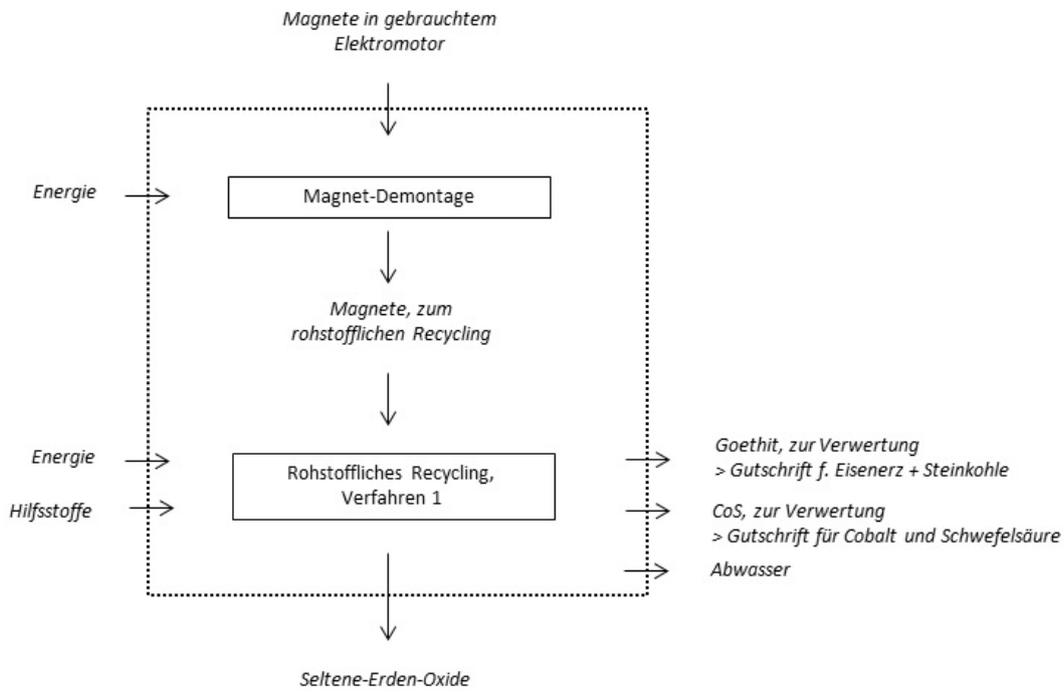
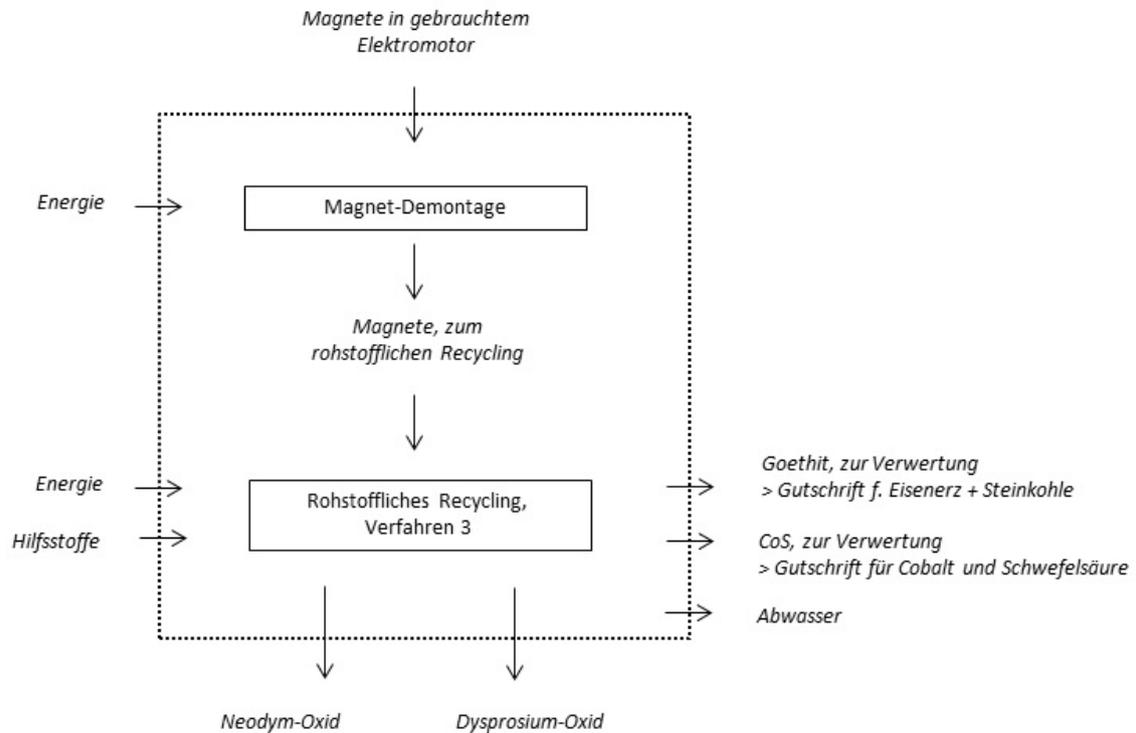


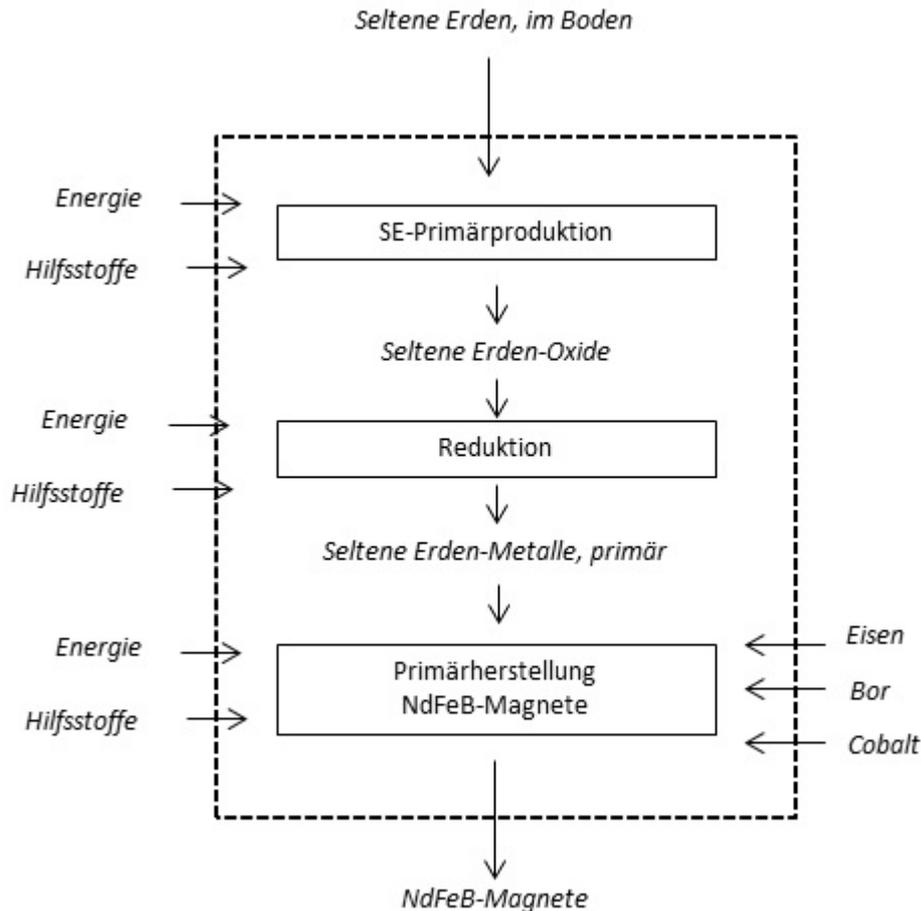
Abbildung 3-5: Systemgrenzen Route 3, Verfahren 3



Die Systemgrenzen der **Primärproduktion der SE und Herstellung der NdFeB-Magnete** für die Gutschriften der Recyclingwege umfassen:

- Gewinn von SE-enthaltendem Erz
- Konzentration von SE-enthaltendem Erz
- Separation von SE-Elementen und Herstellung von separierten SEO
- Schmelzflusselektrolyse von SEO zur Herstellung der SE-Metalle
- Herstellung der NdFeB-Magnete (inkl. Vorketten für die übrigen Elemente wie Eisen etc.)

Abbildung 3-6: Systemgrenzen Primärproduktion NdFeB-Magnete



3.2.3. Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität

Die Datenerhebung für die Sachbilanzen wurde in Zusammenarbeit mit den MORE-Projektpartnern, welche für die Arbeitspakete 2, 3 und 4 verantwortlich sind, durchgeführt. Die Hauptbeiträge zu den Sachbilanzen für die Wiederwendungs- und Recyclingrouten 1, 2 und 3, die als Eingabe für die LCA verwendet werden, sind Energieverbrauch pro Magnetgewicht (1 kg Magnet) bei der Abtrennung, Reinigung und ggf. weiteren Behandlung der Magneten sowie der Einsatz von Chemikalien und Hilfsstoffen (z. B. Schutzgase). Um die entsprechenden Umwelteinflüsse eines jeden einzelnen Prozesses zu bewerten, wird ein Anlagendurchlauf in das Modell mit Energie- und Chemikalienbedarf pro Magnetgewicht eingegeben. Die SEO Separationskette (Route 3) wird von der Motordemontage bis zur separierten SEO schrittweise dargestellt.

Aufgrund des experimentellen Stadiums der Entwicklungsarbeiten innerhalb des MORE-Projektes beruht der überwiegende Teil der Sachbilanzdaten auf Labordaten.

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

Die Sachbilanzdaten für die Primärgewinnung der Seltenen Erden entstammen einem Datensatz von PE International, der Industriepartnern von MORE zur Verfügung gestellt wurde und für MORE verwendet werden konnte.

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.

Technologische Repräsentativität

Die Daten für die in Entwicklung befindlichen Reuse- und Recyclingrouten entsprechen dem aktuellen Stand von Forschung und Entwicklung. Die Daten basieren auf exklusiven Informationen der involvierten Projektpartner. Die Daten repräsentieren für die meisten Module (Magnetdemontage, Magnetreinigung, Werkstoffliches Recycling, Rohstoffliches Recycling) den Pilot-/Labormaßstab und nicht einen großtechnischen Betrieb, da dieser zum Zeitpunkt der Erstellung der Ökobilanz noch nicht realisiert ist. Trotz dieser Einschränkungen sind die verfügbaren Daten nutzbar, da keine vergleichende Ökobilanz zwischen unterschiedlichen Routen intendiert ist.

Geographische Repräsentativität

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

Für die Gutschriften der Seltenen Erden Metalle werden Datensätze zur Produktion von Neodym und Dysprosium in China herangezogen. Für andere 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 und Kupfer die europäische Prozesskette verwendet.

Zeitrepräsentativität

Die zeitliche Repräsentativität der Daten bezieht sich auf die letzten 5 Jahre; so wurde auf die aktuell verfügbaren Datensätze des verwendeten GaBi-Modells zurückgegriffen. Datensätze aus ecoinvent v2.2 stammen aus den letzten 10 Jahren. Alle internen Daten bzgl. der Recyclingrouten wurden im Jahr 2013 bzw. im 1. Halbjahr 2014 erhoben.

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.

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

3.2.4. Allokation

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

Dieses Verfahren stößt allerdings gerade bei Seltenen Erden an seine Grenzen. So werden bei der Förderung und Herstellung von Verbindungen der Seltenen Erden (z. B. Neodym- oder Dysprosiumoxid) auch viele andere Seltene Erden in Form ihrer Oxide oder in Form anderer Verbindungen gewonnen (z. B. Verbindungen von Cer, Lanthan, usw.). Die aus den gleichen Erzen gewonnenen Verbindungen der verschiedenen Seltenen Erden weisen sehr unterschiedliche Preislevels und Nachfragen (pro kg) auf, die zudem starken Schwankungen unterliegen.

Würde man für diese Prozesse eine Allokation nach einem physikalischen Kriterium (Masse) wählen, so würden die Aufwendungen gleichmäßig auf die diversen Seltenen Erden aufgeteilt. Diese Aufteilung würde allerdings der Ökonomie des Primärgewinnungsverfahrens der Seltenen Erden widersprechen. Für dieses Verfahren wird daher eine Allokation nach Erlösen verwendet. In diesem Verfahren werden die Umweltauswirkungen nach Erlösen den Produkten zugeordnet. Da die Metalle Preisschwankungen unterliegen, muss hier bei der Anwendung Vorsicht gelten.

Aus diesem Grund hat sich das Ökobilanzteam innerhalb des MORE-Projektverbundes dafür entschieden durchgehend Sensitivitäten für die Gutschriften der Seltenen Erden zu bilanzieren; d. h. die Gutschriften werden sowohl nach Massenallokation als auch nach ökonomischer Allokation in den Sachbilanzen der Basisberechnungen berücksichtigt. Für die ökonomische Allokation wurden folgende Preise angesetzt: Dysprosium: 645 US-\$/kg Metall, Neodym: 73 US-\$/kg Metall.

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

3.2.5. End-of-Life Allokation

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

Im Gegensatz zu anderen Metallen wie Aluminium oder Kupfer, bei denen Recyclingprozesse seit vielen Jahrzehnten etabliert sind, gibt es bisher kein Recycling von Seltenen Erden in Deutschland. Bei den untersuchten Verfahren handelt es sich durchwegs um völlig neue Prozesse, die noch nicht auf Industriebene eingeführt sind. Auch Sammelsysteme für gebrauchte Magnete sind bisher nicht etabliert. Da im Rahmen dieser Studie keine Einschätzung vorgenommen werden kann, welchen Anteil gebrauchte Magnete an der Magnet-Produktion in Zukunft haben könnten, bleiben Aussagen zu möglichen Sekundäranteilen und zur Frage, wie viele Recyclingschleifen Magnetmaterial in künftigen Systemen durchlaufen könnte, bloße Spekulation. Aus diesem Grund wurde von einer Sensitivitätsrechnung mit der 50:50-Methode, wie sie das Umweltbundesamt empfiehlt [UBA 2002; Klöpffer 2009] abgesehen. Stattdessen gehen die gebrauchten Magnete in der Bilanzierung lastenfrei ins Recycling bzw. zur Wiederverwendung. Alle Ergebnisse dieser Studie gelten nur für diesen End-of-Life-Allokationsansatz.

3.2.6. Berücksichtigte Wirkungskategorien

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

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

- Versauerung
- Eutrophierung – Land
- Eutrophierung – Wasser
- Ressourcenerschöpfung – Wasser
- Ressourcenerschöpfung – mineralisch, fossil
- Landnutzungsänderungen

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

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

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

Bezüglich der zu betrachtenden Wirkungskategorien führt die Fachliteratur aus:

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

Die Auswahl der Wirkungskategorien für die vorliegenden Ökobilanzen der Recyclingverfahren für NdFeB-Magneten aus Elektromotoren aus dem Elektromobilitätsbereich fand in Abstimmung mit den Projektpartnern von MORE ein einvernehmliches Ergebnis. In Anpassung an die Thematik und die bestehenden Fragestellungen bzgl. der Recyclingverfahren wurden die folgenden Wirkungskategorien als Grundlage der Ökobilanzierung verwendet: Kumulierter Energie-Aufwand (KEA), Verbrauch an abiotischen Ressourcen mineralischen Typs (ADP, elementar), Treibhauspotenzial (GWP), Eutrophierung (EP), Versauerung (AP), Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP).

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

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

Mit dem USEtox Modell der UNEP/SETAC Life Cycle Initiative [Rosenbaum et al. 2011, Rosenbaum et al. 2008, Hauschild et al. 2008] wurde versucht, die verschiedenen Modelle zu harmonisieren. USEtox stellt ein Bewertungssystem dar für die Kategorien Humantoxizität und aquatische Ökotoxizität. Das Modell stellt sehr hohe Anforderungen an die Datenqualität

und die Anzahl der zu betrachtenden Stoffe. Da die Datenlage zu zahlreichen human- und ökotoxischen Stoffen so schlecht ist, dass fundierte Aussagen nur schwer abzuleiten sind, wird in dieser Studie auf die Einbeziehung der Humantoxizität und Ökotoxizität anhand einer Wirkungsabschätzung verzichtet.

Ein besonderer und relevanter Aspekt bei der Primärgewinnung und –herstellung von Seltenen Erden ist Strahlenbelastung, hervorgerufen durch radioaktive Begleitnuklide (vor allem Thorium und Uran) in den natürlichen Erzen. In den Ökobilanzierungen im Rahmen von MORE wird diese Wirkungskategorie dennoch nicht abgebildet, da einerseits ein angemessener übergreifender Parameter fehlt, der diese Wirkungskategorie überzeugend abdeckt, und andererseits keine ausreichend belastbaren Daten zu der radioaktiven Strahlenbelastung aus den Aktivitäten der relevanten Minen und Verarbeitungsanlagen (vor allem in China) vorliegen. In der Gesamtbewertung wird auf den Aspekt Radioaktivität daher nur qualitativ eingegangen.

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

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

Nachfolgend werden die in der Ökobilanz verwendeten Wirkungskategorien vorgestellt.

Hinsichtlich des **Verbrauchs an Ressourcen** wird einerseits der **Verbrauch an energetischen Ressourcen** über den Kumulierten Energie-Aufwand (KEA, engl. *Cumulative Energy Demand, CED*) abgebildet. KEA ist ein Maß für den gesamten Verbrauch an energetischen Ressourcen, die für die Bereitstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung benötigt werden. Im KEA enthalten ist auch der Energiegehalt, der im Produkt selbst enthalten ist. Der KEA weist generell alle nicht erneuerbaren und erneuerbaren energetischen Ressourcen als Primärenergiewerte aus. In der vorliegenden Ökobilanz werden mit dem KEA gesamt sowohl die nicht erneuerbaren als auch die erneuerbaren energetischen Ressourcen berücksichtigt. Zur Berechnung wird der untere Heizwert der verschiedenen Energieträger angesetzt. Der Verbrauch an **abiotischen Ressourcen mineralischen Typs** ist bzgl. der betrachteten Recyclingverfahren ebenfalls eine wichtige Wirkungskategorie, da die betrachteten Recyclingverfahren auf die Rückgewinnung wertvoller Sekundärmetalle zielen und damit primäre Metallressourcen einsparen sollen. Hierfür wurde für Ökobilanzen der Wirkungsparameter ADP elementar (abiotic depletion potential, $ADP_{elem.}$) entwickelt. In der vorliegenden Studie wird die Definition des $ADP_{elem.}$ aus der Basismethode des Dutch LCA Handbook [Guinée et al. 2001] mit den Charakterisierungsfaktoren nach [CML 2010] verwendet. Das $ADP_{elem.}$ berechnet sich dementsprechend als Quotient aus der Extraktionsrate einer Ressource und dem Quadrat der „ultimate reserve“¹ dieser Ressource ($ADP_{elem.,ur}$).

¹ Weitestgehende Definition von Reserve.

Bezogen wird auf Antimonäquivalente. Zusätzlich wurde für diese Ökobilanz auch der Verbrauch elementarer Ressourcen im Verhältnis zur Mindestreservebasis (reserve base ($ADP_{elem,rb}$)) bilanziert.

Die Charakterisierungsfaktoren für den elementaren Ressourcenverbrauch (reserve base und ultimate reserve) für die in dieser Studie relevanten Metalle sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Da in der grundlegenden Studie [CML 2002] keine ADP_{elem} -Charakterisierungsfaktoren für Neodym und Dysprosium angegeben sind (weder für $ADP_{elem,rb}$ noch für $ADP_{elem,ur}$) und auch in GaBi jeweils der Wert 0 eingetragen ist, wurden die Faktoren für die beiden Seltenen Erden nach der CML-Methode [Guinée 1995, CML 2002] modelliert. Als Ausgangswerte zur Berechnung wurden eine mittlere Dichte in der oberen Erdkruste von 27 $\mu\text{g/g}$ für Neodym und 3,9 $\mu\text{g/g}$ für Dysprosium [USGS 2010; Rudnick/Gao 2003] und eine jährliche Primärproduktion von 21.600 t Nd und 2300 t Dy (Werte für 2007, aus [Du/Graedel 2011]) angenommen.

Tabelle 3-1: Charakterisierungsfaktoren für den ADP_{elem} [ultimate reserve für Nd und Dy: eigene Berechnungen; reserve base für Nd und Dy: Werte für „rare earths“ aus CML 2002; übrige Metalle: CML 2002]

Element	ADP (kg-Sb-eq. / kg)	ADP (kg-Sb-eq. / kg)
	reserve base	ultimate reserve
Aluminium	2,53E-05	1,09E-09
Kobalt	2,56E-02	1,57E-05
Kupfer	2,50E-03	1,37E-03
Bor	5,28E-03	4,27E-03
Eisen	1,66E-06	5,24E-08
Neodym	5,69E-04	1,82E-05
Dysprosium	5,59E-04	1,69E-04

Die Berechnung des **Treibhauspotenzials** (GWP) in Form von CO_2 -Äquivalenten wird allgemein anerkannt. Mit dem Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) besteht zudem ein internationales Fachgremium, das sowohl die Methode als auch die entsprechenden Kennzahlen für klimawirksame Substanzen errechnet und fortschreibt. Bei der Berechnung von CO_2 -Äquivalenten wird die Verweilzeit der Gase in der Troposphäre berücksichtigt; daher stellt sich die Frage, welcher Zeitraum der Klimamodellrechnung für die Zwecke der Ökobilanz verwendet werden soll. ISO TS 14067 [ISO 2013] legt die Modellierung auf der 100-Jahre-Basis fest. Die in den Berechnungen des Treibhauspotenzials berücksichtigten Substanzen werden mit ihren CO_2 -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.

3.2.7. Methoden der Auswertung

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

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

3.2.8. Konformität und kritische Prüfung

Die vorliegende Ökobilanz wurde entsprechend den einschlägigen Vorgaben der ISO 14040/14044 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 in Entwicklung befindliche Wiederverwendungs-/Recyclingverfahren handelt und demnach die Mehrzahl der Sachbilanzdaten aus Laborversuchen abgeleitet wurde. Mit Ausnahme der Daten für die Herstellung von NdFeB-Magneten aus Sekundärmaterial (bei Route 2) fehlen daher noch Daten aus industriellem Betrieb. Eine weitere Einschränkung besteht in der Vielfalt der in Frage kommenden NdFeB-Magneten und der auf die Zukunft nicht einfach zu prognostizierenden Marktentwicklungen hierzu. Nichtsdestoweniger wurde in konstruktiver und gemeinsamer Arbeit der Partner von MORE diese Einschränkung durch die Abstimmung auf eine geeignete generische Zusammensetzung der NdFeB-Magneten soweit wie möglich adressiert.

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

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

Eine wichtige Zielgruppe für die Ökobilanzstudie sind die Verbundpartner des MORE-Projektes selbst, die sowohl Hersteller als auch Anwender von NdFeB-Magneten umfassen.

Eine weitere Zielgruppe für die Ergebnisse stellen das fördernde Bundesministerium für Bildung und Forschung selbst und die interessierte Fachöffentlichkeit dar. Für die Politik sind vor allem Erkenntnisse bzgl. noch offenen Forschungsbedarfs und ggf. entsprechend weiterer Förder- und Entwicklungsprogramme zum Recycling der strategischen Technologiemetalle Neodym und Dysprosium 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.

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

4. Sachbilanz

4.1. Prozessbeschreibung Primärherstellung NdFeB-Magnete

Im MORE-Projekt wurde neben den Recyclingkonzepten zum Vergleich auch die **Primärherstellung von NdFeB-Magneten** untersucht. In einem ersten Schritt werden die vom Magnethersteller eingekauften Rohstoffe wie z. B. Eisen, Kobalt, Bor und Seltenen Erden aufgeschmolzen und abgegossen. Mit Wasserstoff wird das Material pulverisiert und anschließend in einem starken Magnetfeld ausgerichtet. Das Magnetpulver wird durch Pressen fixiert und danach gesintert. Je nach Anforderung werden die fertigen Magnete noch ge-

schliffen und oberflächenbeschichtet. Im letzten Schritt werden die Magnete magnetisiert. Neben dem Einsatz von elektrischer Energie werden vor allem Schutzgase (Argon, Stickstoff) als Hilfsstoffe eingesetzt. Eine detaillierte Prozessbeschreibung der Magnetherstellung bei der Vacuumschmelze GmbH & Co KG ist aufgrund von Geheimhaltungsgründen nicht möglich.

4.2. Prozessbeschreibung Reuse (Route 1)

Das MORE Projekt untersucht unter anderem die Möglichkeit abgetrennte NdFeB-Magneten aus Elektromotoren wiederzuverwenden (Reuse, Route 1). Der entsprechend bilanzierte Prozess umfasst die Magnettrennung vom Rotor, die Entmagnetisierung der abgetrennten Magnete, die Magnetreinigung und schließlich die Magnetpolierung. Produkt des Prozesses sind isolierte NdFeB-Magnete solcher Qualität, dass sie für den Wiedereinsatz in diversen Elektromotoren geeignet sind.

4.2.1. Motordemontage

Der erste Prozessschritt ist die Demontage des Elektromotors. Zunächst wird der Stator vom Rotor getrennt. Die weitaus meisten Komponenten des Elektromotors (aus Stahl, Aluminium und Kupfer) werden bestehenden Recyclingverfahren zugeführt. Nur geringe Gewichtsanteile (vor allem Kunststoffkomponenten) werden als Reststoffe in Verbrennungsanlagen entsorgt. Die Magnete befinden sich nach diesem Schritt noch auf dem Rotor und werden im nächsten Schritt weiterbehandelt.

Eine detaillierte Beschreibung der Motordemontage findet sich im Gesamtbericht von MORE [Siemens 2014]. Die Demontage des Motors und die Trennung des Rotors vom Stator werden in einem Exkurs betrachtet (siehe Kapitel 7). Die Ökobilanz der Route 1 beginnt mit der Abtrennung der Magnete vom Rotor. Magnettrennung vom Rotor

Zwei Anlagen zur Magnetabtrennung wurden vom FAPS-Institut im Rahmen von MORE entwickelt, da zwei Arten von Motoren berücksichtigt werden müssen: Motoren mit aufgeklebten Magneten auf der Außenseite des Rotors, und Motoren, mit Magneten in Aussparungen, die innerhalb des Rotors liegen (sogenannte vergrabene Magneten).

Die Rotoren werden per Hand auf einer geeigneten Anlage montiert. Je nach der Motorart werden die Magnete entweder abgeschert oder ausgepresst. Die in MORE entwickelten Abtrennungsanlagen sind im Experimentalstadium und daher noch nicht automatisiert. In der Ökobilanz wird kein Automatisierungsaufwand berechnet – nur der mechanische Betrieb mit Druckluft, um die Magneten vom Rotor zu trennen. Die Magnetverluste (Abrieb) bei diesem mechanischen Schritt betragen weniger als 1% des Magnetgewichts.

4.2.2. Entmagnetisierung

Anschließend werden die Magnete über ein Band einem Infrarotstrahler ausgesetzt und entsprechende Temperatureinwirkung entmagnetisiert. Die notwendige Einwirkungszeit im Strahler ist von der Magnethöhe abhängig. Für die Sachbilanz wurde eine durchschnittliche Magnethöhe und damit Einwirkungszeit angesetzt.

4.2.3. Magnetreinigung

Nach der Trennung der Magnete vom Rotor befinden sich noch Verunreinigungen bzw. Störstoffe wie z. B. Klebstoff auf den Magneten. Diese Verunreinigungen müssen in diesem Schritt entsprechend entfernt werden. Die folgende Reinigungsmethoden wurden getestet:

- Reinigung mit Siliziumcarbid in einem Rührwerk (zwei Varianten mit und ohne Ethanol)
- Reinigung mit Siliziumcarbid/Ethanol in einer Schleifrommel

Da die Variante in der Schleifrommel sich als besonders effizient herausgestellt hat, werden die Rührwerkvarianten für die Ökobilanzen nicht weiter berücksichtigt. Die Magnetverluste (Abrieb) in diesem Schritt betragen ebenfalls weniger als 1 Gew% des Magnetinputs.

Nach der Reinigung werden die Magnete dem nächsten Schritt (Magnetpolierung) zugeführt.

4.2.4. Magnetpolierung

Nach der Reinigung haften noch Schleifrückstände auf den Magneten. Die Magnete werden deshalb in einer Schleifrommel mit einem Kunststoffgranulat aus Polyphenylene Sulfid (PPS) poliert. Die polierten Magnete sind (nach Magnetisierung) bereit für einen Wiedereinsatz in Elektromotoren.

4.3. Prozessbeschreibung Route 2 – Werkstoffliches Recycling

In der Route 2 wurden zwei Verfahren zur Sekundärherstellung von NdFeB-Magneten untersucht, einmal mit einem zusätzlichen Umschmelzschritt zur Entfernung von Sauerstoffverunreinigungen und einmal durch direktes Einmahlen ohne Umschmelzen.

Da sich beim werkstofflichen Recycling die Remanenz der Magnete etwas verschlechtert, werden in dem untersuchten Recyclingverfahren keine Magnete aus 100% Sekundärmaterial hergestellt, sondern es wird eine Mischung von 30 % Sekundär- und 70 % Primärmaterial verwendet.

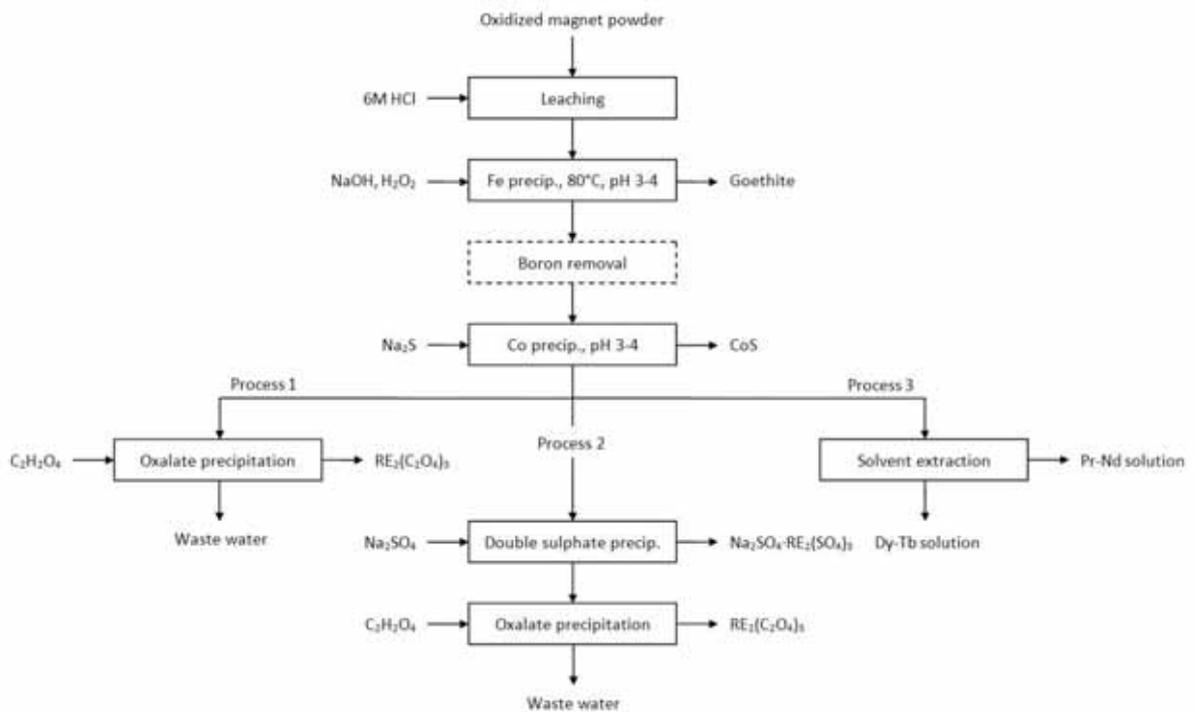
Das Primärmaterial wird nach dem genannten zusätzlichen Umschmelz- bzw. Mahlschritt beigefügt. Die weiteren Prozessschritte (Pulverisieren, Ausrichten, Pressen, Sintern, Schleifen/ Oberflächenbeschichtung, Magnetisieren) entsprechen denjenigen der Primärherstellung.

4.4. Prozessbeschreibung Route 3 - Rohstoffliches Recycling

Im Rahmen des rohstoffliches Recyclings wurden drei verschiedene Verfahren zur Gewinnung von Seltene-Erden-Oxiden untersucht. Hierbei werden durch Lösen des Magnetmaterials und sich anschließende Fällungen metallurgisch verwertbare Konzentrate erzeugt. Das SE-Konzentrat kann im Anschluss in einer vorhandenen Anlage zur Trennung von SE in die einzelnen Elemente aufgetrennt werden. Das Eisen- und das Kobaltkonzentrat lassen sich in entsprechenden Primärprozessen zur Eisen- bzw. Kobaltgewinnung einsetzen. Bei

allen drei Verfahren sind die Schritte bis einschließlich der Kobaltfällung identisch. Im verwendeten Magnetmaterial waren neben Neodym und Dysprosium auch noch Praseodym (Pr) und Terbium (Tb) vorhanden.

Abbildung 4-1: Verfahren des rohstofflichen Recyclings



Im ersten Verfahren werden alle SE gemeinsam in einem Mischkonzentrat gewonnen. Im zweiten Verfahren werden die Seltenen Erden zusätzlich durch selektive Fällungen in leichte (Nd, Pr) und schwere (Tb, Dy) SE vorgetrennt. Diese Trennung ist allerdings nicht vollständig. In der dritten Verfahrensvariante werden die SE durch Solventextraktion vollständig in leichte und schwere SE aufgetrennt und als reine Pr/Nd- und Tb/Dy-Mischoxide/-salze gewonnen, aus denen durch geeignete Reduktion ein Nd/Pr- sowie ein Dy/Tb-Mischmetall gewonnen werden können, die wieder zur Produktion neuer Magnetlegierungen nutzbar sind. Die Trennung in schwere und leichte SE ist für die Reduktion zum Metall (Schmelzflusselektrolyse) notwendig, da die Schmelzpunkte der leichten und schweren SE für eine gemeinsame Reduktion zu weit auseinander liegen.

Die Raffination und Trennung der SE wurde im Rahmen des MORE-Projekts untersucht, die Reduktion zu den Metallen dagegen nicht.

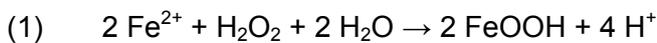
4.4.1. Vorbehandlung: Mahlen, Oxidieren, Lösen

Die Magnete werden unter Argon Atmosphäre gemahlen und das Pulver anschließend durch Anzünden gezielt oxidiert. Hierdurch wird ein homogenes Ausgangsmaterial für die weitere

Verarbeitung erzielt. Die Oxidation ist auch aus Sicherheitsgründen notwendig, da die Magnetlegierung im pulverförmigen Zustand aufgrund der metallischen SEE zur Selbstentzündung neigt. Während die SE vollständig oxidiert werden, trifft dies für Eisen nur zu ca. 5% zu, was für die weitere Verarbeitung wichtig ist. Das gemahlene und oxidierte Magnetmaterial wird anschließend aufgrund der stark exothermen Reaktion langsam unter Rühren in Salzsäure aufgelöst.

4.4.2. Eisenfällung

Da Eisenhydroxid ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) aufgrund seiner schleimartigen Struktur schwer zu filtrieren ist, wurde das Eisen als Goethit (FeOOH) nach Einsatz von Wasserstoffperoxid gefällt.



Um Eisen als Goethit zu fällen, muss das Eisen überwiegend als Fe^{2+} vorliegen. Innerhalb des Stabilitätsbereiches lässt sich das Eisen dann gemäß Gleichung 1 durch langsame Oxidation von Fe^{2+} zu Fe^{3+} mit Luft ausfällen. Zur Säureneutralisation wird Natronlauge eingesetzt. Eine langsame Oxidation führt zur Bildung eines kristallinen, leicht filtrierbaren Fällprodukts.

4.4.3. Kobaltfällung

Die Kobaltfällung wurde mit Natriumsulfid als Fällmittel ausgeführt, da die Seltenen Erden unter den gewählten Bedingungen keine Sulfide bilden. Eine selektive Fällung des Kobalts als Hydroxid ist nicht möglich, da sich der Fällbereich der SE-Hydroxide mit dem von Kobalhydroxid überschneidet. Wie die Goethitfällung wurde auch die Kobaltfällung in einem pH-Bereich zwischen 3 und 4 gemäß Gleichung 2 ausgeführt, um Verluste an SE zu vermeiden.



Das Fällprodukt ist ebenfalls einfach zu filtrieren und die erreichbaren Kobaltrestkonzentrationen in der Lösung liegen unter 5mg/L. Somit können über 90% des Kobalts in der Lösung über die Fällung als Kobaltsulfid zurückgewonnen werden. Das Kobaltsulfid wird anschließend mit Wasserstoffperoxid zu Kobaltsulfat oxidiert, das ein gängiges marktfähiges Kobaltprodukt darstellt.

4.4.4. Verfahren 1: Oxalatfällung

Im ersten Verfahren wurden alle SE gemeinsam durch eine leicht überstöchiometrische Zugabe von Oxalsäure in die Lösung gefällt. Nach Filtration und Waschen wird das Oxalat durch Glühen in ein Oxid unter Freisetzung von CO_2 umgewandelt.

4.4.5. Verfahren 2: Fraktionierte Fällung

Im zweiten Verfahren wurden die SE durch eine fraktionierte Fällung grob in leichte SE und schwere SE getrennt. Dazu wurde dem Filtrat der Kobaltfällung in einem ersten Schritt

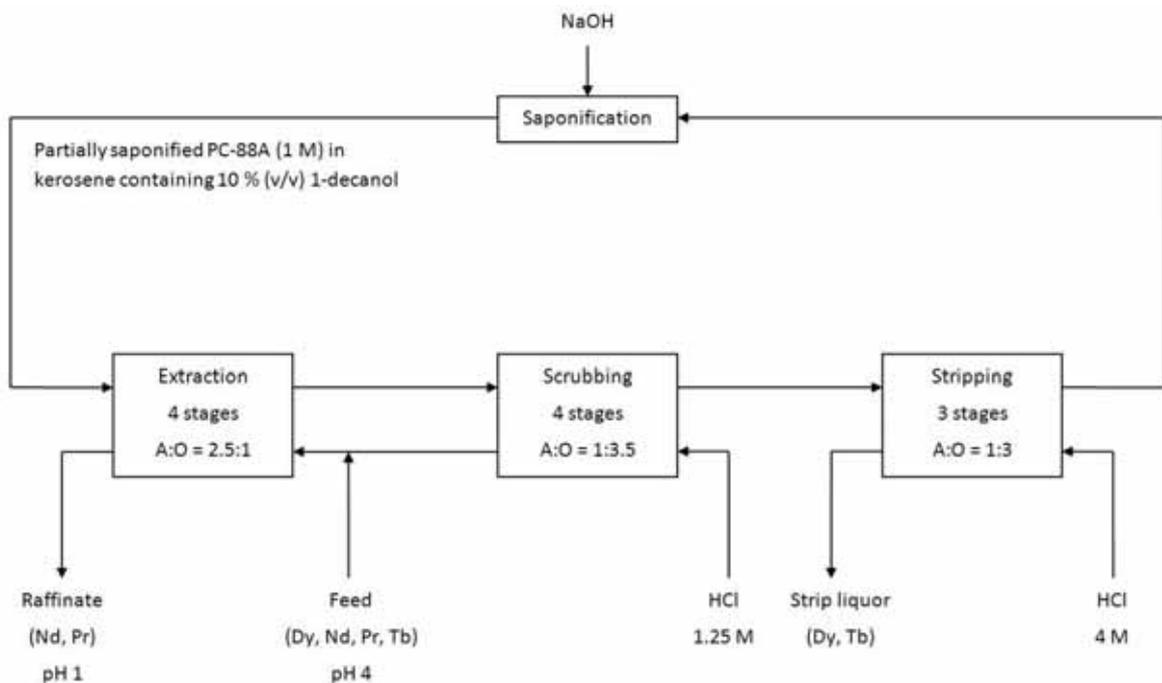
Natriumsulfat zugegeben. Nach Filtration und Waschen wurden die Doppelsulfate mit heißer, konzentrierter Natronlauge in Hydroxide umgewandelt. Die im Filtrat verbliebenen SE wurden wie oben beschrieben als Oxalate gefällt und durch Glühen in die Oxide überführt.

Da dieses zweite Verfahren im Gegensatz zum ersten und zum dritten Verfahren als aus ökonomischer Sicht wenig realistisch eingeschätzt wird, wird es in der Ökobilanzierung nicht weiter berücksichtigt.

4.4.6. Verfahren 3: Solventextraktion

Im dritten Verfahren werden die SE durch eine Solventextraktion aufgetrennt, einem Prozess zur Trennung von Stoffen sowie zur Anreicherung in wässrigen Lösungen mit Hilfe eines organischen Lösungsmittels. Zwischen den nicht mischbaren Phasen kommt es zum Stoffaustausch. Das organische Lösungsmittel verbindet sich mit bestimmten Stoffen und trennt sie dadurch aus der wässrigen Lösung ab, andere Stoffe hingegen reichern sich in der wässrigen Phase an. Der Mechanismus ist reversibel und das organische Lösungsmittel ist wiederverwendbar. Um eine möglichst vollständige Extraktion zu erreichen, wird eine kontinuierliche Gegenstromextraktion in einer Mixer-Settler-Anlage angewendet (vgl. Abbildung). Die wässrigen Phasen fließen im Gegenstrom zu den organischen Phasen, wodurch das frische Solvent in Kontakt mit einem fast schon extrahierten Raffinat kommt, während das fast gesättigte Solvent mit der frischen wässrigen Lösung zusammenkommt.

Abbildung 4-2: Prozessschritte der Solventextraktion



Als Extraktionsmittel (Komplexbildner) wird PC-88A (2-Ethylhexyl-2-ethylhexylphosphonic acid) verwendet, eine organische Phosphonsäure, als Lösungsmittel Exxsol D100 (entaromatisiertes Kerosin) mit Isodecanol als Phasenmodifizier. Zur pH-Kontrolle während der Extraktion wird Natronlauge eingesetzt, die zu einer partiellen Verseifung des Extraktionsmittels führt. Mit Salzsäure wird die organische Phase im Anschluss an die Extraktion gewaschen und gestrippt. Während die schweren SE extrahiert werden, reichern sich die leichten SE in der wässrigen Phase an.

Die getrennten Seltenen Erden können dann aus dem „extraction raffinate“ (Nd, Pr) und aus dem „strip liquor“ (Dy, Tb) mit Oxalsäure ausgefällt werden. Wie in Verfahren 1 und 2 werden die Oxalate anschließend durch Glühen in Oxide überführt.

Während bei der Auftrennung der Seltenen Erden in der Primärgewinnung aus Erzen Hunderte von Stufen bei der Solventextraktion erforderlich sind, da dort neben Nd und Dy auch noch viele weitere SE im Erz vorhanden sind, die schwer voneinander zu trennen sind, kann die im MORE-Projekt untersuchte Extraktion von Nd und Dy aus dem Magnetmaterial auf ca. 12 Stufen beschränkt bleiben. Ein interessanter Vorteil des Verfahrens 3 ist, dass zwei sehr reine Produktströme Nd/Pr sowie Dy/Tb in Form ihrer Oxide erhalten werden.

4.5. Datengrundlage

4.5.1. Spezifische Daten Primärherstellung NdFeB-Magnete

Für die Prozessschritte bei der Herstellung von primären NdFeB-Magneten werden neben der Magnetlegierung auch verschiedene Hilfsstoffe (Inertgase, Wasserstoff) und elektrische Energie benötigt. Eine Dokumentation dieser Inputströme ist an dieser Stelle aufgrund der notwendigen Wahrung von Industriegeheimnissen nicht möglich.

Die Daten wurden von der VAC in Form von aggregierten Datensätzen zur Verfügung gestellt mit Werten zu den berücksichtigten Wirkungskategorien, in die alle Vorketten miteingerechnet wurden.

Produktionsabfälle (z. B. Schneideabfälle) werden sortenrein gesammelt und intern recycelt. Somit fallen keine Abfälle an außer Schleifschlämme, die nach China exportiert und dort wieder direkt in die Aufbereitungsprozesse eingebracht werden.

Da aufgrund der Vertraulichkeit der Prozessdaten keine Informationen zu den Verlusten in Form von Schleifschlämmen vorliegen, wird die Weiterverarbeitung dieser Schlämme in China in der Bilanzierung nicht weiter berücksichtigt. Inputseitig sind diese Verluste allerdings in den aggregierten Daten der Primärherstellung enthalten.

4.5.2. Spezifische Daten Reuse

Es wird davon ausgegangen, dass alle Schritte von Route 1 (Reuse) am gleichen Ort stattfinden. Daher werden keine Transportaufwendungen für Transporte zwischen den einzelnen Schritten bilanziert. Magnetverlust, der von beschädigten oder nicht nutzbaren Magnetanteilen kommt, ist als null in der Bilanz gegangen, weil die Forschung keine eindeutigen Ergebnisse zur Magnetschädigung an den verschiedenen Prozessschritten zeigte. Bei der

Magnettrennung wird auch ein kleiner Teil von den Magneten abgerieben. Dies wird in den folgenden Schritten dargestellt, aber der genaue Verlust von jedem Schritt ist nicht bekannt. Die Verluste liegen unter 1%, und werden daher für die Ökobilanz vernachlässigt.

4.5.2.1. Spezifische Daten Magnettrennung von Rotor

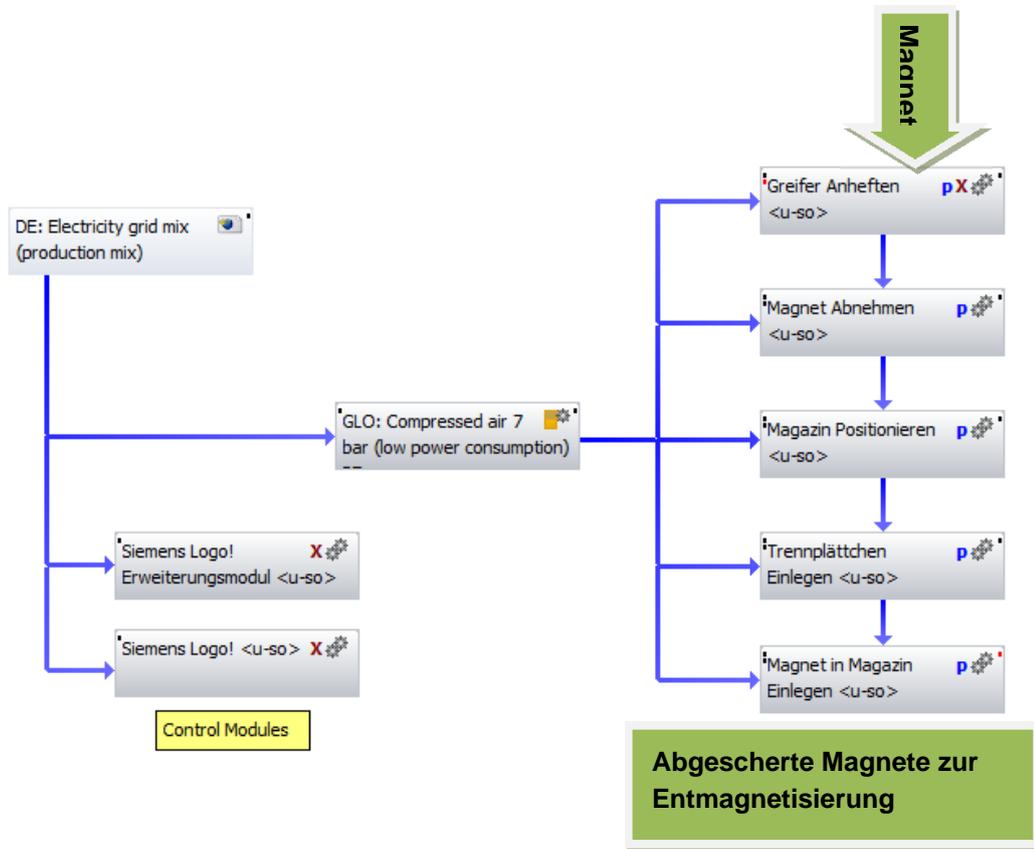
Die beiden Typen von Elektromotoren (vergrabene bzw. aufgeklebte Magnete) benötigen zwei unterschiedliche Anlagen zur Magnetabtrennung. Beide Anlagen werden angetrieben mit einem Standard Druckluftzylinder in der Art von DSBC-125-200-PPVA-N3. Die Anlagen sind mit einem Siemens Logo Modul versehen. Der Energieverbrauch wurde vom FAPS-Institut auf Basis der Testreihen geliefert. Der Druckluftverbrauch war abgeschätzt nach dem Zylinderstandard. Bei der Magnettrennung gibt es einen Magnetmaterialverlust von <1%.

Die Anlage, die aufgeklebte Magneten absichert, leistet fünf Arbeitsschritte zur Magnetabtrennung:

- Ein Magnet wird abgesichert und von einem Greifer abgenommen
- Das Magazin wird je nach Polarität des Magneten verschoben
- Kunststofftrennplättchen werden in das Magazin eingelegt
- Der Magnet wird sortiert nach Polungsrichtung in das Magazin eingelegt

Jeder Arbeitsschritt wird mit dem Druckluftzylinder ausgeführt.

Abbildung 4-3: Ökobilanzprozesskette zur Magnetabscherung



Die zweite Anlage, die zum Magnetauspressen für Elektromotoren mit vergrabenen Magneten geeignet ist, enthält „Zähne“ zum Auspressen der Magnete. Das Rotorblatt ist unter die Zähne montiert und die Zähne drücken die Magneten mit einem definierten Zeitabstand durch, sodass sie mit einem bestimmten Abstand auf das Förderband abgelegt werden. Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau der Auspressanlage:

Abbildung 4-4: Das Rotorblatt wird auf der Anlage montiert, und die Zähne pressen die Magneten aus; die Magnete fallen schließlich nach unten.

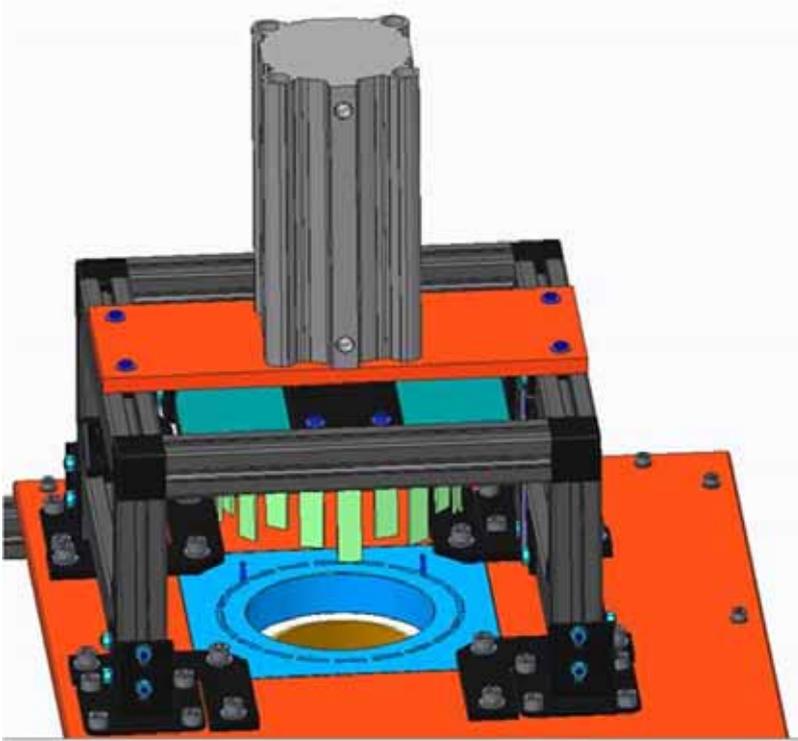
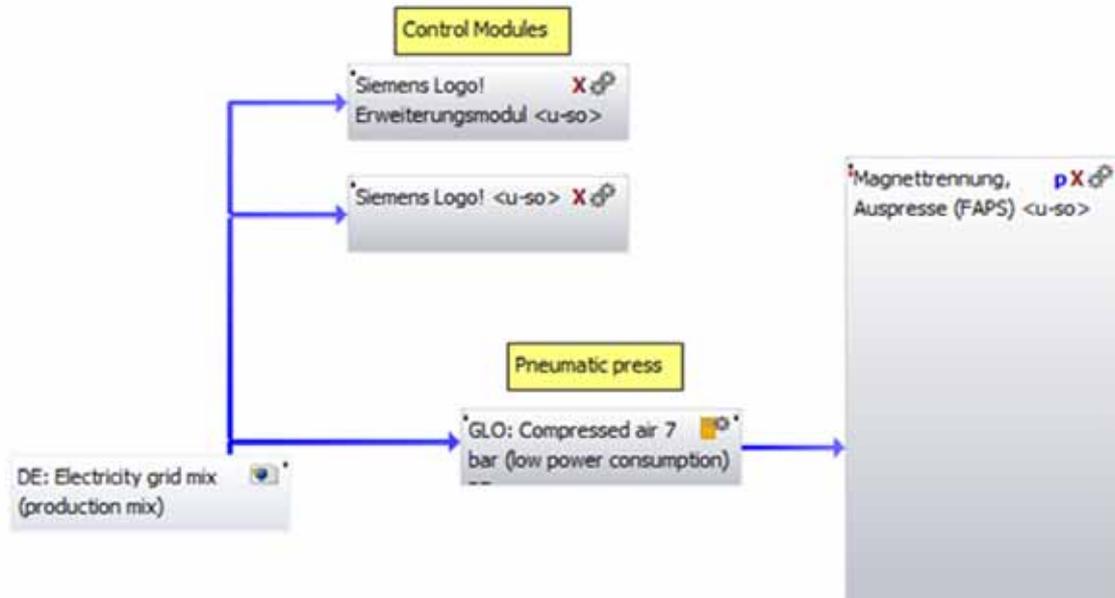


Abbildung 4-5: Ökobilanzprozesskette zur Magnetauspressung



4.5.2.2. Spezifische Daten Infrarotstrahler

Das Förderband hat eine Länge von 1m und zieht die abgetrennten Magnete unter sechs Infrarotstrahlern durch. Es gibt sechs 2kW Infrarotstrahler über das Band verteilt, die teilweise an- oder ausgeschaltet werden– je nach dem Entmagnetisierungsverbrauch. Bis zur erfolgreichen Entmagnetisierung der Magneten werden durchschnittlich 40 Sekunden benötigt. Die Magnete müssen auf dem Förderband mit einem Mindestabstand von 3,5mm liegen. Die folgende Abbildung zeigt die Anordnung der gesamten Auspressanlage inkl. Kunststoffrutsche und Förderband.

Abbildung 4-6: Anordnung der Auspressanlage

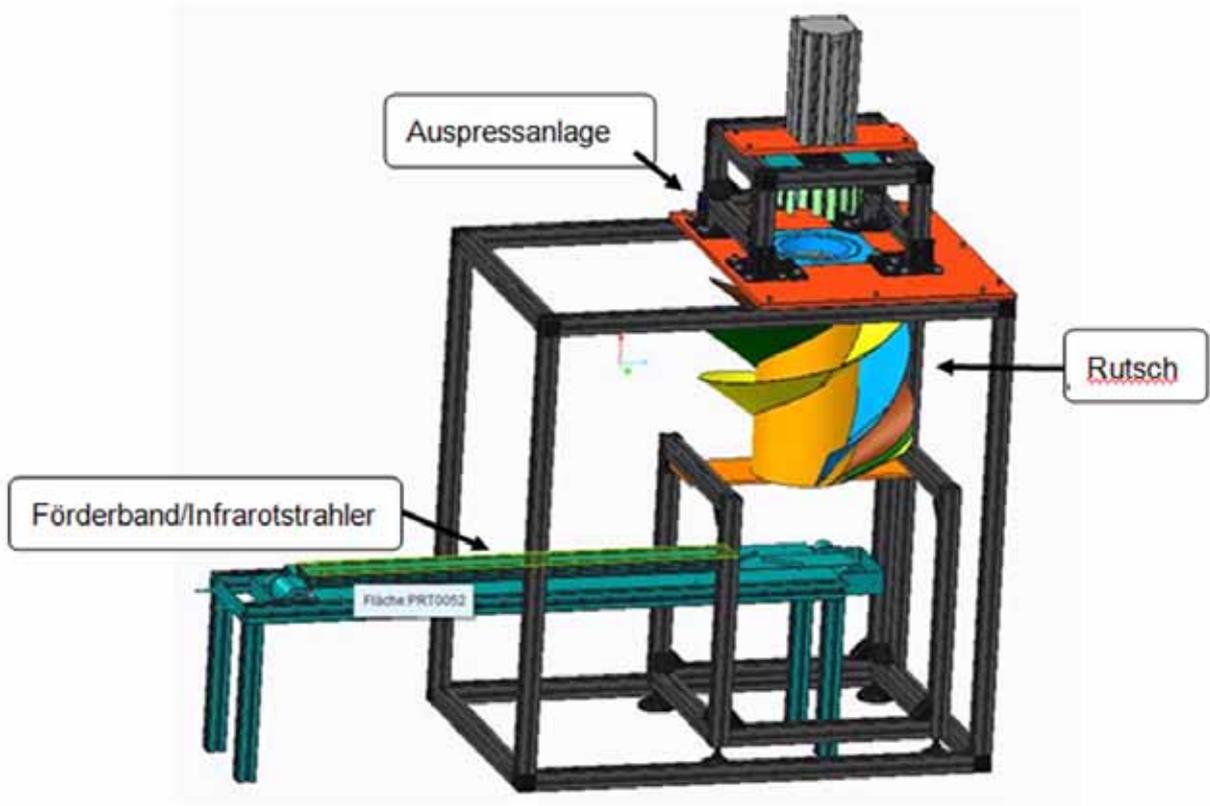
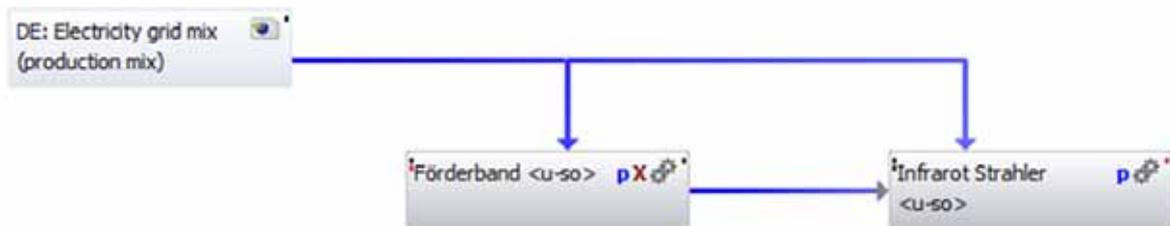


Abbildung 4-7: Ökobilanzprozesskette zu Infrarotstrahler und Förderband

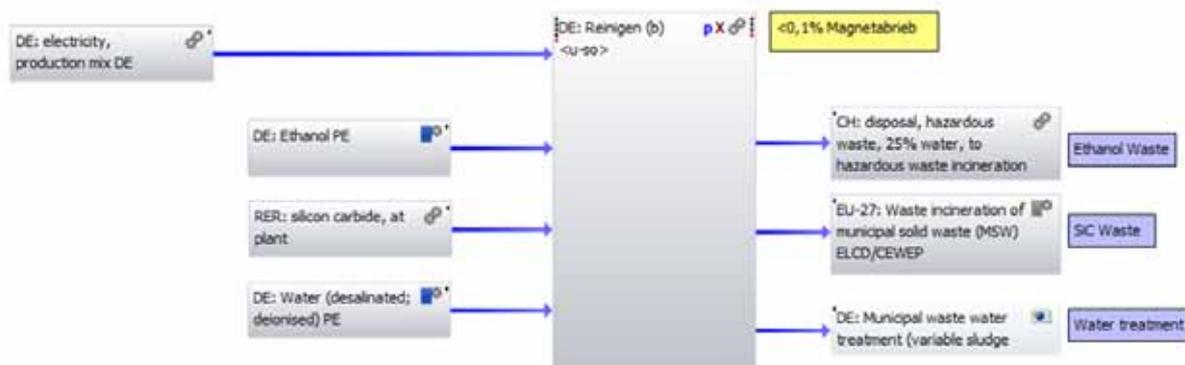


4.5.2.3. Spezifische Daten Magnetreinigung und Polierung

Die Reinigung der Magnete (Entfernung von Klebstoffen usw.) erfolgt durch einen Schleifprozess. Die Wahl des Reinigungsprozesses ist bereits in 4.1.4 beschrieben. Die Aufgabe der Schleiftrommel ist, die Magnete mit dem Schleifmittel durch Schütteln in Kontakt zu bringen. Die folgende Abbildung zeigt die Details zum Prozess in der Schleiftrommel mit Ethanol und Siliziumcarbid und die entsprechenden Stromleistung. Bei der Reinigung gibt es

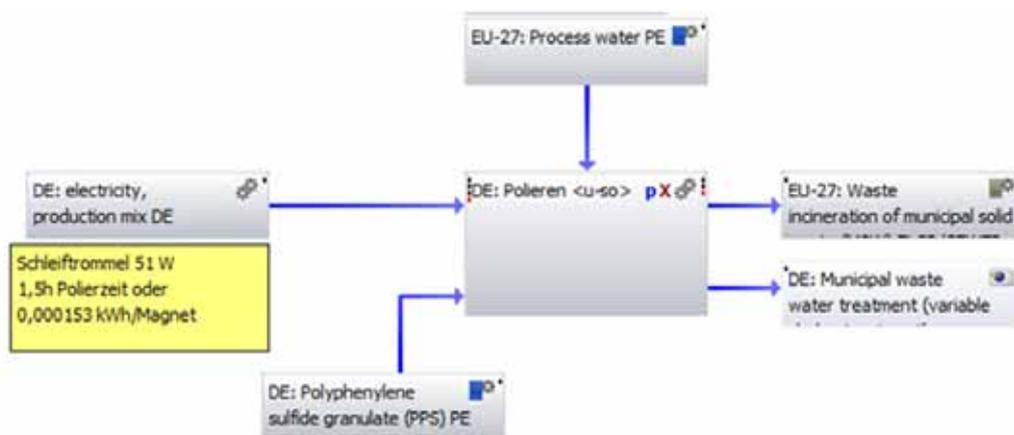
einen Magnetmaterialverlust von <0,1%. Die Daten wurden durch einen Test mit 500 Magneten in der Schleifrommel ermittelt. Eventuell an den Magneten anhaftende Ethanolreste werden mit Wasser abgewaschen. Die Abfälle von SiC und Ethanol werden verbrannt und das Abwasser wird entsorgt. Somit wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass es nicht zu Emission von Ethanol in die Atmosphäre kommt.

Abbildung 4-8: Ökobilanzprozesskette für Reinigung und Reinigungsabfälle



Da die Polierung ebenfalls in einer Schleifrommel erfolgt, ist der Prozess zum Reinigungsprozess ähnlich. Nur der Trommelinhalt ist bei der Polierung ein Polyphenylen-Sulfid-Granulat (PPS). Das PPS kann wiederverwendet werden. Die folgende Abbildung zeigt die Polierprozesskette.

Abbildung 4-9: Ökobilanzprozesskette für Polierung der Magnete und Polierungsabfälle



4.5.3. Spezifische Daten werkstoffliches Recycling

Für die Prozessschritte bei der Herstellung von sekundären NdFeB-Magneten werden neben dem recycelten Magnetmaterial (30 Gew%) und primärer Magnetlegierung (70 Gew%) auch Hilfsstoffe (Inertgase, Wasserstoff) und elektrische Energie benötigt. Eine Dokumentation dieser Inputströme ist an dieser Stelle aufgrund von Industriegeheimnissen nicht möglich. Allerdings werden die Magnetwerte von Magneten aus der Primärherstellung nicht ganz erreicht (ca. 3 % niedrigere Remanenz) und es ist fraglich, ob für solche Magnete ein Absatzmarkt vorhanden ist.

Wie bei der Primärherstellung wurden die Daten zur Herstellung von Sekundärmagneten von der VAC in Form von aggregierten Datensätzen zur Verfügung gestellt mit Werten zu den berücksichtigten Wirkungskategorien, in die alle Vorketten miteingerechnet wurden.

Auch bei der Herstellung von Sekundärmagneten werden wie schon bei der Primärherstellung die Produktionsabfälle sortenrein gesammelt und intern recycelt. Auch hier fallen Schleifschlämme an, die nach China exportiert und dort wieder direkt in die Aufbereitungsprozesse eingebracht werden. Da aufgrund der Vertraulichkeit der Prozessdaten keine Informationen zu den Verlusten in Form von Schleifschlämmen vorliegen, wird die Weiterverarbeitung dieser Schlämme in China in der Bilanzierung nicht weiter berücksichtigt. Inputseitig sind diese Verluste allerdings in den aggregierten Daten der Sekundärherstellung enthalten.

4.5.4. Spezifische Daten rohstoffliches Recycling

Für das rohstoffliche Recycling wurden von der TU Clausthal (IFAD) Daten zum Verbrauch von Energie und Hilfsstoffen erhoben (siehe die beiden folgenden Tabellen).

Tabelle 4-1: Route 3: Rohstoffliches Recycling: Energiebedarf

Energie	Route 3, V1	Route 3, V3
	[MJ/t feed]	[MJ/t feed]
Elektrische Energie zum Mahlen	108	108
Energie für Ofen zum Glühen der Oxalate	340	340
Elektrische Energie für Solventextraktion		0,13

Tabelle 4-2: Route 3: Rohstoffliches Recycling: Einsatz von Hilfsstoffen

Hilfsstoff	Route 3, V1	Route 3, V3
	[kg/t feed]	[kg/t feed]
Argon	2	2
HCl (37%)	2311	2639
NaOH (32%)	919	919
H ₂ O ₂ (30%)	2793	1225
Natriumsulfid (als Na ₂ S x 9 H ₂ O)	28,5	28,5
Oxalsäure (als C ₂ H ₂ O ₄ x 2 H ₂ O)	450	450
Wasser	3500	5000
PC-88A	-	35,2
Kerosin	-	57,4
Isodecanol	-	6,5

Beim Glühen der Oxalate wird CO₂ freigesetzt. Dieses wurde stöchiometrisch berechnet und als Luftemission gewertet.

4.5.5. Generische Datensätze

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 v6.0 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 v6.0 verwendet. Für darin fehlende Datensätze, die für diese Ökobilanz notwendig sind, werden Daten aus der Datenbank ecoinvent v2.2 eingesetzt:

Der geographische Bezug der Datensätze wird nach Möglichkeit landesspezifisch, d. h. Deutschland ansonsten europäisch oder global (in dieser Priorisierung) gewählt.

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

Für die Energieversorgung (Strom, Prozessdampf, Erdgas) werden Datensätze „Verbrauchsmix, beim Verbraucher“ zugrunde gelegt. Bei der Stromversorgung wird für Industriebetriebe eine Spannungsebene von 1kV-60kV angenommen. Für die Stromgutschrift wird ebenso diese Spannungsebene verwendet.

Zu Produktion von Isodecanol wurde ein Hydroformylierungsprozess angenommen. Die Ausgangsstoffe wurden stöchiometrisch berechnet, wobei ein Gesamtertrag von 95 % angenommen wurde. Werte zum Einsatz von Hilfsstoffen und Energie und zu den Emissionen wurden aus dem ecoinvent-Datensatz zur Hydroformylierung von Buten übernommen.

Da für die Herstellung von Oxalsäure kein Datensatz in den verwendeten Ökobilanz-Datenbanken verfügbar war, wurde sie mit dem generischen ecoinvent-Datensatz „Chemikalien, organisch, RER“ abgeschätzt.

Die Herstellung der Komplexbildner PC-88A wurde ebenfalls mit dem Datensatz „Chemikalien, organisch, RER“ abgeschätzt. Als Sensitivität wurde das Verfahren 3 auch mit dem Pestizid-Datensatz „organophosphorous-compounds, RER“ aus ecoinvent v2.2 für das Extraktionsmittel berechnet aufgrund der chemischen Verwandtschaft von PC-88A zu den Organophosphor-Verbindungen.

Das Lösungsmittel Exxsol D100 (entaromatisiertes Kerosin) wurde mit dem Datensatz zur Produktion von Kerosin abgeschätzt.

Da das Recyclingverfahren der Route 3 bislang nur auf Laborebene untersucht wurde und im Rahmen von MORE kein Upscaling des Prozesses auf Industriebene angestrebt wurde, wurden in der Bilanz keine Transporte von Hilfsstoffen zur Recyclinganlage berücksichtigt.

Für die Abwasserbehandlung wird eine gängige kommunale Abwasserreinigungsanlage angenommen. Es wird von einem vollständigen Abbau der Oxalsäure in der Abwasserreinigung ausgegangen; die Oxalsäureverluste sind in der Bilanz als CO₂-Emission gerechnet. Bor kann durch Ionentauscher aus dem Abwasser bis unter die Nachweisgrenze entfernt werden. Auch die Emission von Kobalt ins Abwasser kann durch ein Anheben des pH-Werts nach der Abtrennung der SE leicht unter die Nachweisgrenze gesenkt werden.

Eine Übersicht über die verwendeten generischen Datensätze gibt Annex 2.

4.5.6. Normierung

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

Tabelle 4-3: Verwendete Normierungsfaktoren

Wirkungs- Kategorie	GWP	ADP _{elem. ult}	ADP _{elem. res.}	AP	EP	POCP
Bezugsraum	kg-CO ₂ -eq/a	kg-Sb-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	2,3E+09	2,39E+11	1,58E+11	9,6E+10

Quelle: CML, 2010

4.5.7. Modellierung der Gutschriften

Für Neodym- und Dysprosiumoxid werden die entsprechenden Primärprodukte gutgeschrieben. Hierzu wurde von den Datensätzen zur Primärproduktion von Nd- und Dy-Metall der Reduktionsschritt abgezogen. Dieser wurde modelliert mit dem Aufwand für die Reduktion von Aluminiumoxid zu metallischem Aluminium, entnommen aus dem ecoinvent-Datensatz „Aluminium, primär, flüssig, ab Werk, RER“. Dabei wurde angenommen, dass Strominput pro Mol bei der Reduktion der SE dem Strominput pro Mol bei der Aluminiumreduktion entspricht, so dass der Strominput pro kg SE aufgrund des höheren Molgewichts der SE entsprechend niedriger liegt als der Strombedarf pro kg Al.

Bei der Gutschrift für das SE-Mischoxid werden Nd- und Dy-Oxid entsprechend ihrem Gewichtsanteil am Mischoxid gutgeschrieben. Hierbei wird davon ausgegangen, dass auch dieses Mischoxid später noch eine Solventextraktion zur Auftrennung der beiden Oxide durchläuft und diese anschließend zum Metall reduziert werden. Die Solventextraktion hierfür wird mit 10% des Aufwands für die Solventextraktion in der Primärproduktion abgeschätzt, entnommen aus dem ecoinvent-Datensatz „Seltene Erden Oxid-Produktion aus Bastnäsit, CN“.

Kobalt wird gängigerweise als Kobaltsulfat eingesetzt, das industriell durch Auflösung des Metalls in Schwefelsäure gewonnen wird. Zur Gutschrift dieses Metallsulfats werden die Metalle aus ihrer primären Herstellung durch Umsetzung mit stöchiometrischen Mengen an Schwefelsäure berechnet und die entsprechende Kobalt- und Schwefelsäure-Herstellung gutgeschrieben. Da die Kobaltanteil in den NdFeB-Magneten relativ gering ist und die Ergebnisse der Ökobilanz vor allem von Nd und Dy dominiert werden, wird die Gutschrift mit der Primärgewinnung von Kobalt aus der ecoinvent-Datenbank modelliert, obgleich dieser Datensatz ausweislich als Hilfsprozess, d. h. mit geringer Qualität, gekennzeichnet ist.

Das Goethit kann in den Prozess der Aufbereitung von Eisenerz geführt werden. Da zur Reduktion von Goethit etwas weniger Steinkohle benötigt wird als bei der Reduktion von Eisenerz, wird neben Eisenerz auch noch Steinkohle und der entsprechende Transportaufwand gutgeschrieben.

Die eingesetzten Prozesse für die Gutschriften sind im Annex 2 dokumentiert.

4.6. Einschätzung der Datenqualität

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

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

Die Datenqualität zur Route 2 (Werkstoffliches Recycling) ist als befriedigend zu kennzeichnen, da die Produktionsdaten der Geheimhaltung unterliegen und nicht eingesehen werden konnten.

Die Datenqualität von Sekundärdaten ist im Allgemeinen angemessen, wenngleich für die Primärproduktion der Seltenen Erden hier Einschränkungen vorliegen. Zu den primären Produktionsprozessen in China, insbesondere zur Produktion von Dysprosium, liegen nur unzureichende Informationen vor. Der hier verwendete PE-Datensatz zum Dysprosium ist allerdings der einzige, der in Ökobilanzierungsdatenbanken verfügbar ist.

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.

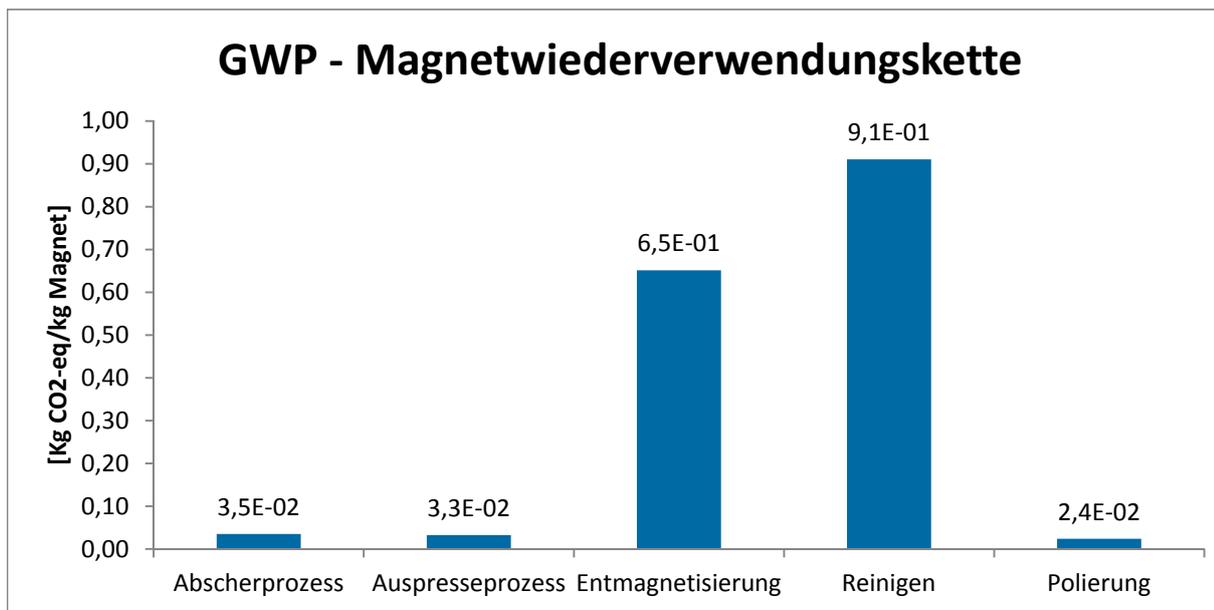
5. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

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

5.1. Route 1 - Reuse

5.1.1. Treihauspotenzial (GWP)

Abbildung 5-1: GWP Prozessaufteilung zur Magnetwiederverwendung



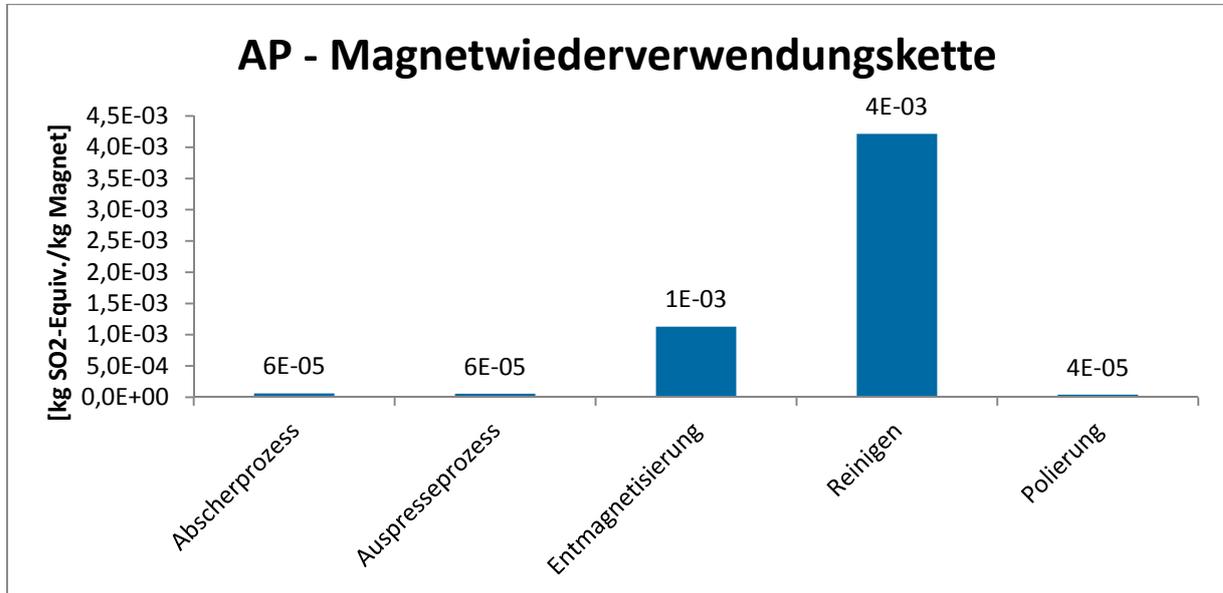
Der Hauptbeitrag des GWP (pro kg Magnet) beim Prozess zur Rückgewinnung der NdFeB-Magnete zur Wiederverwendung kommt von dem Reinigungsprozess, hierbei hat der Einsatz von Siliziumcarbid den größten Beitrag. Die Magnetabtrennungsprozesse (vom Rotor) und die Entmagnetisierung benötigen lediglich Energieeinsatz, um das Druckluftgerät bzw. den Infrarot-strahler zu betreiben.

5.1.2. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP elem. u.r.)

Da die Ergebnisse in der Wirkungskategorie ADP_{elem. u.r.} dominiert werden von der Stromgutschrift für die Verbrennung des Siliziumcarbid, ist die Kategorie nicht sinnvoll für diese Route und wird deshalb hier nicht dargestellt.

5.1.3. Versauerungspotenzial (AP)

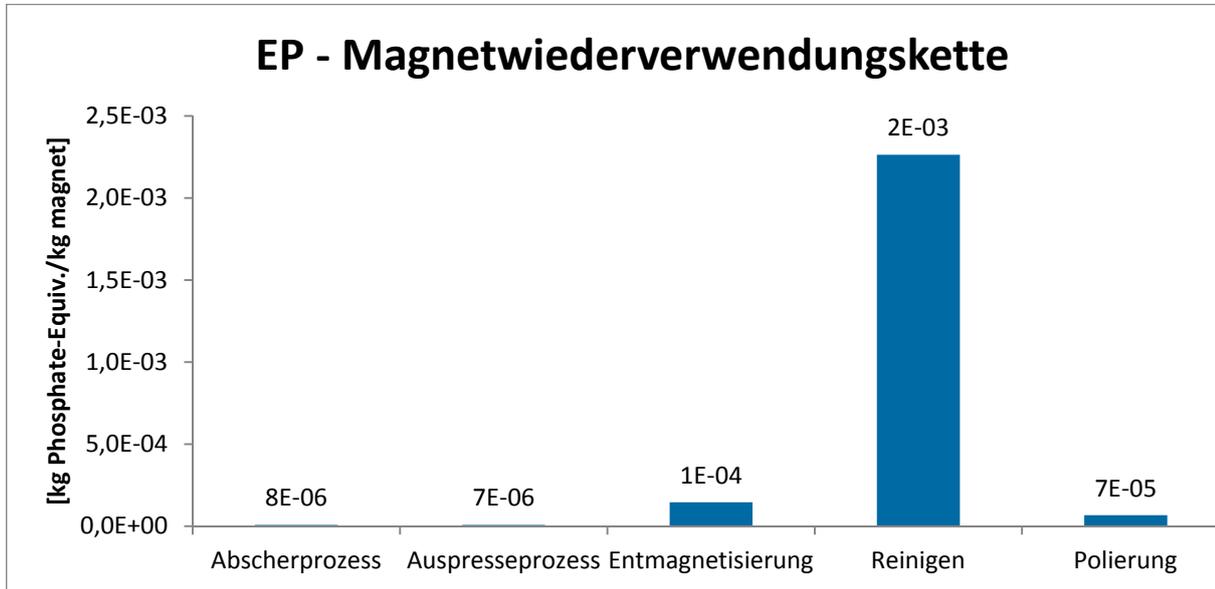
Abbildung 5-2: AP Prozessaufteilung zur Magnetwiederverwendung



Der Reinigungsschritt ist der Teilschritt mit dem höchsten Versauerungspotenzial, aufgrund des Einsatzes von Siliziumcarbid (Beitrag der Siliziumcarbidvorkette).

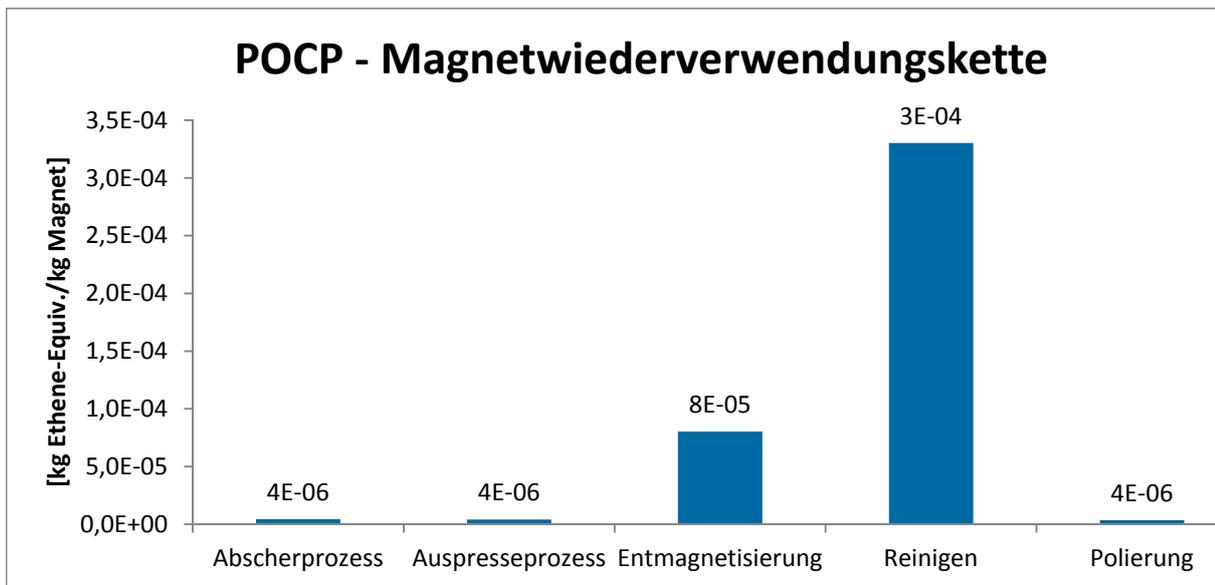
5.1.4. Eutrophierungspotenzial (EP)

Abbildung 5-3: EP Prozessaufteilung zur Magnetwiederverwendung



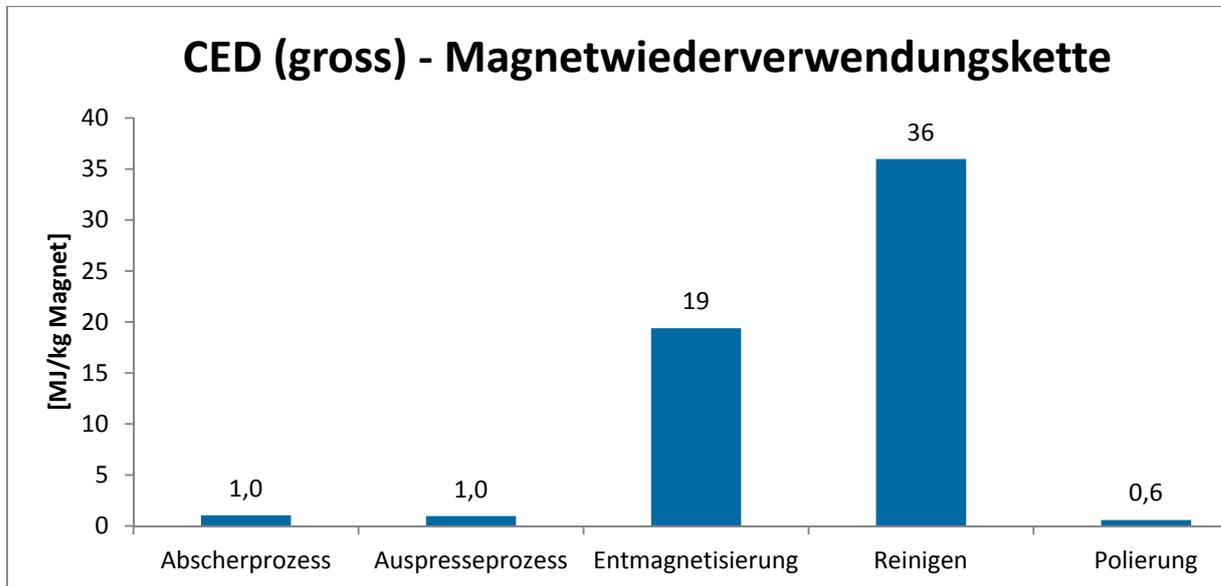
5.1.5. Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)

Abbildung 5-4: POCP Prozessaufteilung zur Magnetwiederverwendung



5.1.6. Kumulierter Energieaufwand (CED total)

Abbildung 5-5: CED Prozessaufteilung zur Magnetwiederverwendung



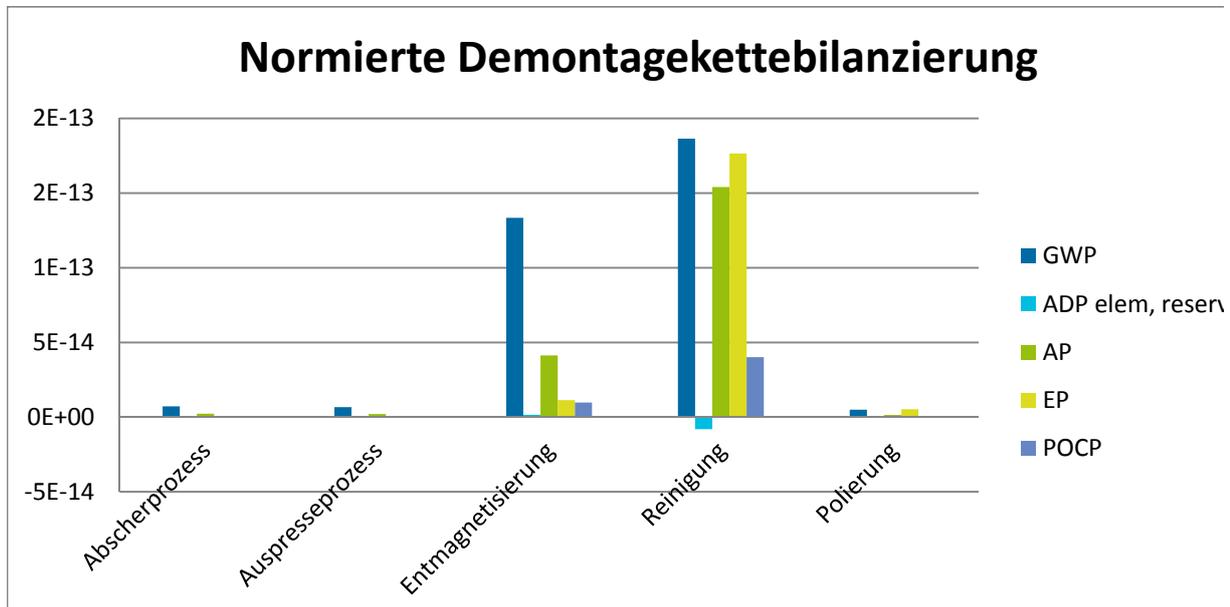
Wie in den vorherigen Abbildungen gezeigt, ist der Reinigungsschritt auch bei den weiteren Wirkungskategorien EP, POCP und CED total jeweils der Beitrag mit der höchsten Umweltwirkung; hauptsächlich aufgrund des Einsatzes und des Verbrauchs von Siliziumcarbid. Die Entmagnetisierung folgt an zweiter Stelle aufgrund eines relativ hohen Stromesinsatzes in Vergleich mit den anderen Teilschritten. Alle Daten beziehen sich auf die Demontage von 1kg Magneten aus dem Rotor.

5.1.7. Zusammenfassende Darstellung

Die folgenden Graphiken stellen die Ergebnisse bei der Wirkungsabschätzung des MORE-Verfahrens in der Gesamtschau dar.

Die normierte Demontagekettenbilanzierung zeigt die Demontageprozessschritte nebeneinander, um eine gesamte Übersicht zu den Umwelteinflüssen zu zeigen. Diese Grafik soll aufzeigen, welcher Prozessschritt mengenmäßig die größten Beiträge liefert.

Abbildung 5-6: Überblick Gesamte Prozessaufteilung zur Magnetwiederverwendung

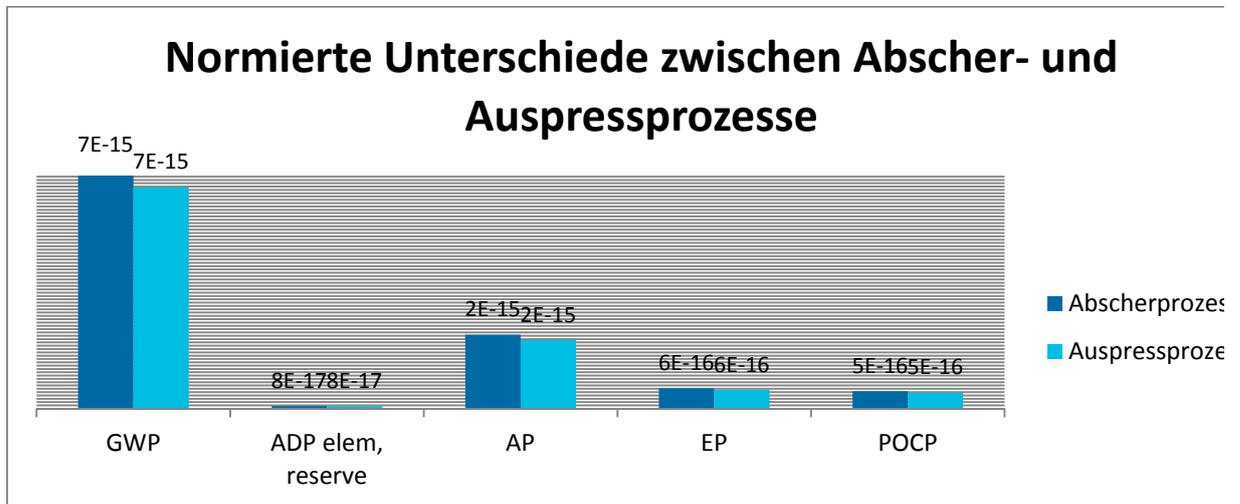


Bei den meisten Prozessen kommt die größte Umweltwirkung durch den Energieverbrauch (Deutsches Stromnetz). Dies ist der Fall beim Abscherprozess, dem Auspresseprozess, dem Entmagnetisierungsprozess, und dem Polierungsschritt.

Für alle Wirkungskategorien ist die Reinigung der Teilschritt, der mengenmäßig die größten Beiträge liefert, mit Ausnahme des ADP (Erklärung siehe unten). Die Entmagnetisierung ist energieaufwendig; daher ein hoher Beitrag zum GWP.

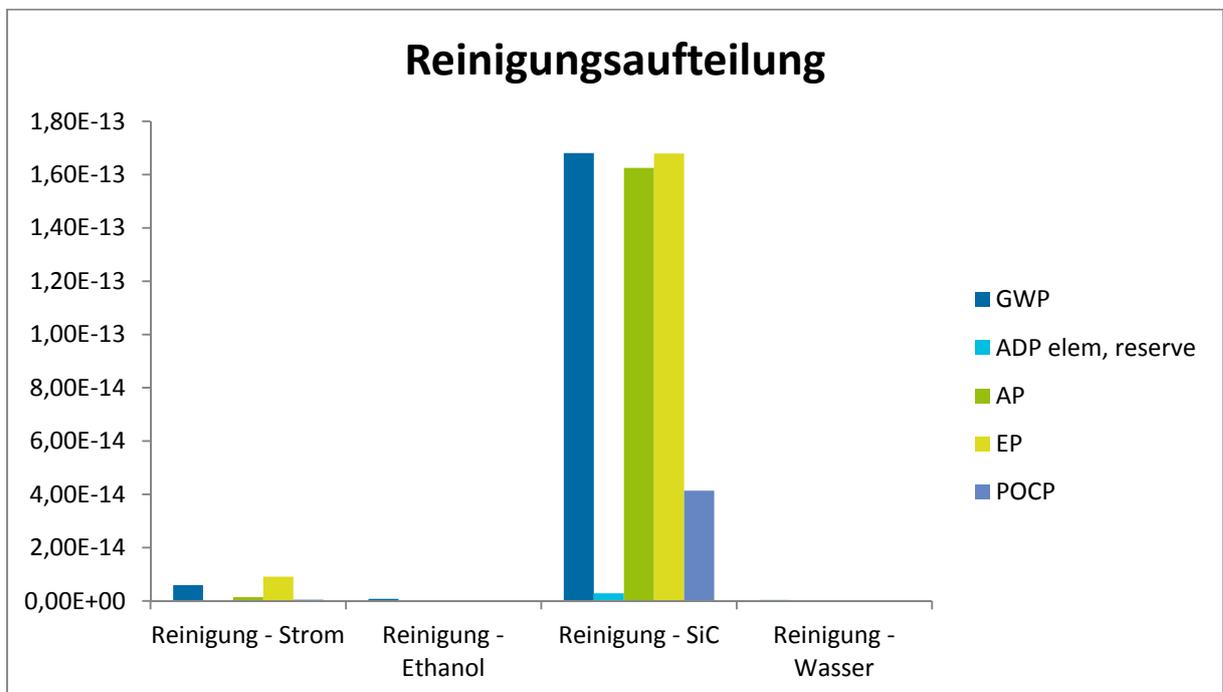
Die Abscher- und Auspressprozesse tragen nur untergeordnet zu dem Umweltauswirkungen der Wiederverwendungskette bei. Die Unterschiede zwischen dem Abscherprozess (für aufgeklebte Magnete) und dem Auspressprozess (für vergrabene Magnete) wird in der folgenden Abbildung dargestellt. Die beiden Varianten unterscheiden sich in ihren Umweltwirkungen nur marginal. Da die Demontageanlagen mit Druckluft betrieben werden, wird der Energieaufwand limitiert – die Strommodule sind bei beiden Anlagen gleich. Die abgeschätzten Werte sind nicht repräsentativ für eine automatisierte Prozesskette.

Abbildung 5-7: Unterschiede zwischen Abscher- und Auspressprozessen



Die Reinigung der Magnete ist der Teilschritt mit den größten Umweltwirkungen der Wiederverwendungskette. Der entscheidende Faktor hier ist die Nutzung von Siliziumcarbid, Der kleine ADP-Wert ist aufgrund einer Verbrennung von SiC bei der Abfallbehandlung zu erklären.

Abbildung 5-8: Aufteilung des Reinigungsprozesses



Für die Motordemontage können zusätzlich noch weitere Gutschriften erzielt werden, wenn das Recycling der Aluminium-, Kupfer- und Stahlkomponenten berücksichtigt wird.

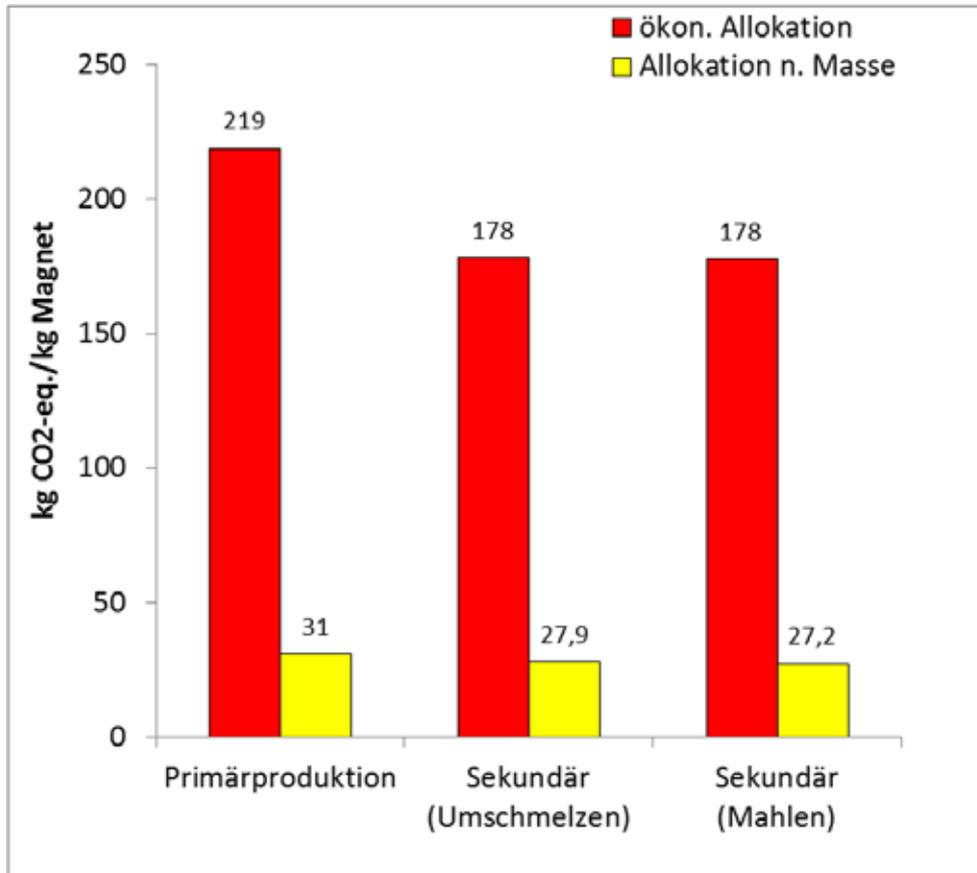
5.2. Route 2 – Werkstoffliches Recycling

Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, handelt es sich bei den Sekundärmagneten, die im Rahmen des werkstofflichen Recyclings hergestellt werden, um NdFeB-Magnete, die zu 70 % aus Primärmaterial bestehen und zu 30 % aus Recyclingmaterial. Die Remanenzen solcher Magnete liegen ca. 3 % niedriger als von Magneten aus 100 % Primärmaterial und es ist fraglich, ob für solche Magnete ein Absatzmarkt vorhanden ist. Auf den folgenden Abbildungen werden die Ergebnisse des werkstofflichen Recyclings in den berücksichtigten Wirkungskategorien dargestellt. Bei fast allen Kategorien erweisen sich die Unterschiede zwischen den beiden Sekundärvarianten (Umschmelzen bzw. Mahlen) als gering. Die Recyclingvarianten unterschieden sich aber jeweils deutlich von den Primärmagneten. Wie in den meisten Ergebnissen der Ökobilanzierung des SE-Recyclings dominiert bei der Bewertung mit einer ökonomischen Allokation der Einfluss des Dysprosiums durch die hohen Dysprosiumpreise. Aber auch bei einer Allokation nach Masse zeigen die Sekundärmagnete signifikant niedrigere Werte bei den Umweltwirkungen.

Da insbesondere die Prozessverluste (Schleifen der Magnete etc.) sowohl der Primär- wie auch der Sekundärproduktion vertraulich sind, kann keine Aussage darüber getroffen werden, welche Mengen an Sekundärmagneten pro Menge gebrauchter Magnete hergestellt werden können. Ebenso liegen keine Informationen darüber vor, wie hoch die jeweiligen Beiträge aus dem Einsatz von Hilfsstoffen und Energie bei der Primär- bzw. der Sekundärproduktion sind. Insgesamt dominieren aber die Seltenen Erden Dysprosium und Neodym die Ergebnisse insbesondere bei der ökonomischen Allokation in allen Wirkungskategorien.

5.2.1. Treibhauspotenzial (GWP)

Abbildung 5-9: Werkstoffliches Recycling: Primärproduktion vs. Sekundärproduktion (GWP)

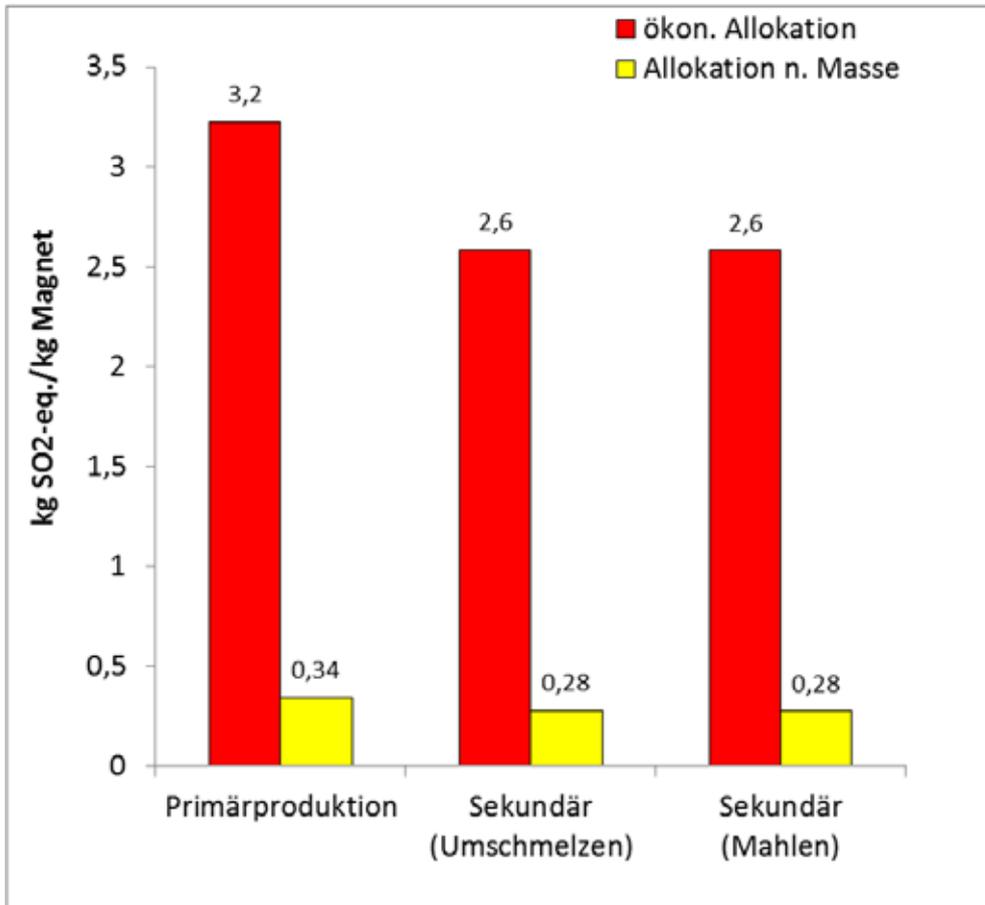


Die obige Abbildung zeigt die Ergebnisse des werkstofflichen Recyclings (Route 2) für die Wirkungskategorie Treibhausgaspotential. Sowohl im Falle der ökonomischen Allokation (der Gutschrift für die Primärherstellung der Seltenen Erden) als auch im Falle der (konservativeren) Massenallokation weist das werkstoffliche Recycling Vorteile gegenüber der Primärherstellung auf. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die hergestellten „Sekundärmagnete“ aus technischen Gründen immer noch zu 70% aus Primärmaterial hergestellt werden.

In den nachfolgenden Abbildungen zeigen sich auch für die Wirkungskategorien AP, EP und POCP klare Vorteile des werkstofflichen Recyclings gegenüber der Primärherstellung – sowohl nach ökonomischer als auch nach Massenallokation für die Gutschriften der Primärproduktion der Seltenen Erden.

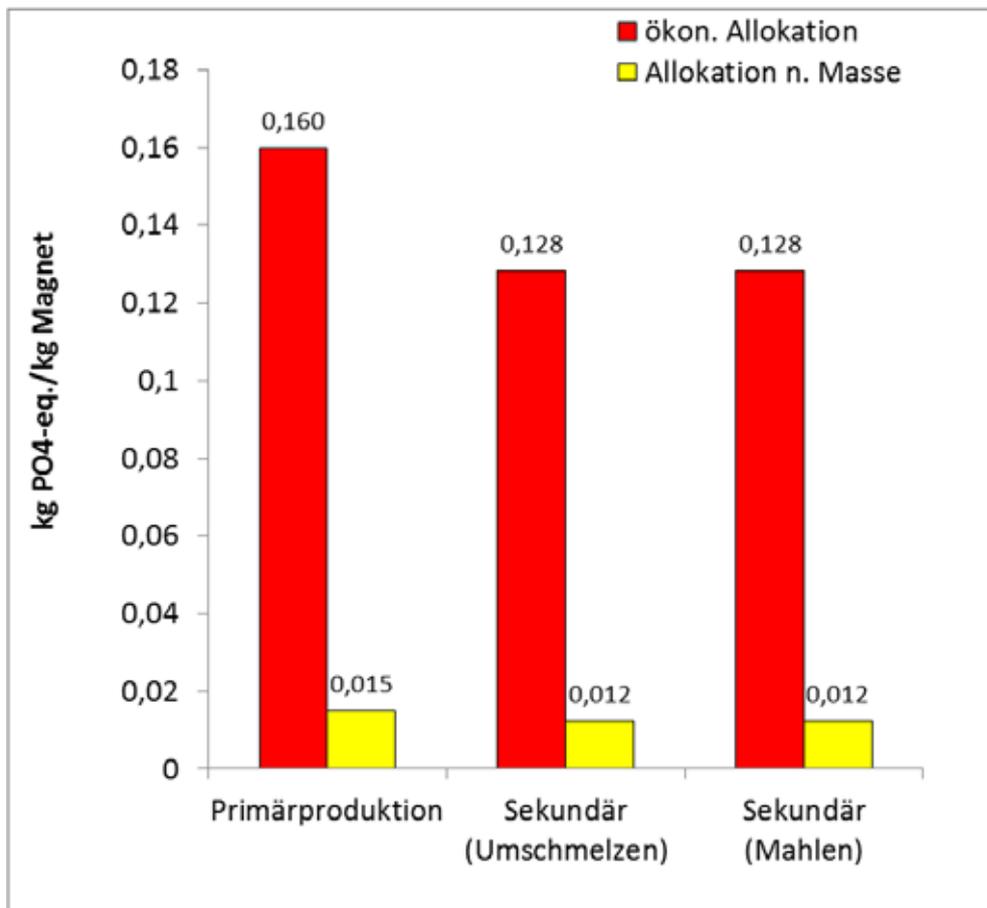
5.2.2. Versauerungspotenzial (AP)

Abbildung 5-10: Werkstoffliches Recycling: Primärproduktion vs. Sekundärproduktion (AP)



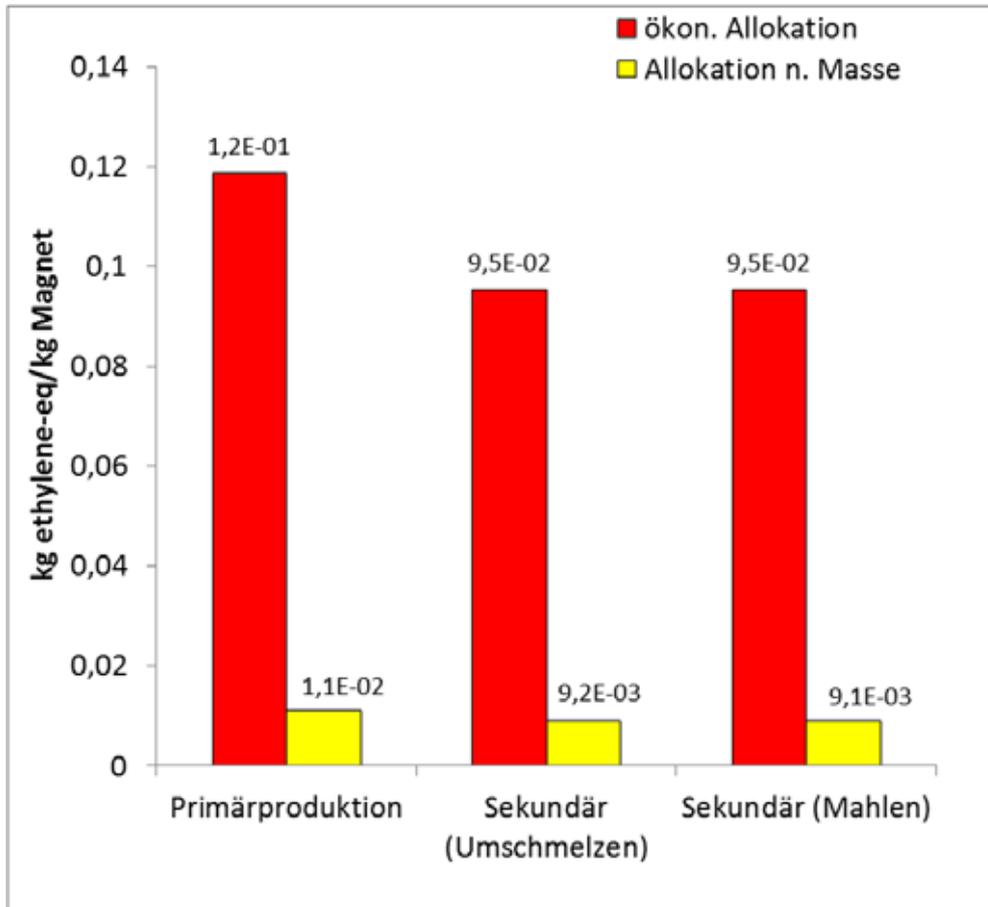
5.2.3. Eutrophierungspotenzial (EP)

Abbildung 5-11: Werkstoffliches Recycling: Primärproduktion vs. Sekundärproduktion (EP)



5.2.4. Photochemisches Ozonbildungspotenzial (POCP)

Abbildung 5-12: Werkstoffliches Recycling: Primärproduktion vs. Sekundärproduktion (POCP)



5.2.5. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP, elem)

Bei den Werten für den elementaren Ressourcenverbrauch (siehe die folgenden Abbildungen für ADP, elementar, reserve base und ADP, elementar, ultimate reserve) zeigt sich, dass die Werte sowohl bei der ökonomischen als auch bei der Massenallokation sehr stark dominiert werden vom Einfluss der Seltenen Erden, die anderen Beiträge spielen praktisch keine Rolle.

Abbildung 5-13: Werkstoffliches Recycling: Primärproduktion vs. Sekundärproduktion (ADP, elem. reserve base)

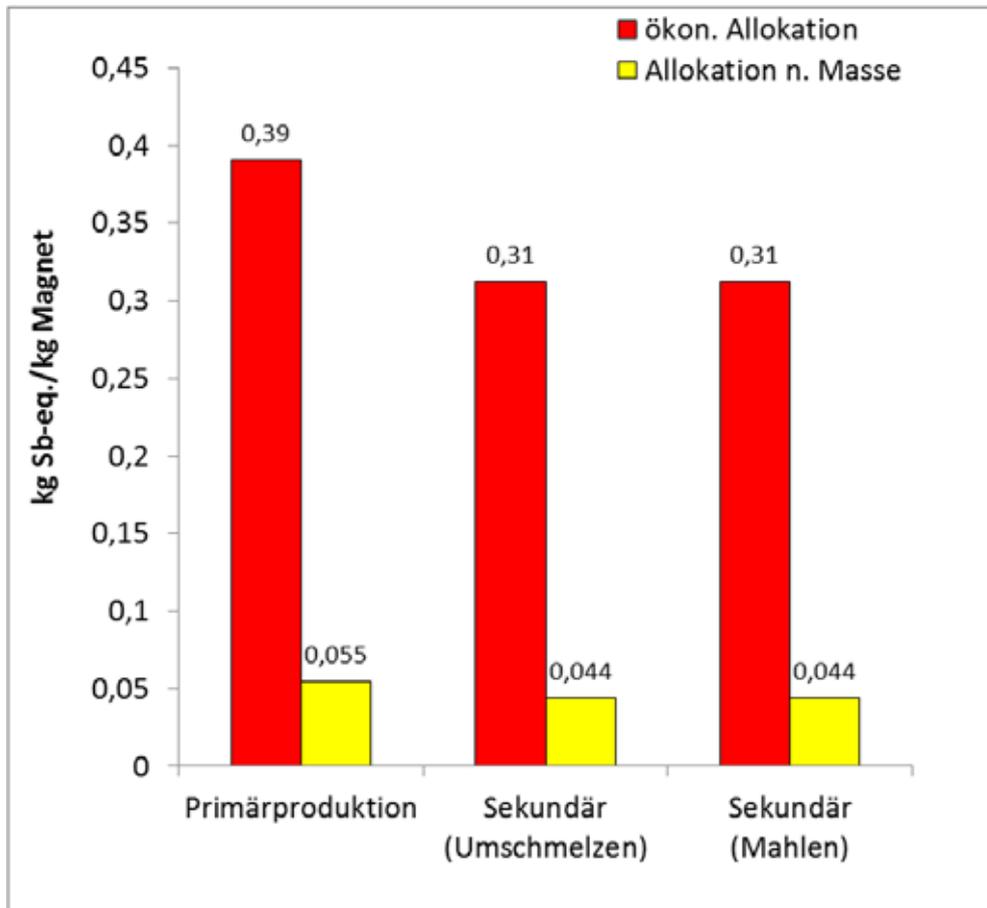
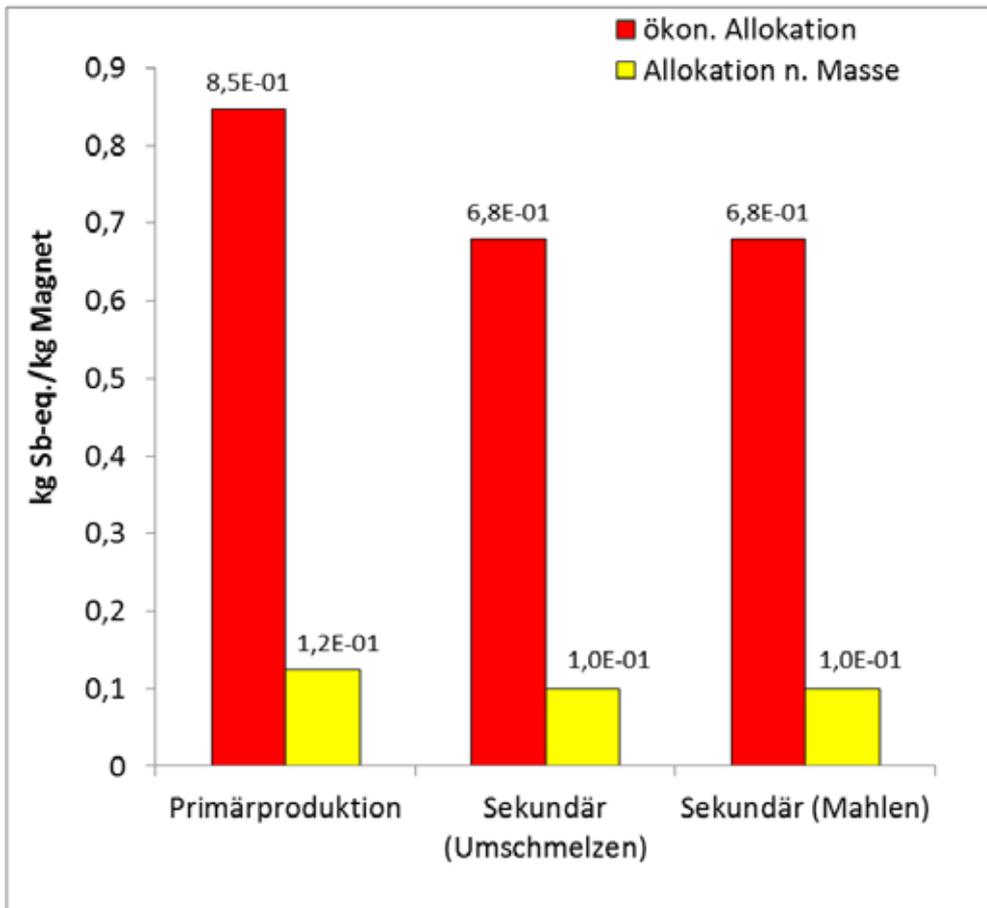


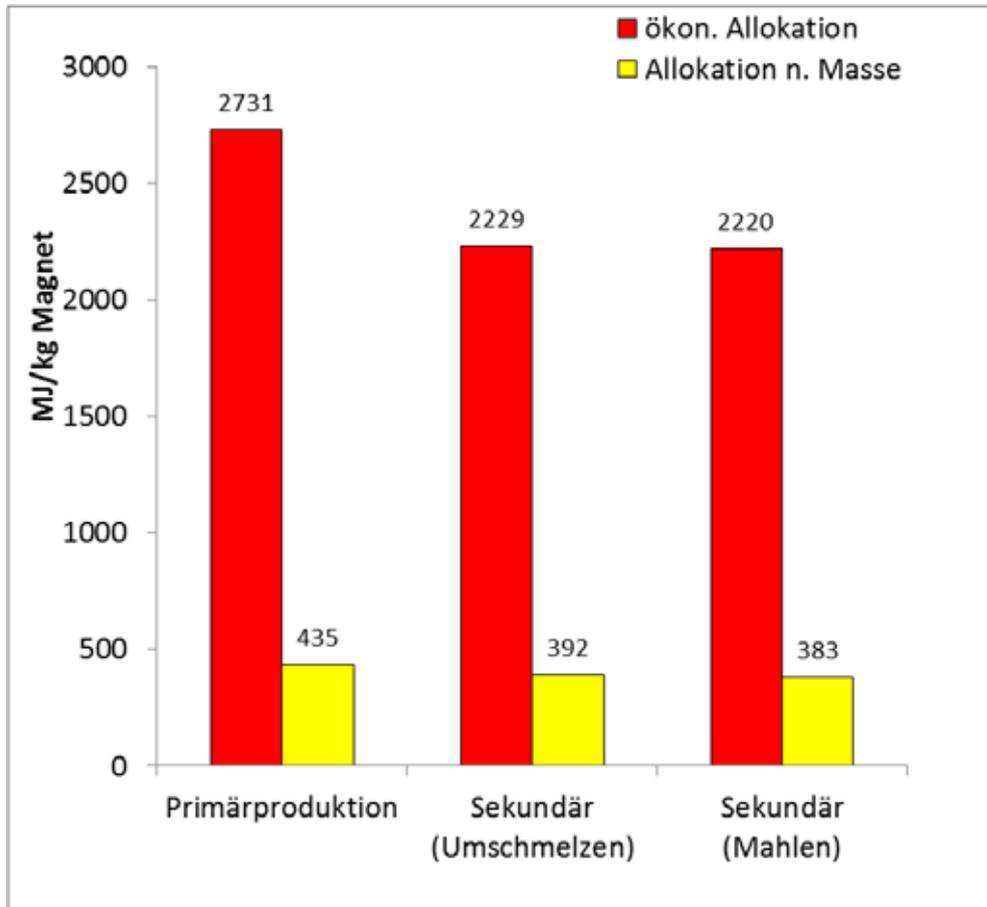
Abbildung 5-14: Werkstoffliches Recycling: Primärproduktion vs. Sekundärproduktion (ADP, elem. ultimate reserve)



Die folgende Abbildung zeigt schließlich die Ergebnisse für die Wirkungskategorie KEA; n.e. für das werkstoffliche Recycling. Auch für diese Wirkungskategorie zeigen sich sowohl nach der ökonomischen Allokation als auch nach der Massenallokation deutliche Vorteile für das werkstoffliche Recycling.

5.2.6. Kumulierter Energieaufwand, KEA, n.e. (CED, total)

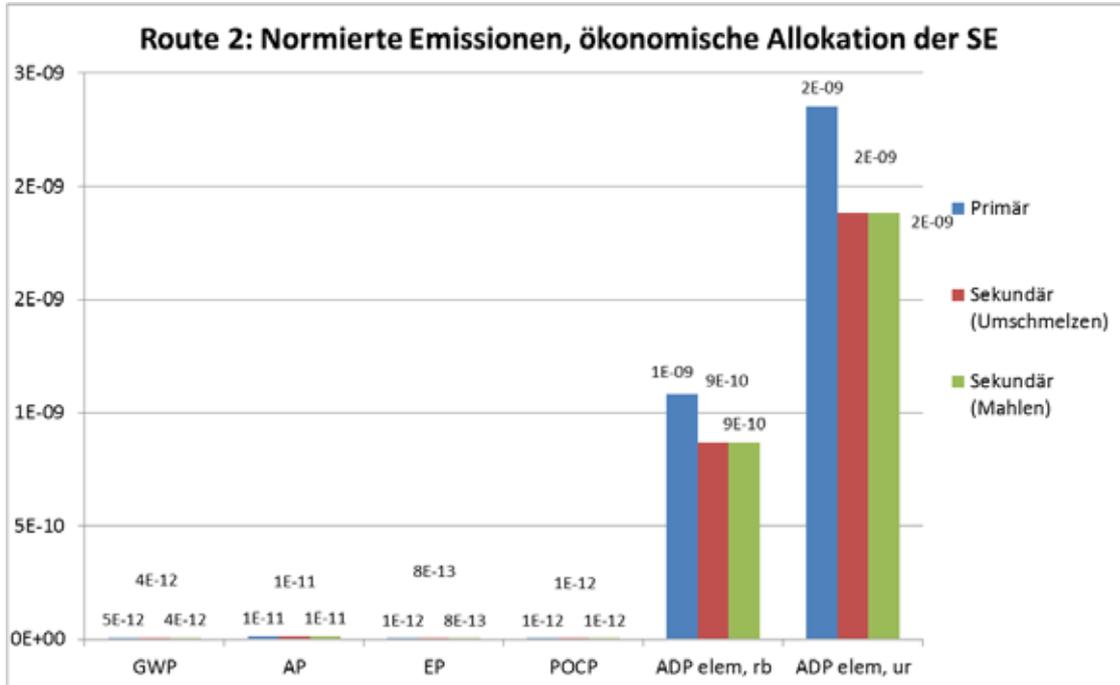
Abbildung 5-15: Werkstoffliches Recycling: Primärproduktion vs. Sekundärproduktion (CED, total)



5.2.7. Normierte Ergebnisse

Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Wirkungskategorien in einer normierten Darstellung. Die größten Beiträge liefern $ADP_{elem, rb}$ und $ADP_{elem, ur}$. Auch hier zeigt sich die Dominanz der Seltenen Erden Dysprosium und Neodym in den Ergebnissen.

Abbildung 5-16: Werkstoffliches Recycling: Primärproduktion vs. Sekundärproduktion (CED, total)



5.3. Route 3 – Rohstoffliches Recycling

Auf den folgenden Abbildungen werden die Ergebnisse des rohstofflichen Recyclings in den berücksichtigten Wirkungskategorien dargestellt. Hierbei werden die jeweiligen potenziellen Wirkungen aus dem Einsatz von Hilfsstoffen und Energie, aus der Abwasserbehandlung und den direkten Emissionen gezeigt. Daneben sind die jeweiligen Gutschriften als negative Beiträge sowie der Gesamtnettowert der Recyclingverfahren im Vergleich zur Primärherstellung aufgeführt.

Auch hier zeigt sich, dass bei der ökonomischen Allokation vor allem die Gutschrift für Dysprosium in allen Wirkungskategorien das Ergebnis dominiert. Die Gutschrift für Neodym ist deutlich geringer und die übrigen Beiträge durch Hilfsstoffe, Energie usw. treten gegenüber den SE stark zurück.

Bei einer Allokation nach Masse stehen die Gutschriften für Nd und Dy jeweils etwa im Verhältnis 2:1, was ihrem Verhältnis im primären Magnetmaterial entspricht.

Da eine Allokation ökonomisch vs. Masse nur für Nd und Dy gerechnet wurde, sind die Ergebnisse der übrigen Beiträge in beiden Allokationsvarianten jeweils identisch.

5.3.1. Treibhauspotenzial (GWP)

Die Beiträge zum GWP aus der Produktion der Hilfsstoffe, aus dem Einsatz von Strom und aus den direkten Emissionen entsprechen bei der Allokation nach etwa der Hälfte der verrechneten Gutschriften. Das Verfahren 1, nach welchem ein Mischkonzentrat der Seltenen Erden resultiert, zeigt einen höheren Wert beim GWP für den Hilfsstoffeinsatz als das Verfahren 3, welches reines Neodymoxid und reines Dysprosiumoxid liefert. Alle Ergebnisse zeigen für den GWP eine deutliche ökologische Vorteilhaftigkeit im Vergleich zur Primärroute. Im Falle der ökonomischen Allokation sind die Nettoergebnisse der Wirkungsabschätzung im Vergleich zur Massenallokation vor allem aufgrund der hohen Gutschrift für Dysprosiumoxid absolut noch deutlicher.

Abbildung 5-17: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (GWP), Allokation nach Masse

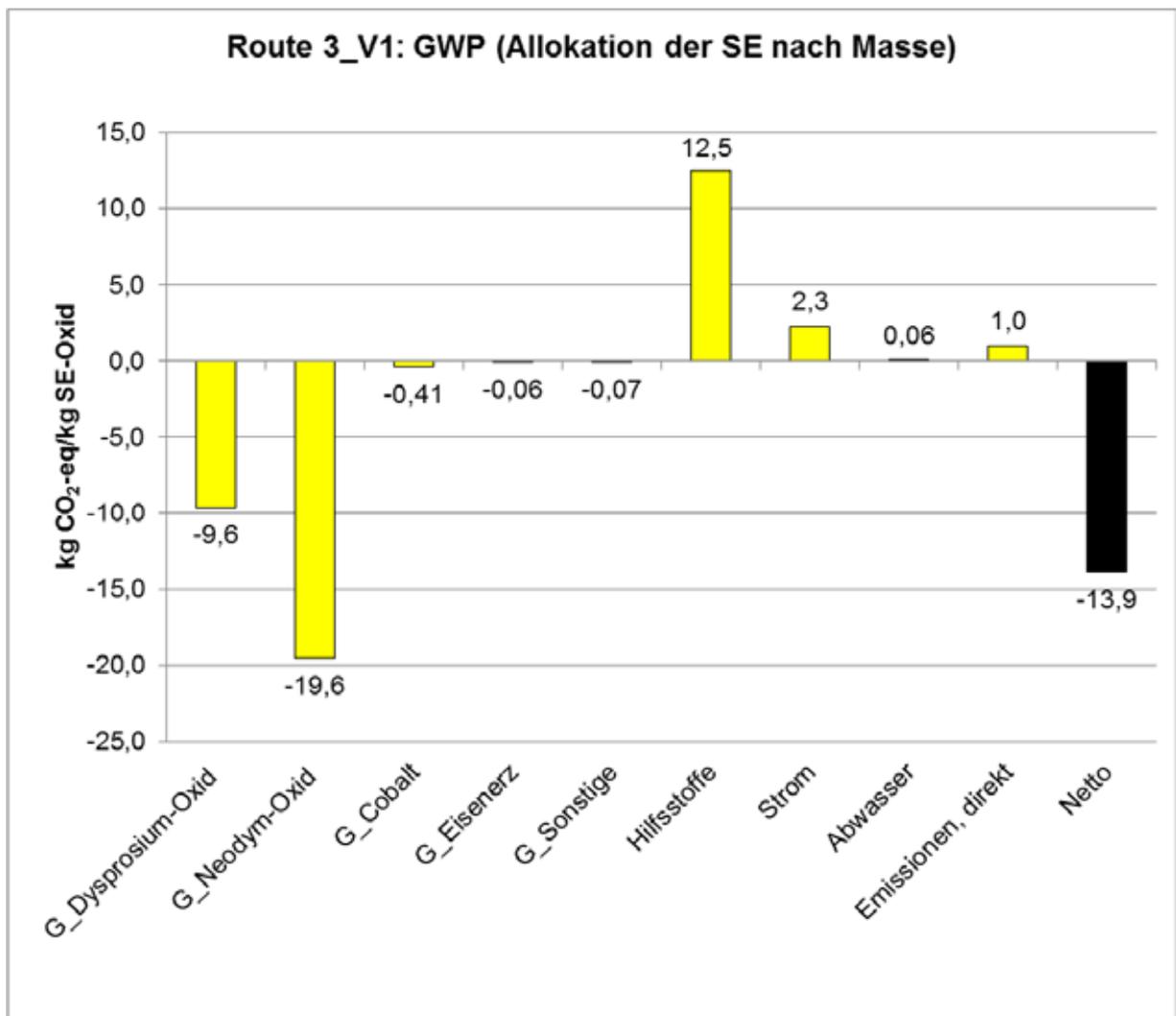


Abbildung 5-18: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (GWP), ökonomische Allokation

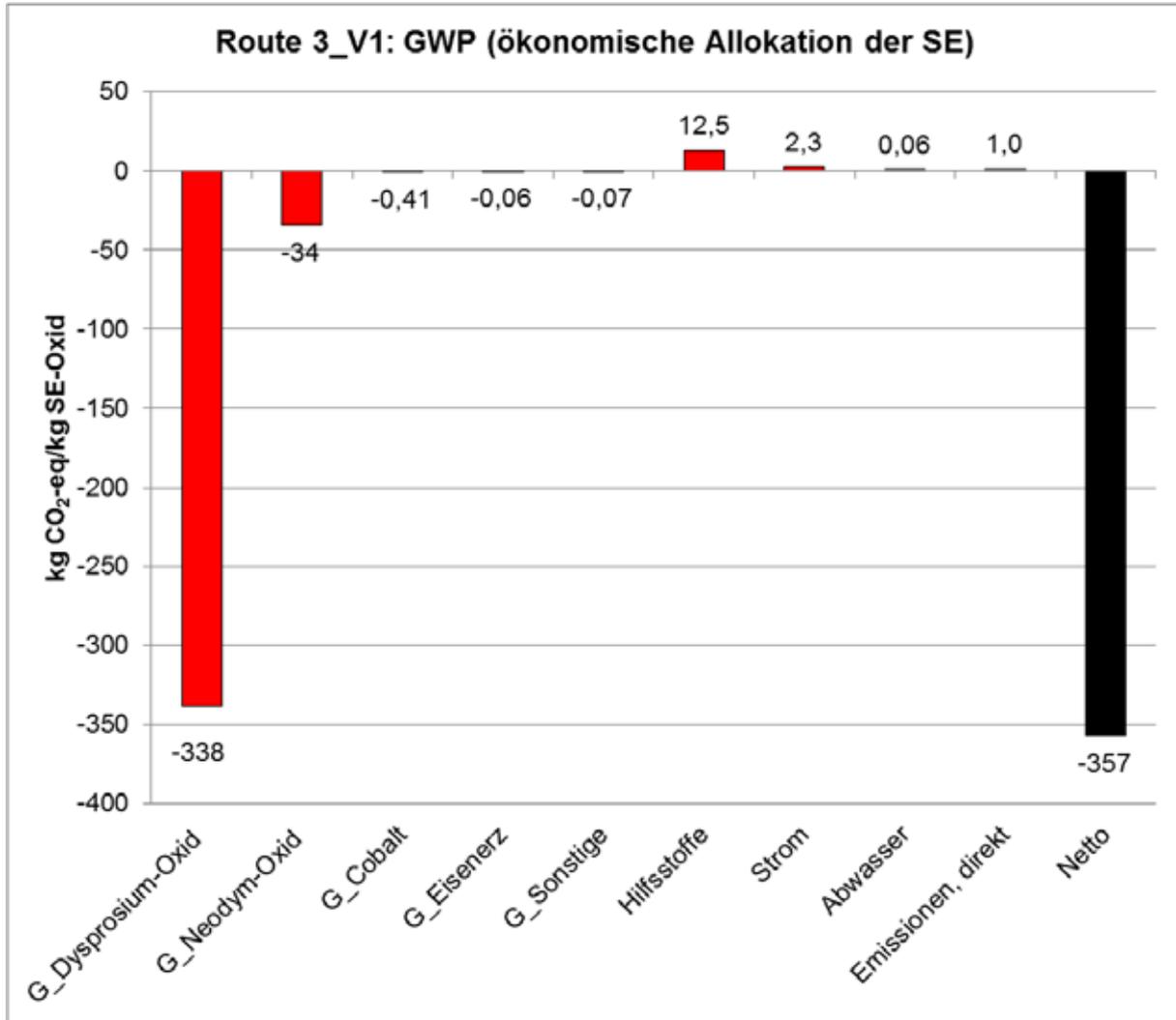


Abbildung 5-19: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (GWP), Allokation nach Masse

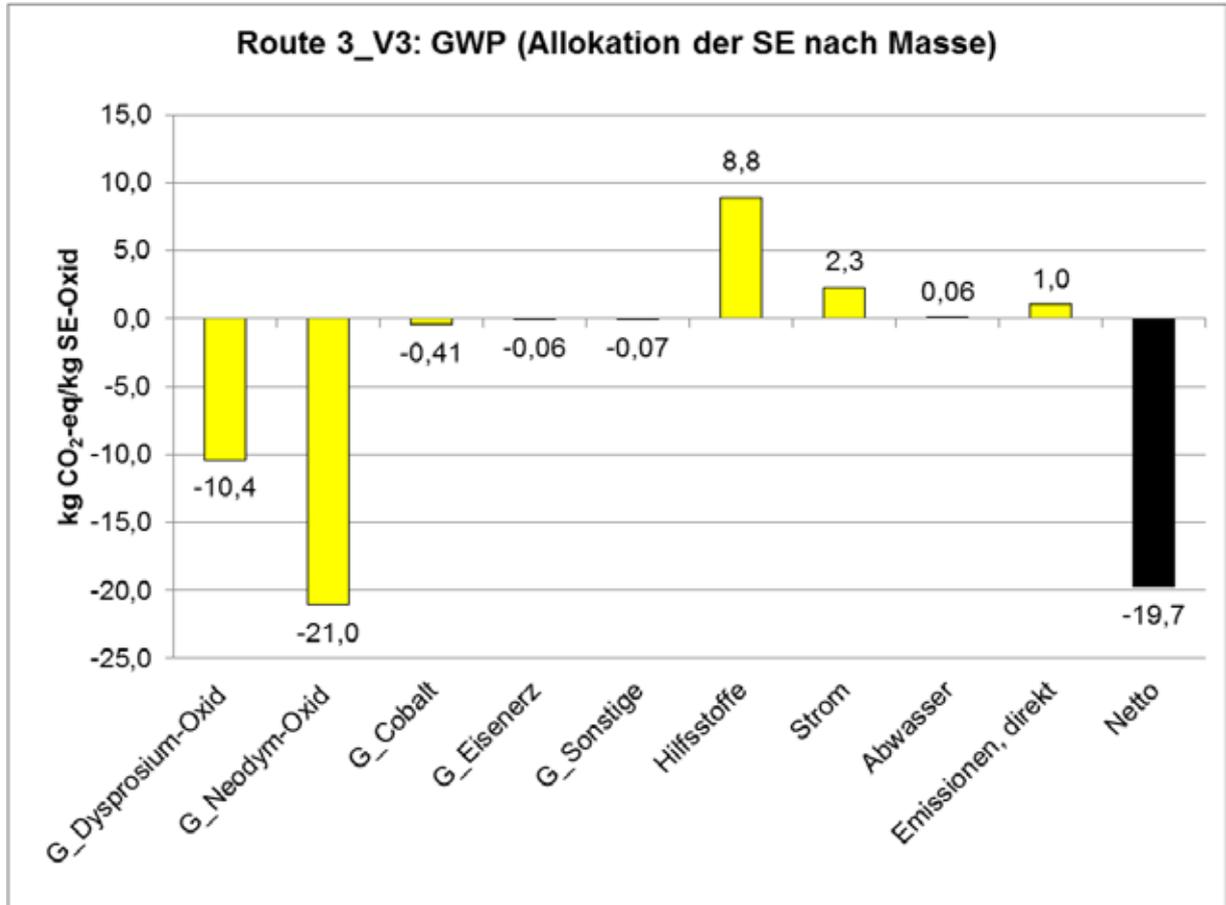
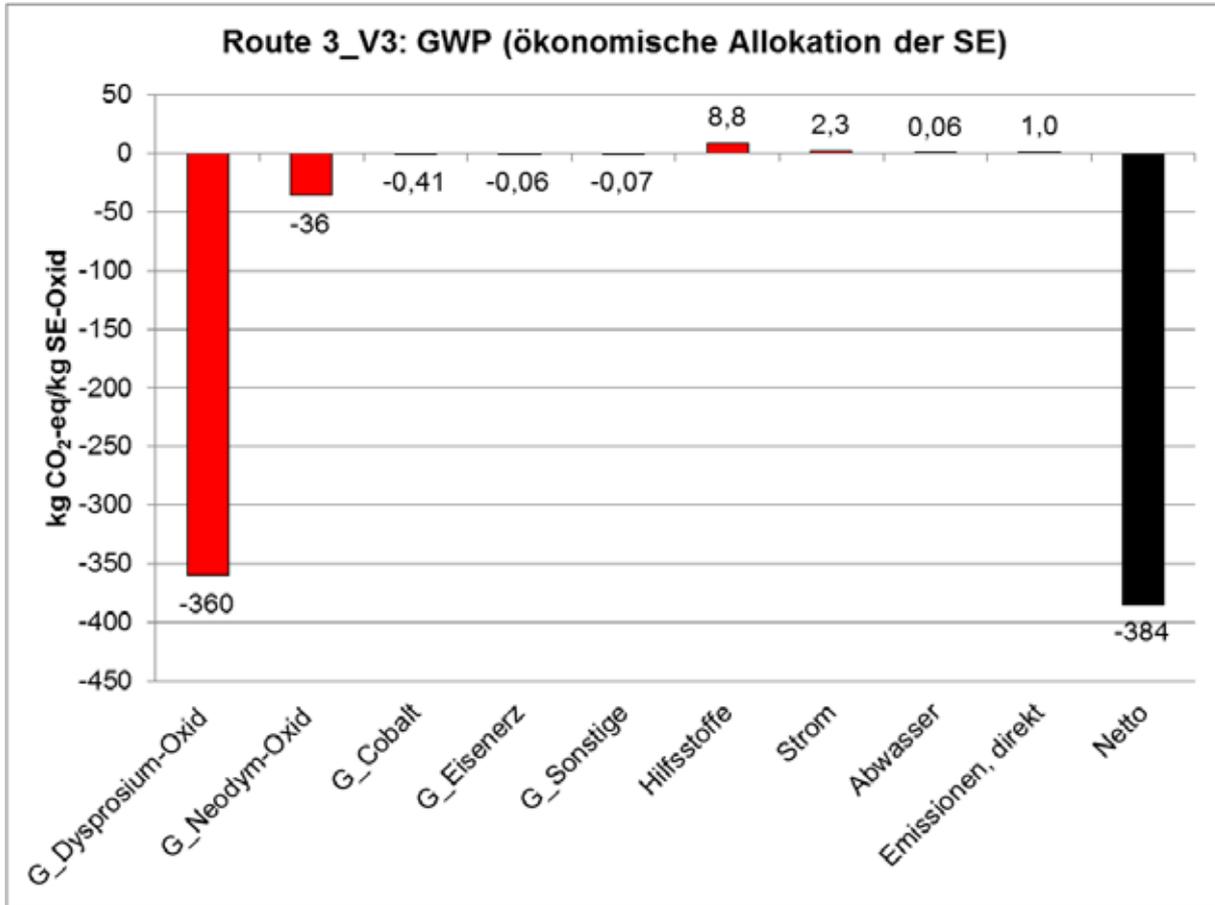


Abbildung 5-20: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (GWP), ökonomische Allokation



Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die GWP-Werte für die einzelnen Hilfsstoffe, die in den Verfahren 1 und 3 eingesetzt werden. Die größten Beiträge stammen vom Einsatz des Wasserstoffperoxids, Natronlauge, Salzsäure und Oxalsäure (enthalten in „Chemikalien, organisch“). Dagegen sind die Beiträge für die Hilfsstoffe, die spezifisch in der Solventextraktion eingesetzt werden, gering.

Im Verfahren 1 wird das Treibhauspotenzial zu 93% von CO₂ und zu 6% von Methan bestimmt, im Verfahren 3 zu 93% von CO₂ und zu 6% von Methan.

Abbildung 5-21: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (GWP), Beiträge der Hilfsstoffe

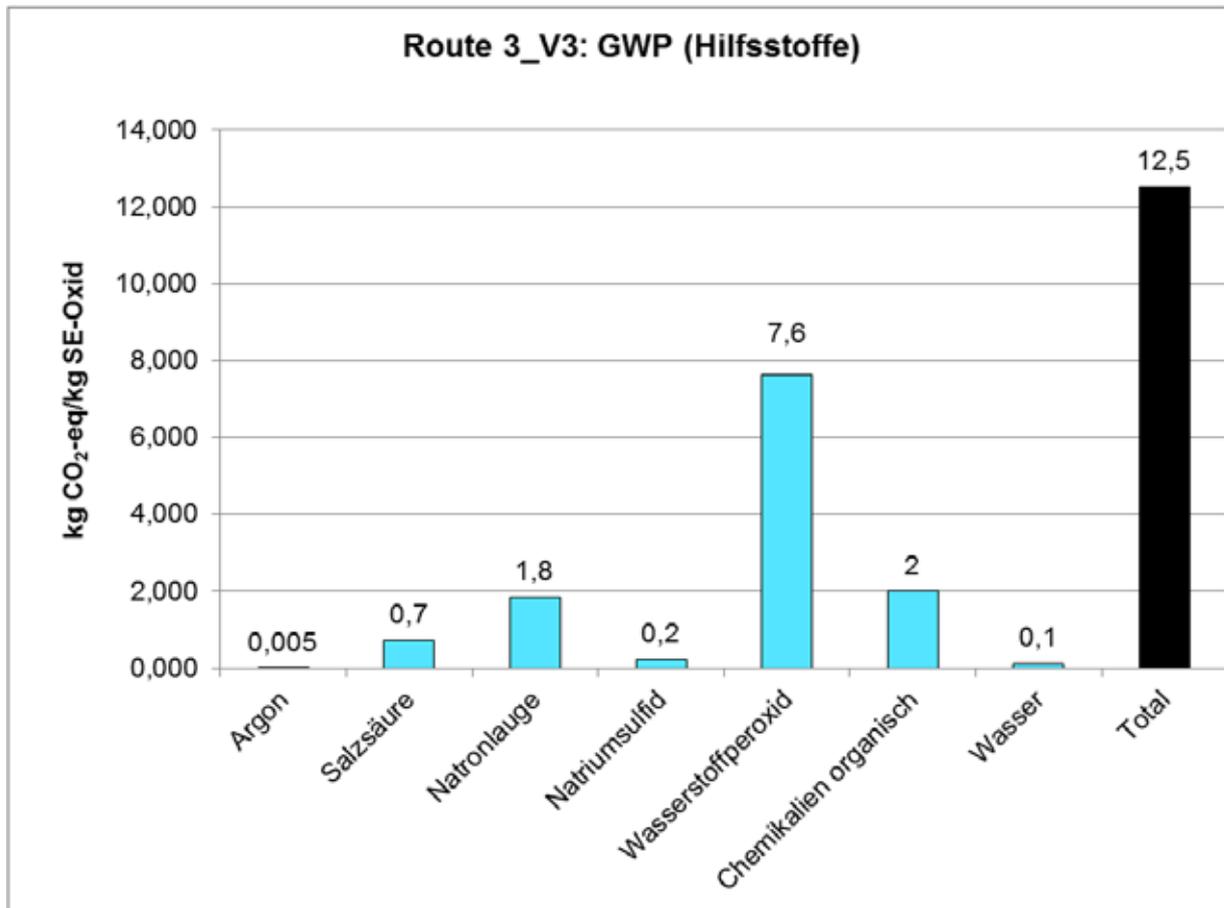
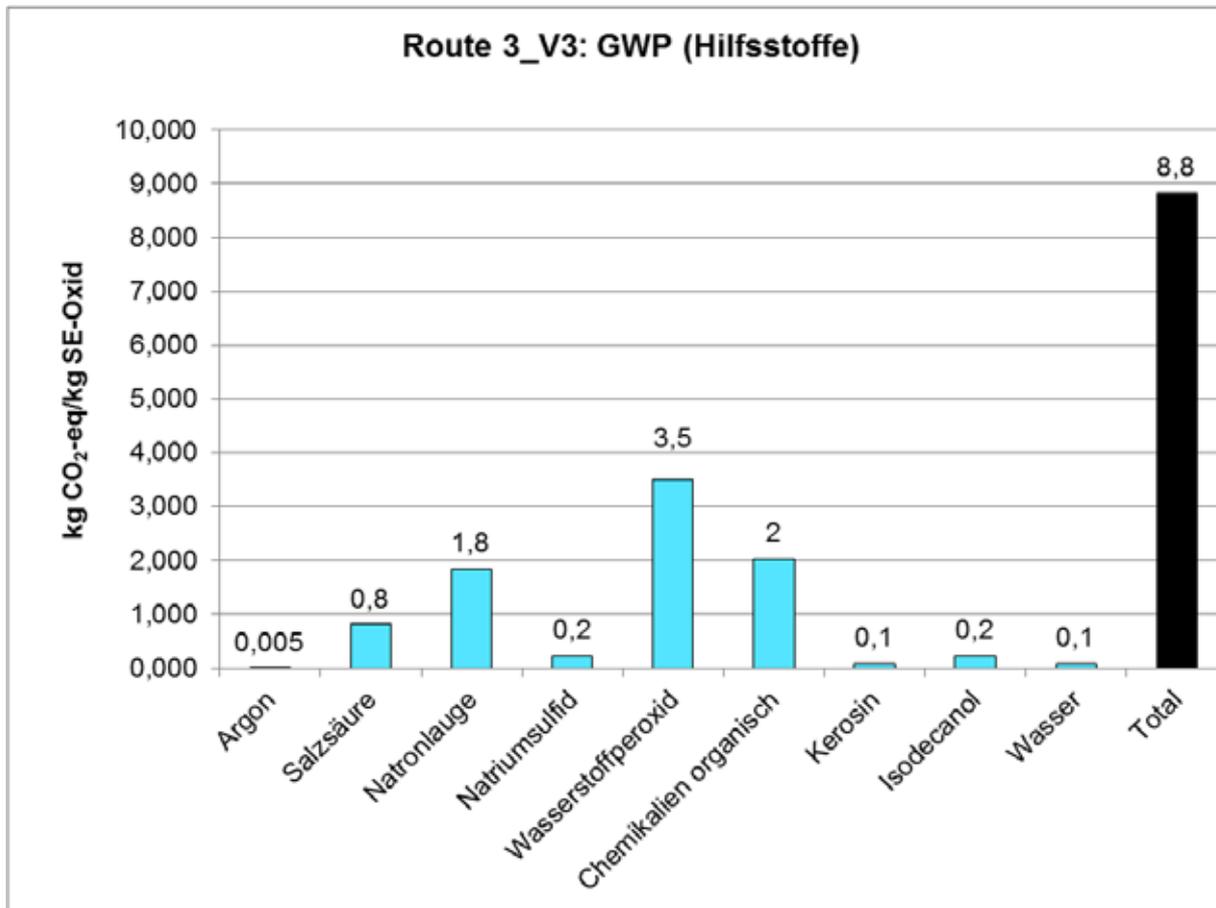


Abbildung 5-22: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (GWP), Beiträge der Hilfsstoffe



5.3.2. Versauerungspotenzial (AP)

Verfahren 1 und 3 unterscheiden sich kaum in Bezug auf das AP. Der Beitrag der Hilfsstoffe ist in Relation zu den anderen Beiträgen geringer als bei anderen Wirkungskategorien.

Die größten Beiträge stammen auch hier vom Einsatz des Wasserstoffperoxids, Natronlauge, Salzsäure und Oxalsäure (enthalten in „Chemikalien, organisch“).

Im Verfahren 1 wird das Versauerungspotenzial zu 65% von SO₂ und zu 29% von NO_x bestimmt, im Verfahren 3 wird das Versauerungspotenzial zu 70% von SO₂ und zu 25% von NO_x.

Abbildung 5-23: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (AP), Allokation nach Masse

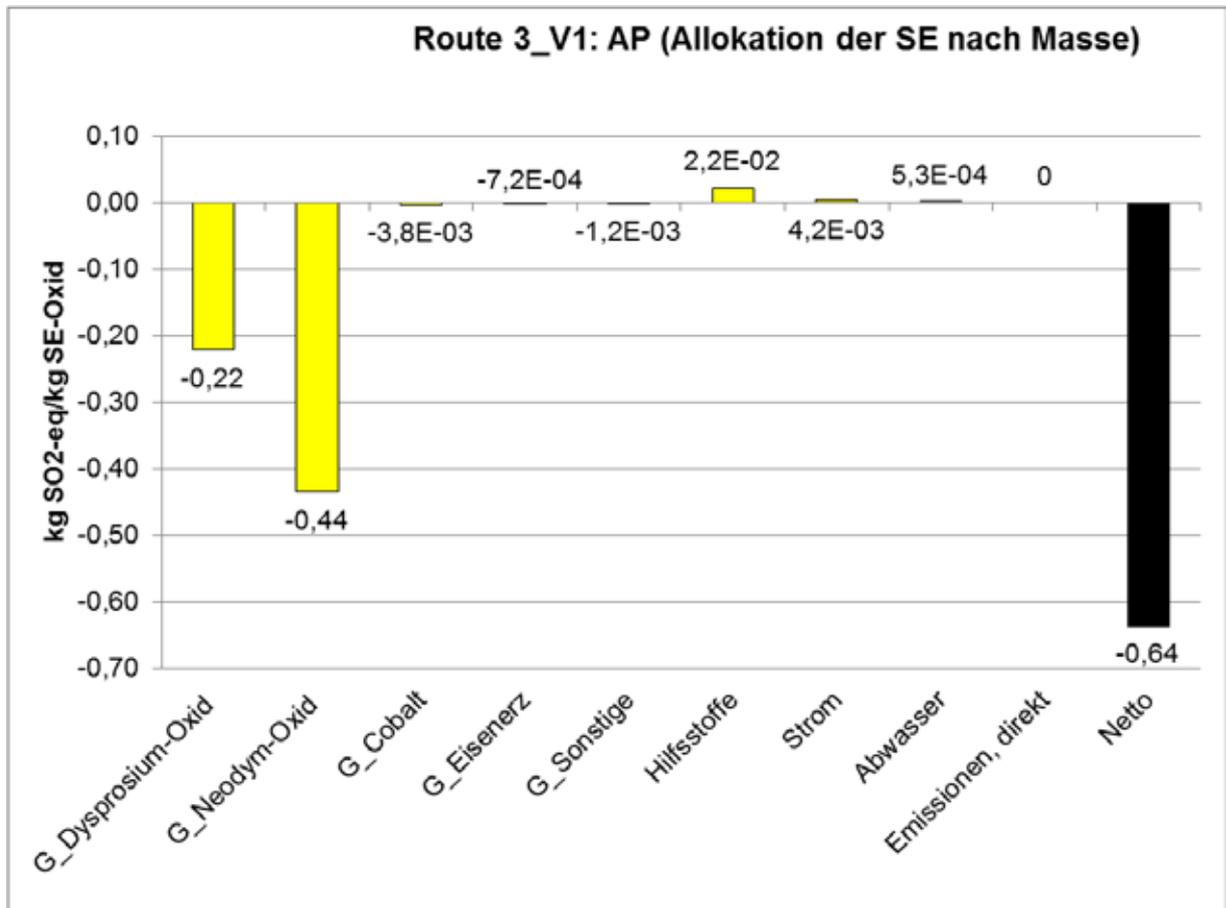


Abbildung 5-24: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (AP), ökonomische Allokation

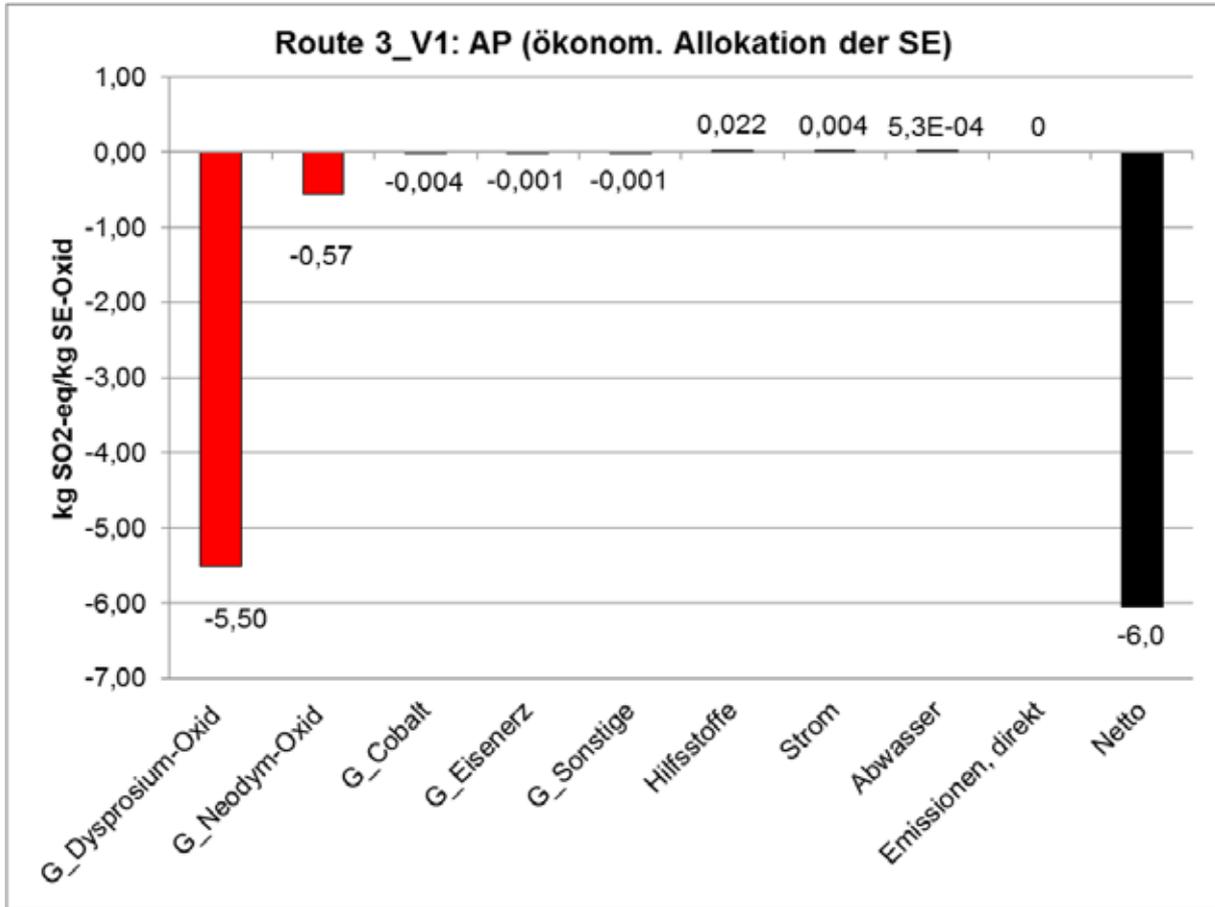


Abbildung 5-25: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (AP), Allokation nach Masse

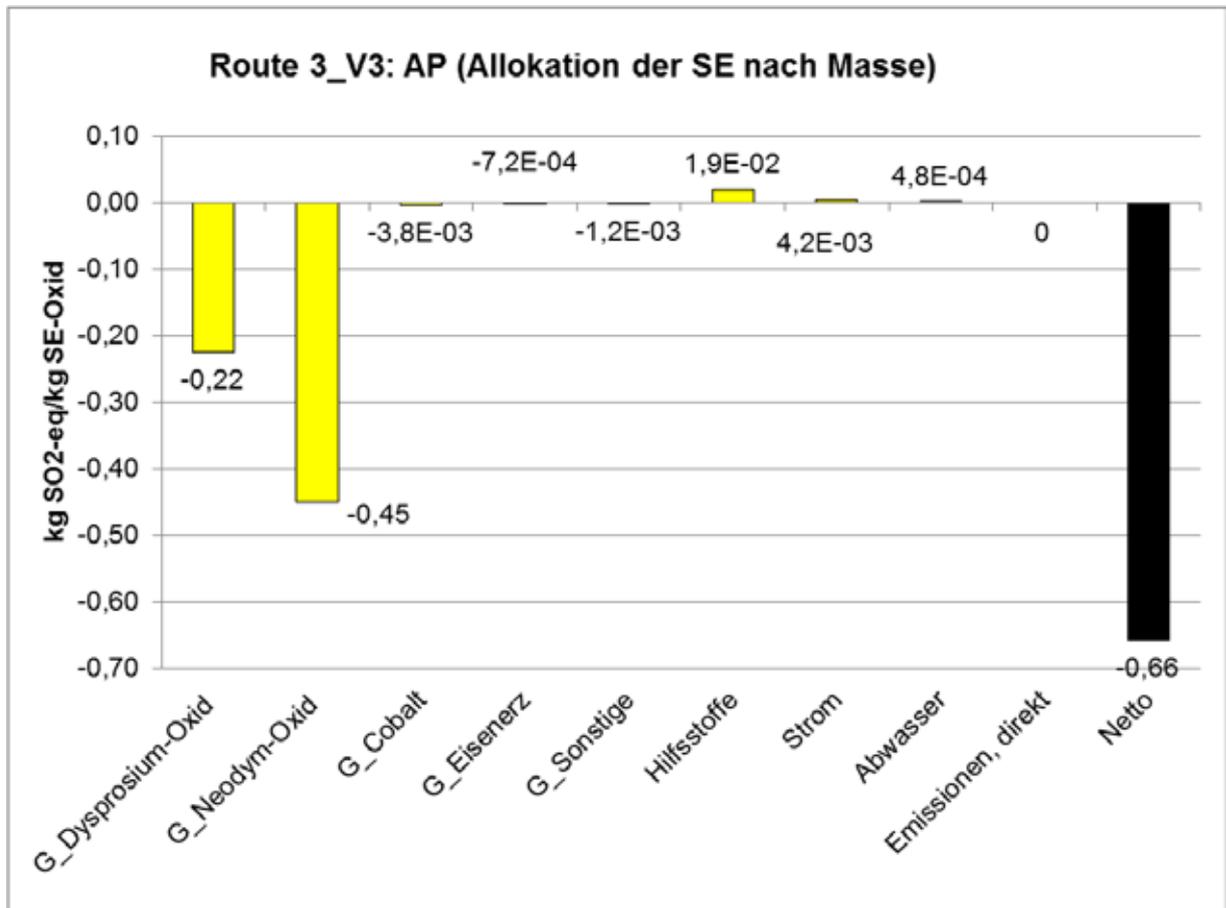
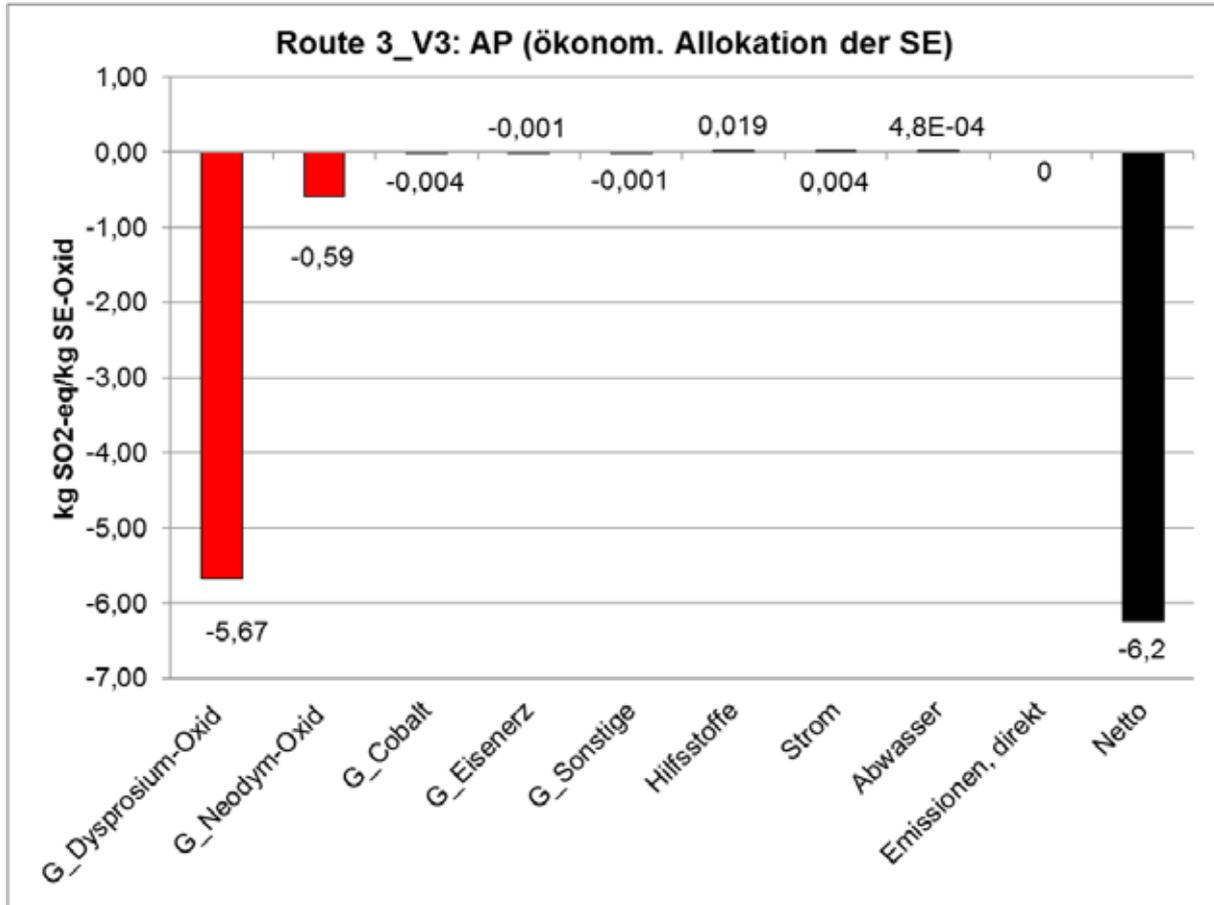


Abbildung 5-26: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (AP), ökonomische Allokation



5.3.3. Eutrophierungspotenzial (EP)

Im Gegensatz zum GWP und AP gibt es beim EP im Fall der Massenallokation auch einen merklichen Beitrag aus der Kobaltgutschrift. Der Beitrag der Hilfsstoffe macht etwa ein Fünftel des Nettobetragtes aus. Die größten Beiträge stammen auch hier vom Einsatz des Wasserstoffperoxids, Natronlauge, Salzsäure und Oxalsäure (enthalten in „Chemikalien, organisch“).

Verfahren 1 und 3 unterscheiden sich in der Summe kaum in Bezug auf das EP.

Im Verfahren 1 wird das Eutrophierungspotenzial zu 43% von NO_x, zu 23% von Phosphat und zu 8% von Phosphor bestimmt, im Verfahren 3 zu 28% von NO_x, zu 36% von Phosphat und zu 10% von Phosphor.

Abbildung 5-27: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (EP), Allokation nach Masse

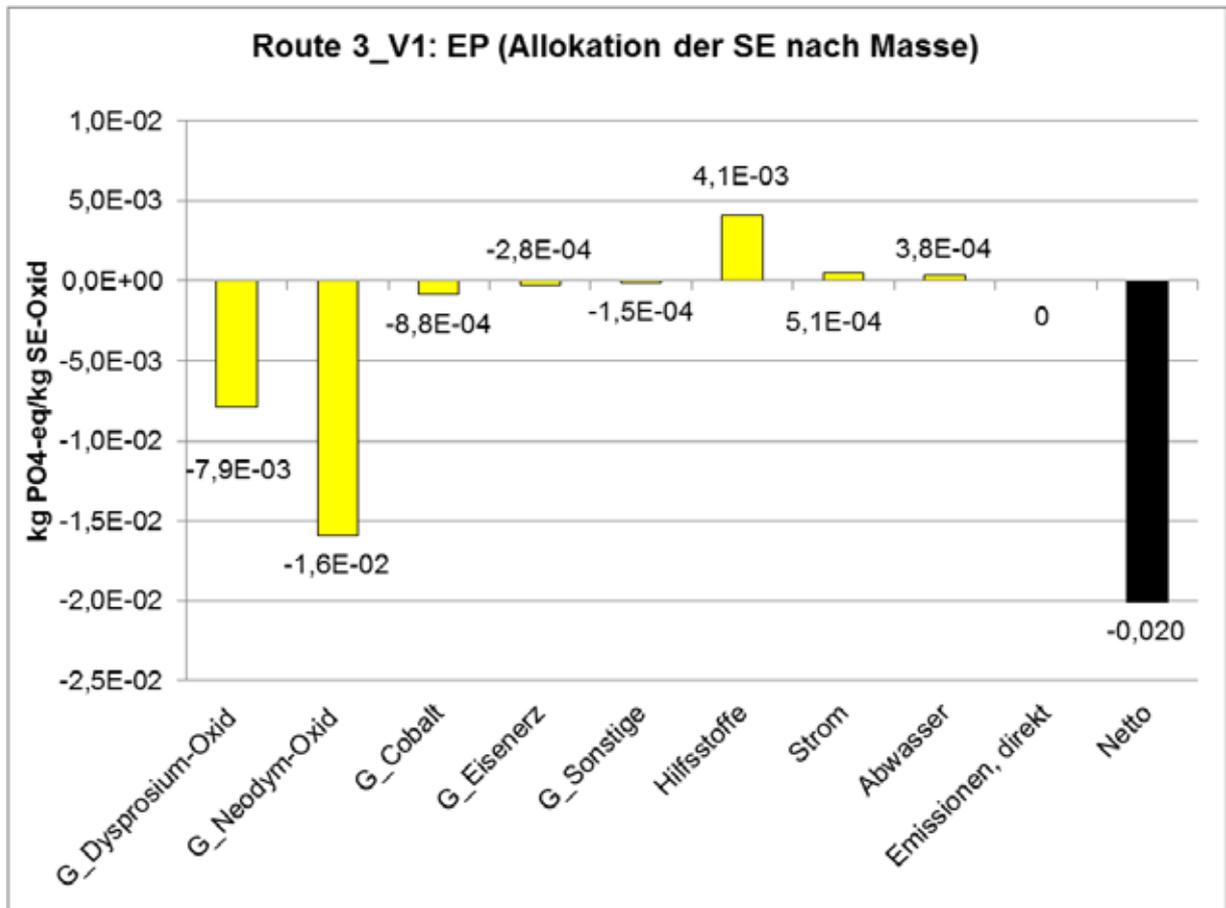


Abbildung 5-28: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (EP), ökonomische Allokation

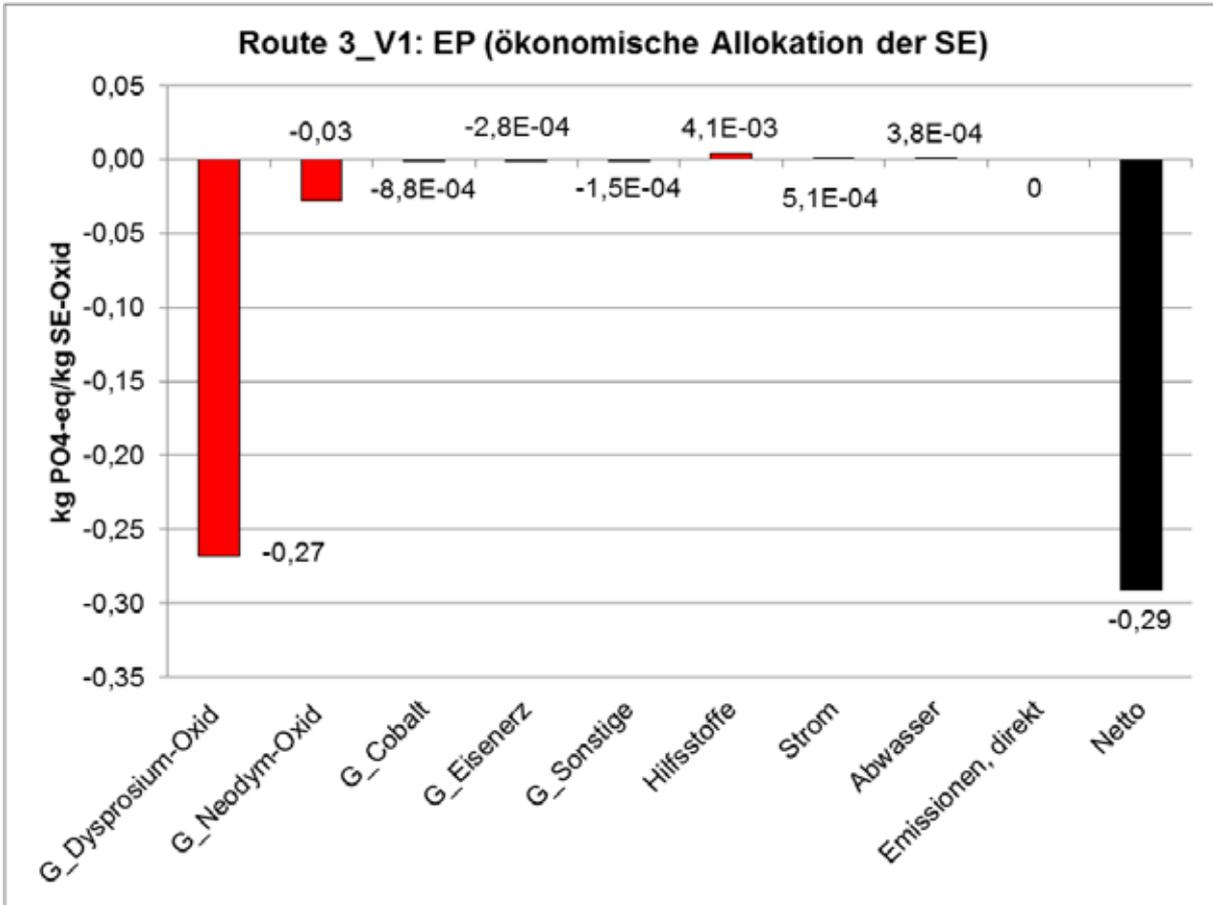


Abbildung 5-29: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (EP), Allokation nach Masse

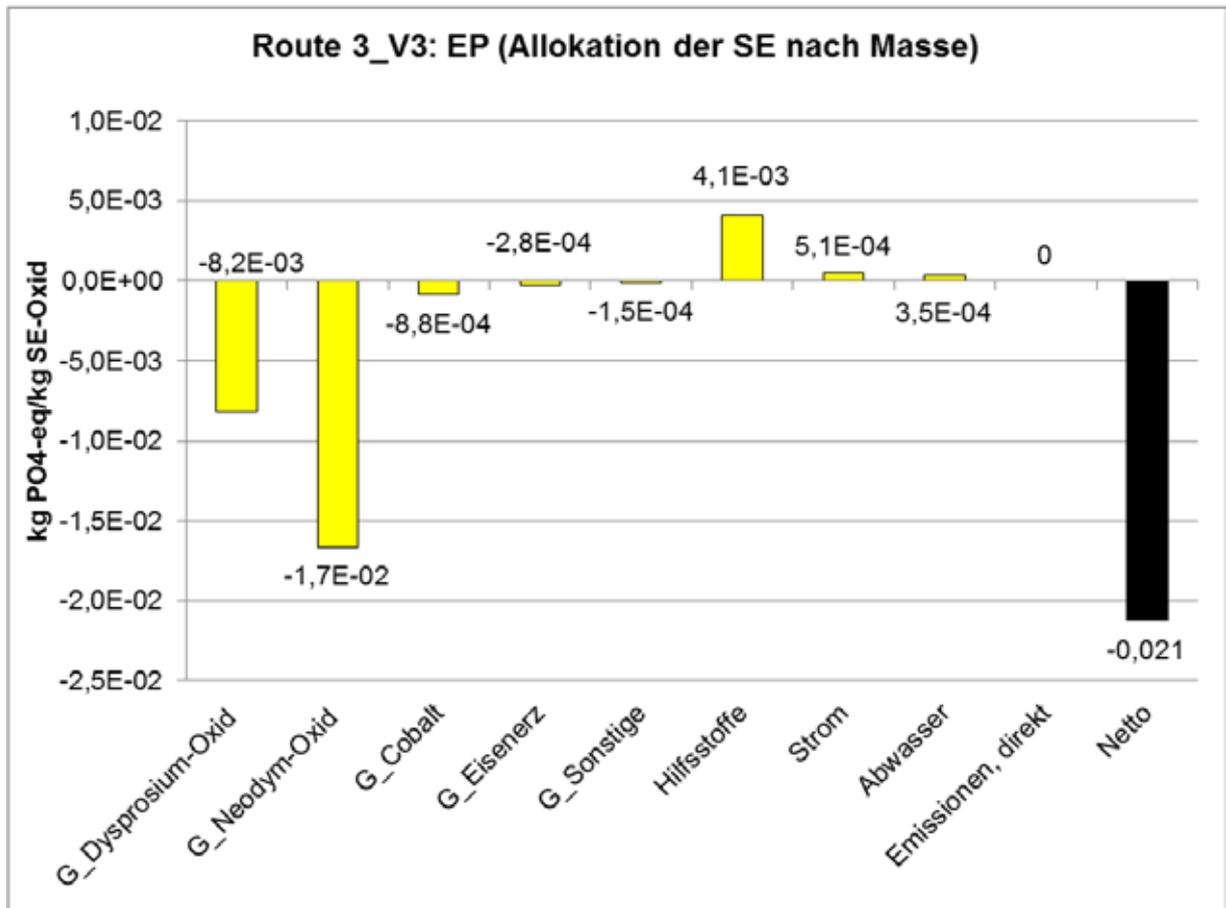
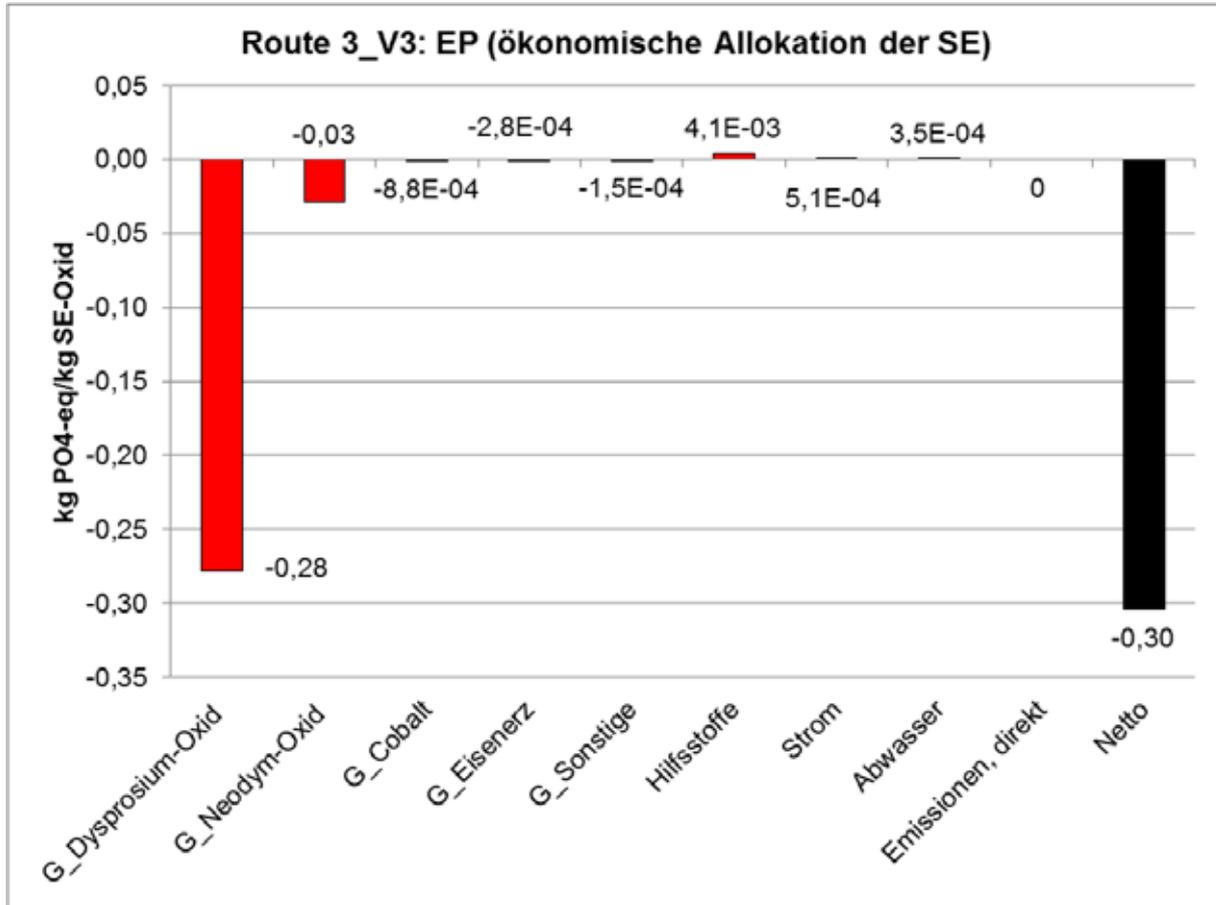


Abbildung 5-30: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (EP), ökonomische Allokation



5.3.4. Photochemisches Ozonbildungspotenzial (POCP)

Wie beim EP gibt es auch beim POCP bei den Werten mit Massenallokation einen merklichen Beitrag aus der Kobaltgutschrift. Der Beitrag der Hilfsstoffe macht etwa ein Drittel des Nettobetrag aus. Die größten Beiträge stammen auch hier vom Einsatz des Wasserstoffperoxids, Natronlauge, Salzsäure und Oxalsäure (enthalten in „Chemikalien, organisch“).

Verfahren 1 und 3 unterscheiden sich in der Summe kaum in Bezug auf das POCP.

Im Verfahren 1 wird das Photochemische Ozonbildungspotenzial zu 55% von NMVOC, zu 19% von Schwefeldioxid, zu 12 von NO_x und zu 7% von Kohlenmonoxid bestimmt, im Verfahren 3 zu 32% von NMVOC, zu 21% von Schwefeldioxid, zu 10 von NO_x und zu 7% von Kohlenmonoxid.

Abbildung 5-31: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (POCP), Allokation nach Masse

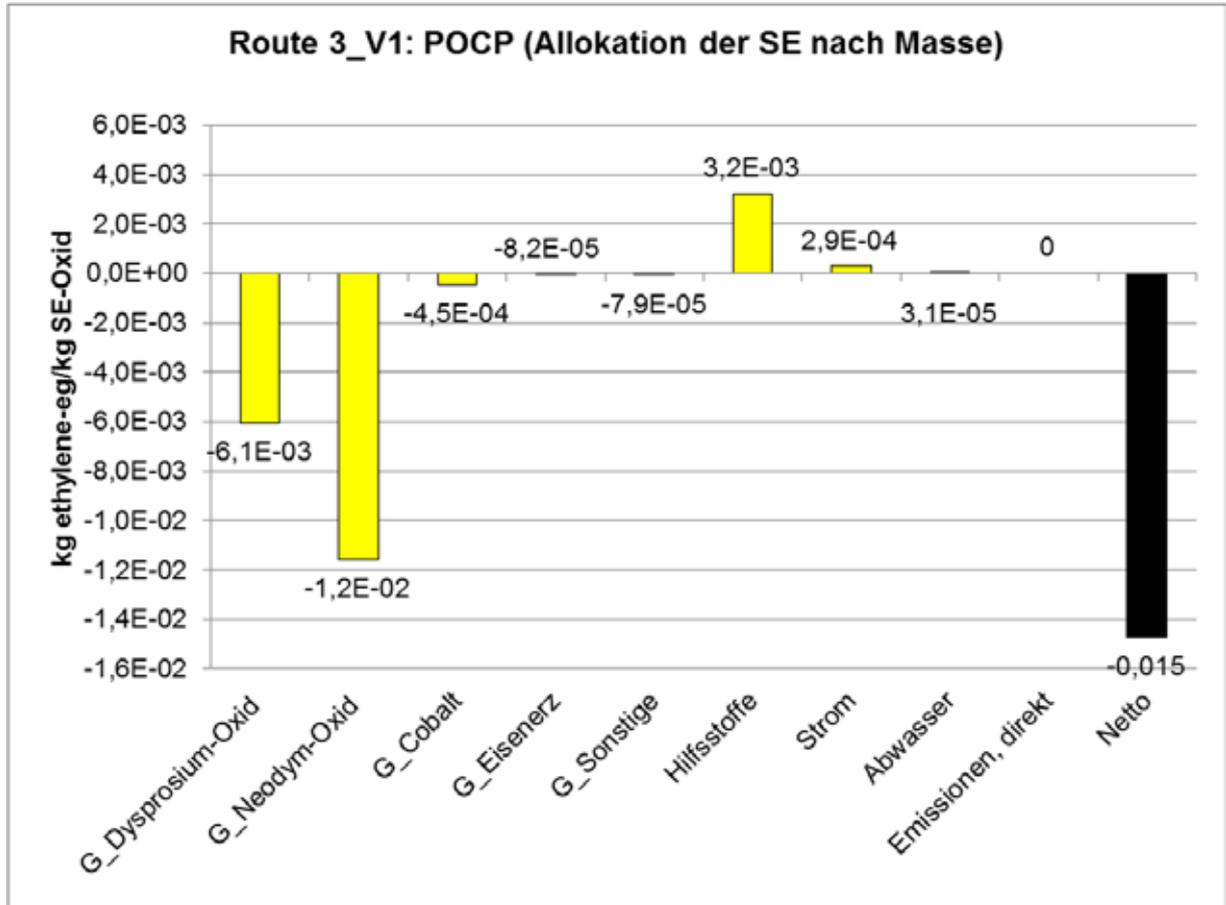


Abbildung 5-32: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (POCP), ökonomische Allokation

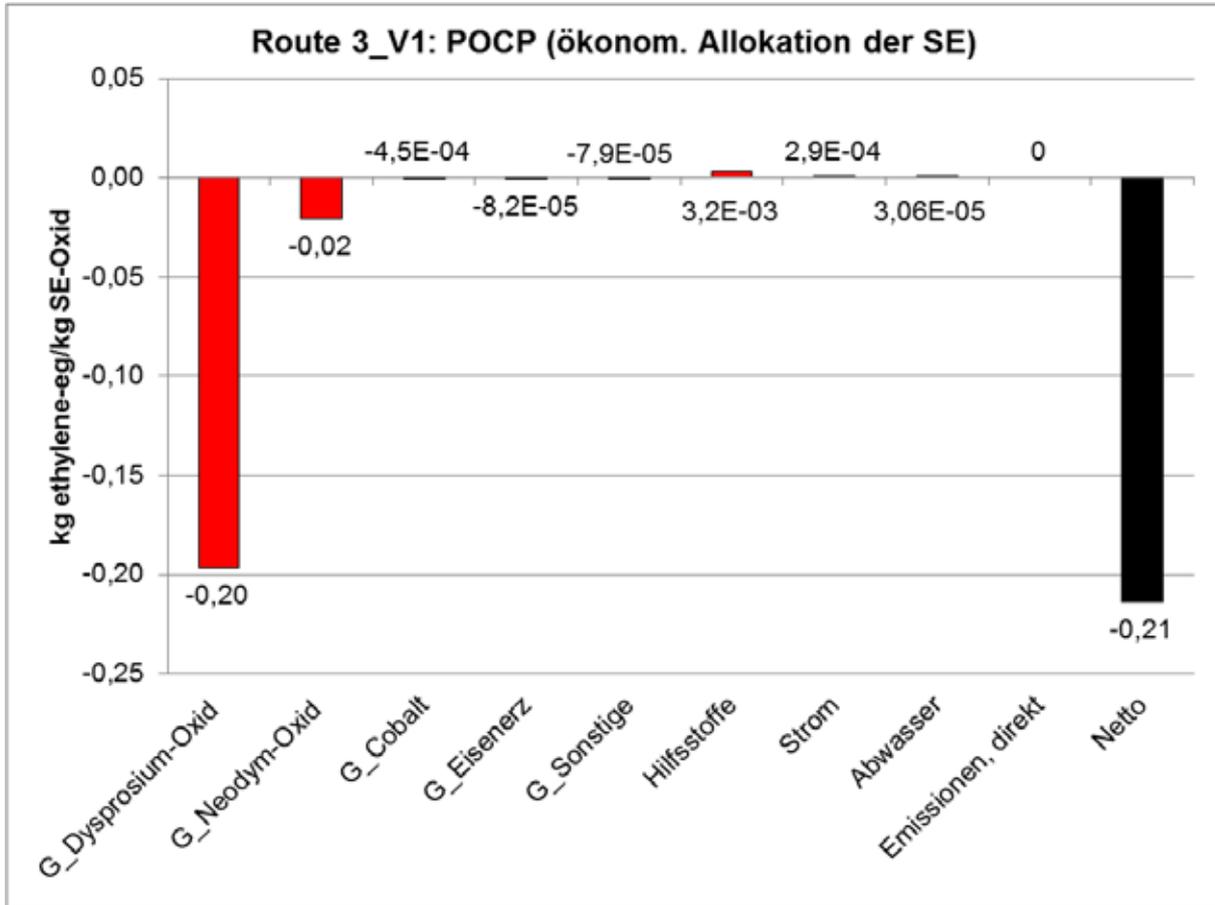


Abbildung 5-33: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (POCP), Allokation nach Masse

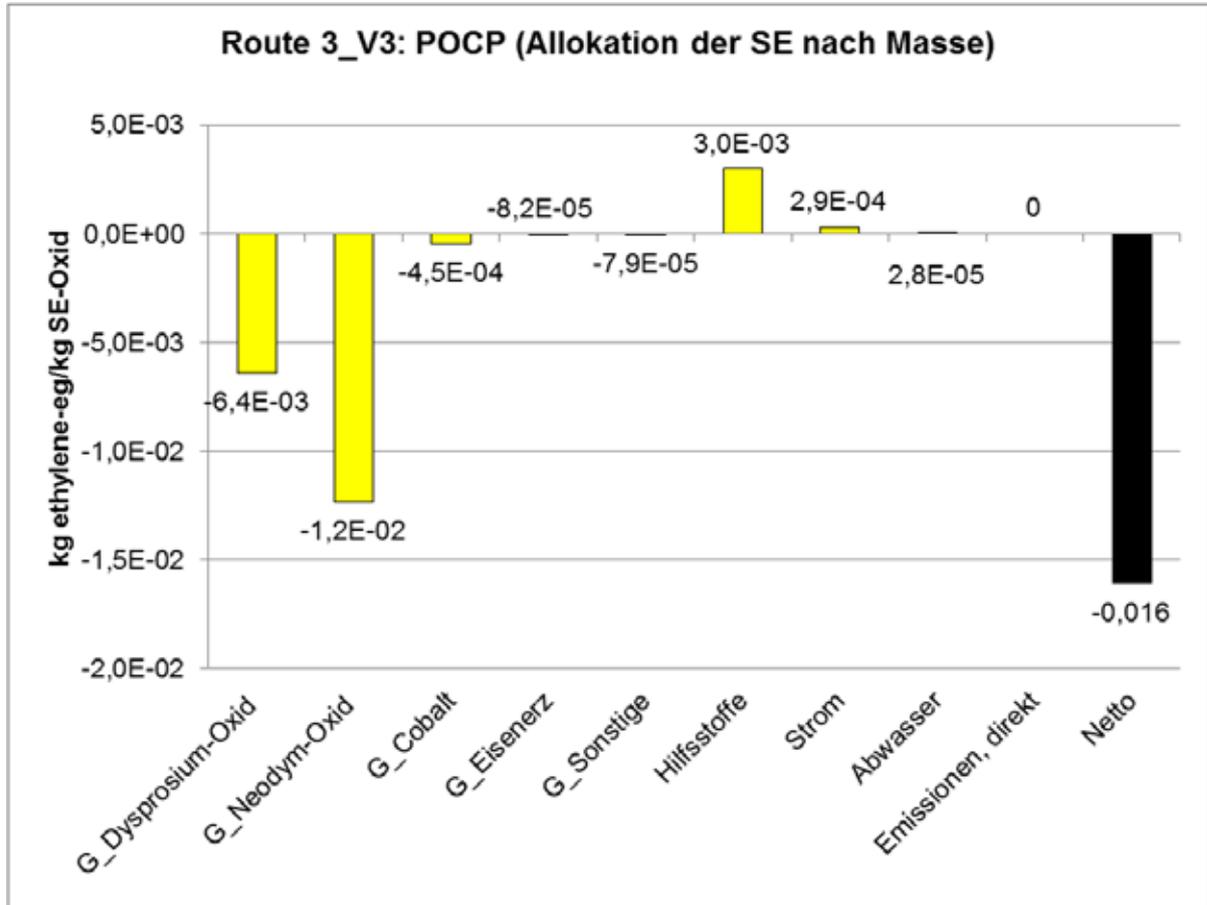
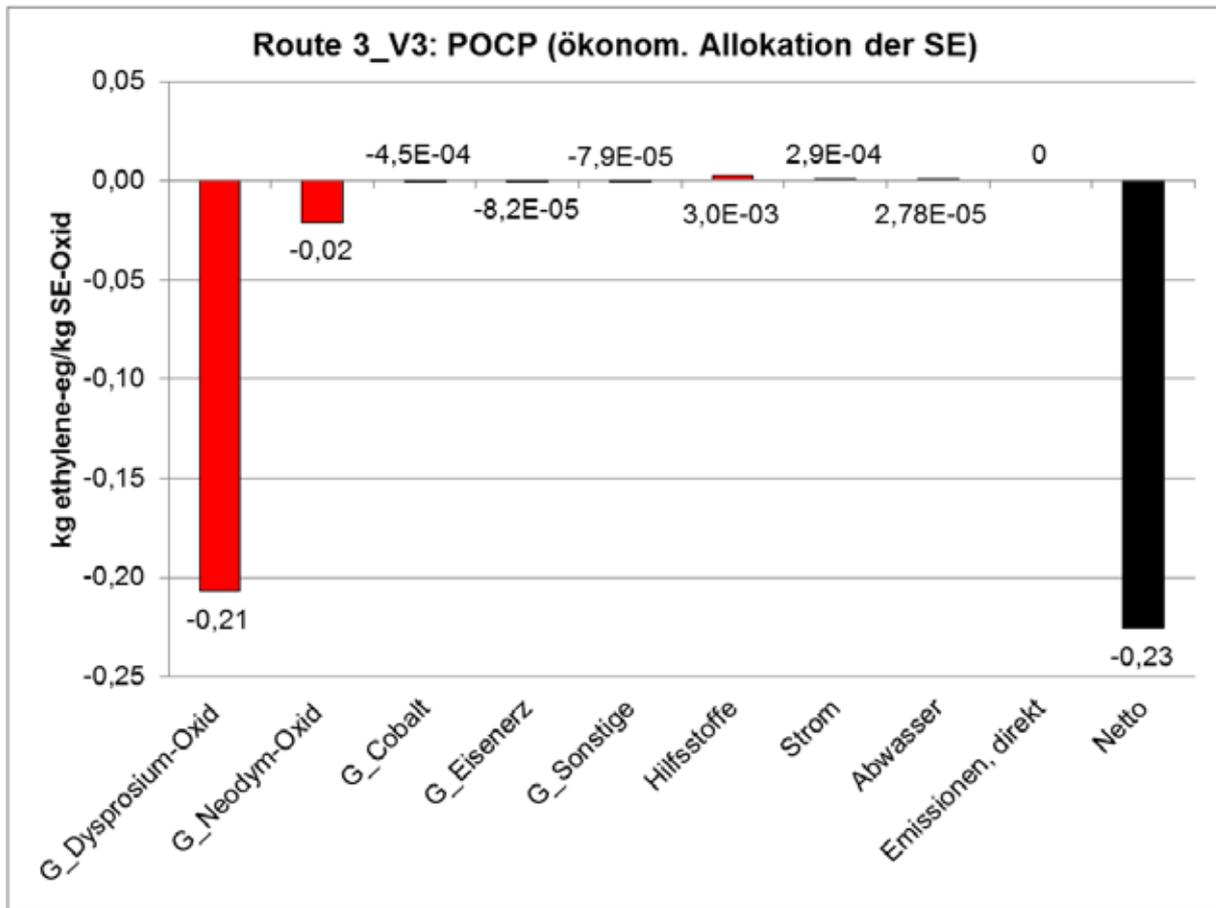


Abbildung 5-34: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (POCP), ökonomische Allokation



5.3.5. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP, elem)

Bei den Werten für den elementaren Ressourcenverbrauch (siehe die folgenden Abbildungen) zeigt sich, dass die Werte sowohl bei der ökonomischen als auch bei der Massenallokation sehr stark dominiert werden vom Einfluss der Seltenen Erden, die anderen Beiträge spielen praktisch keine Rolle. Dies trifft für beide Varianten des ADP zu, für ADP, elementar, reserve base und für ADP, elementar, ultimate reserve.

Abgesehen von den Seltenen Erden wird im Verfahren 1 der Verbrauch elementarer Ressourcen zu 97% vom Verbrauch an Natriumchlorid bestimmt, im Verfahren 3 zu 91% vom Verbrauch an Natriumchlorid.

Abbildung 5-35: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (ADP, elem. ultimate reserve), Allokation nach Masse

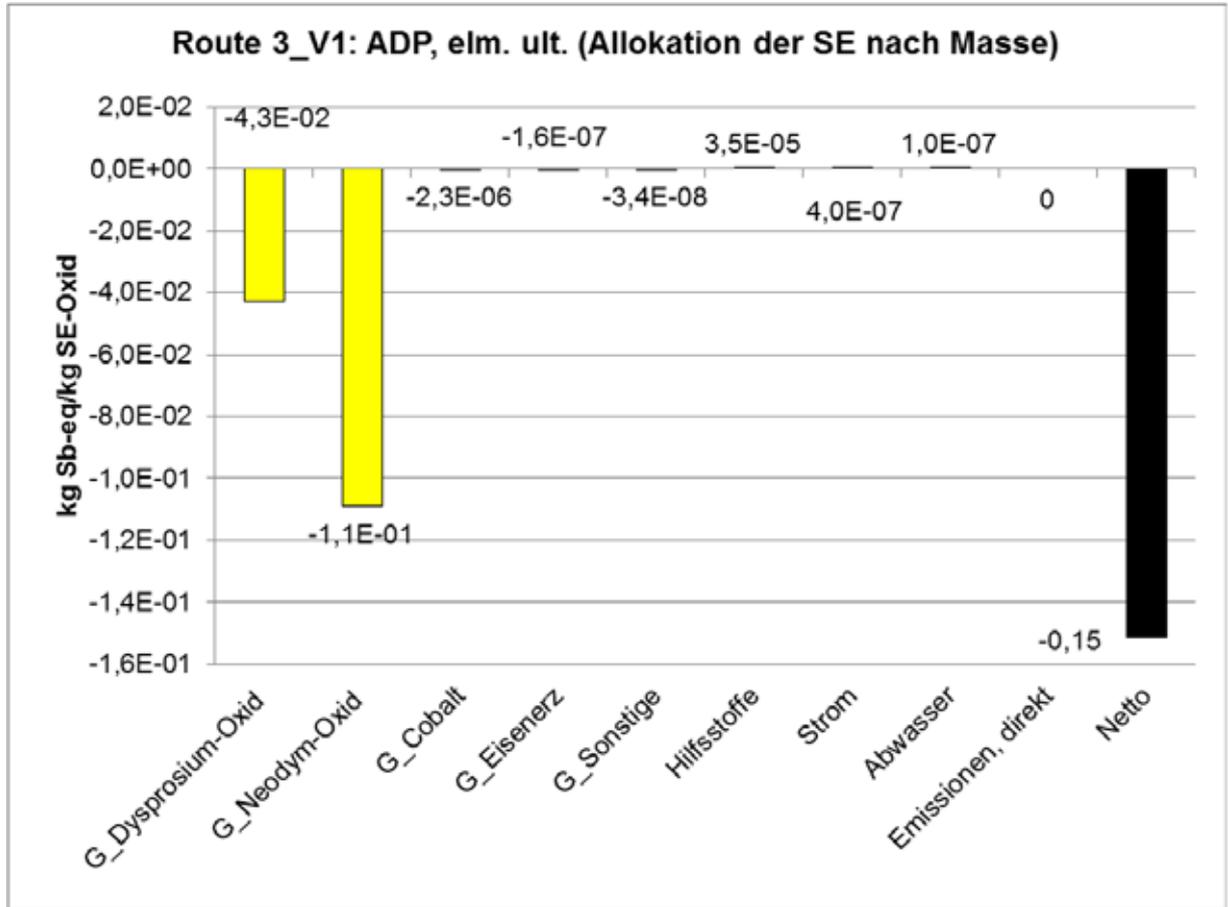


Abbildung 5-36: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (ADP, elem. ultimate reserve), ökonomische Allokation

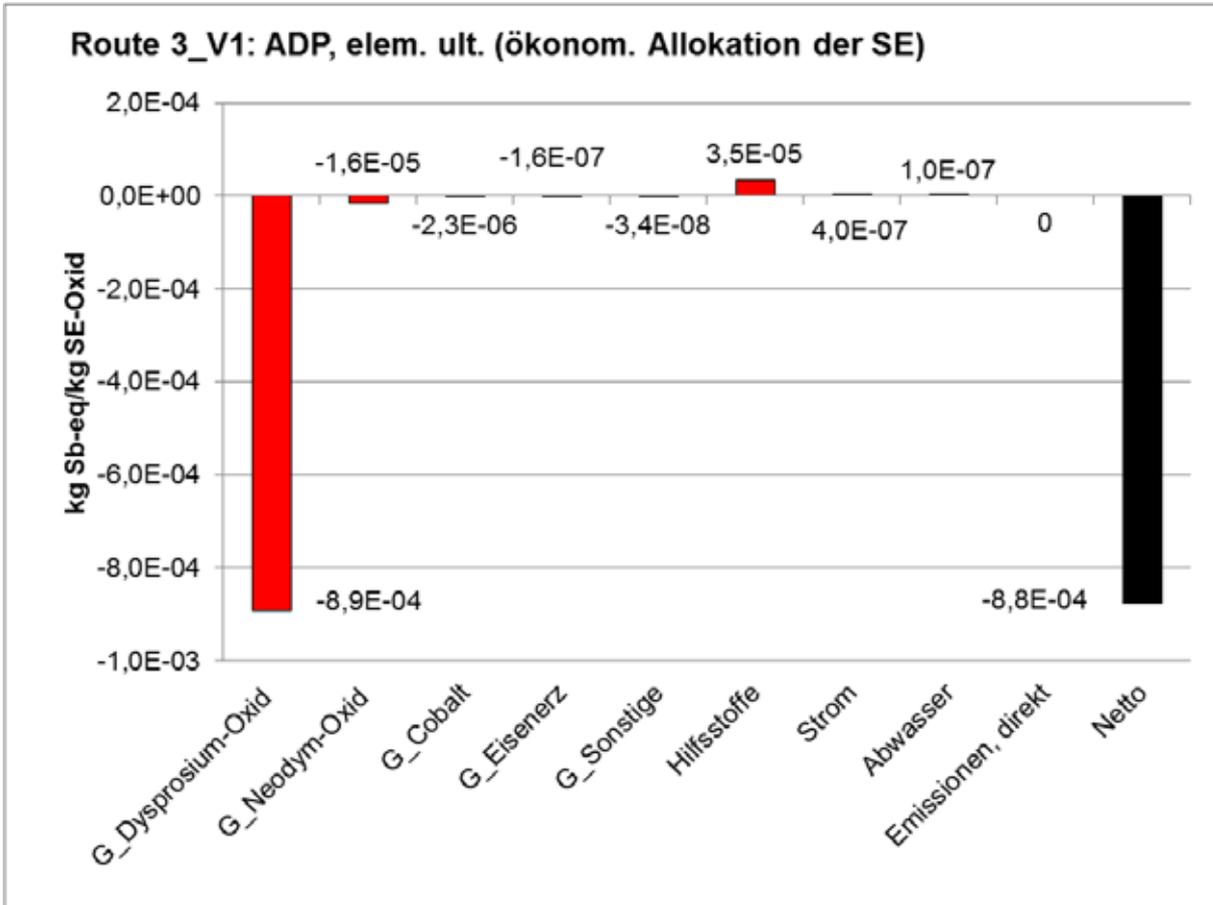


Abbildung 5-37: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (ADP, elem. reserve base), Allokation nach Masse

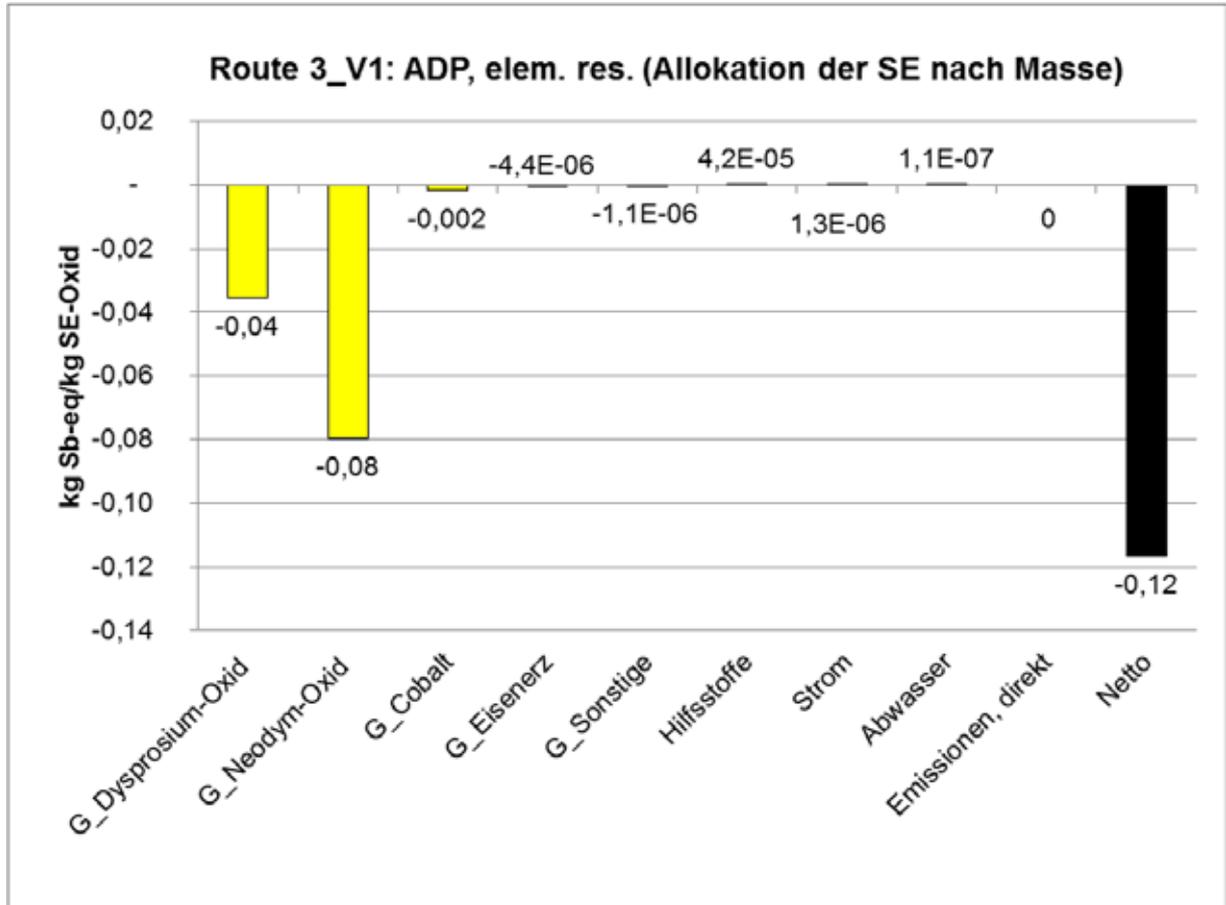


Abbildung 5-38: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (ADP, elem. reserve base), ökonomische Allokation

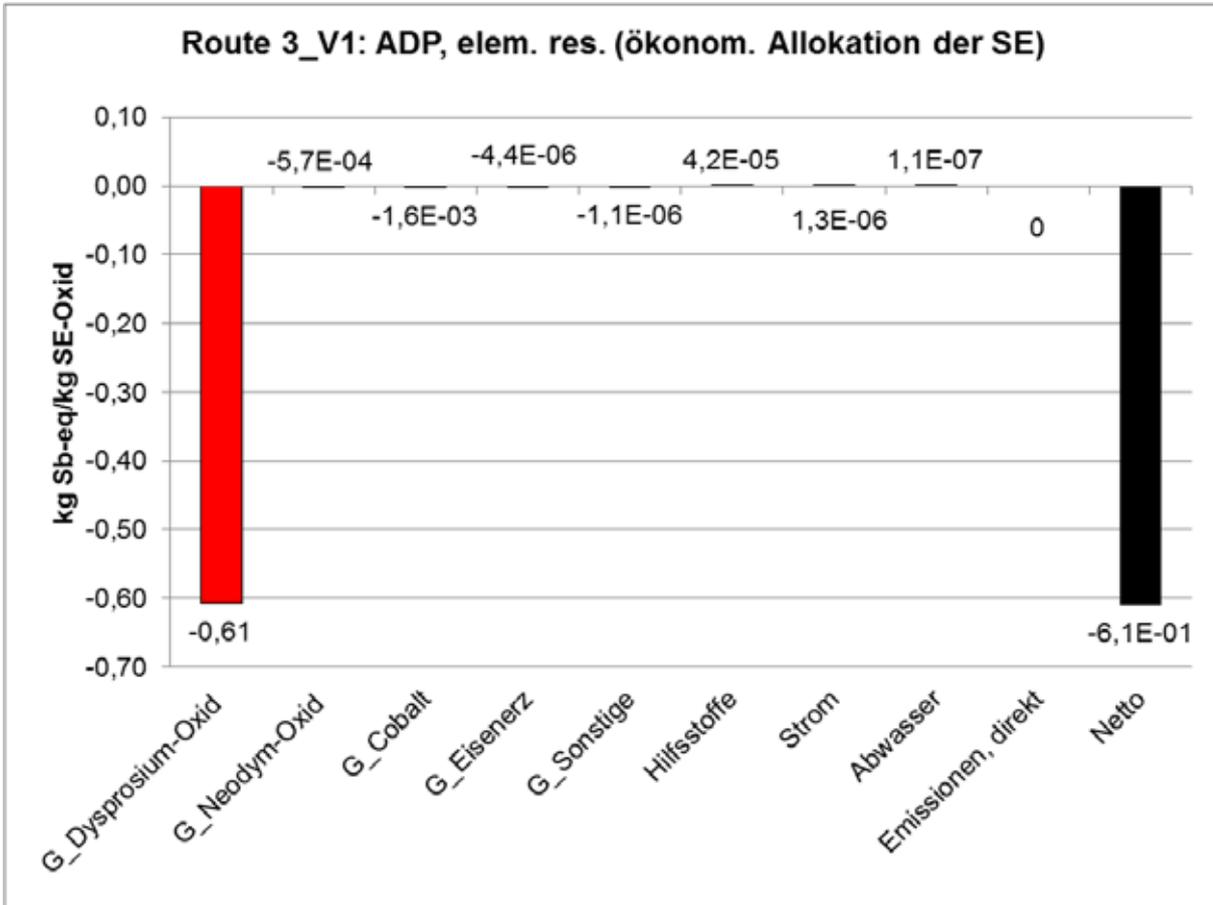


Abbildung 5-39: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (ADP, elem. reserve base), Allokation nach Masse

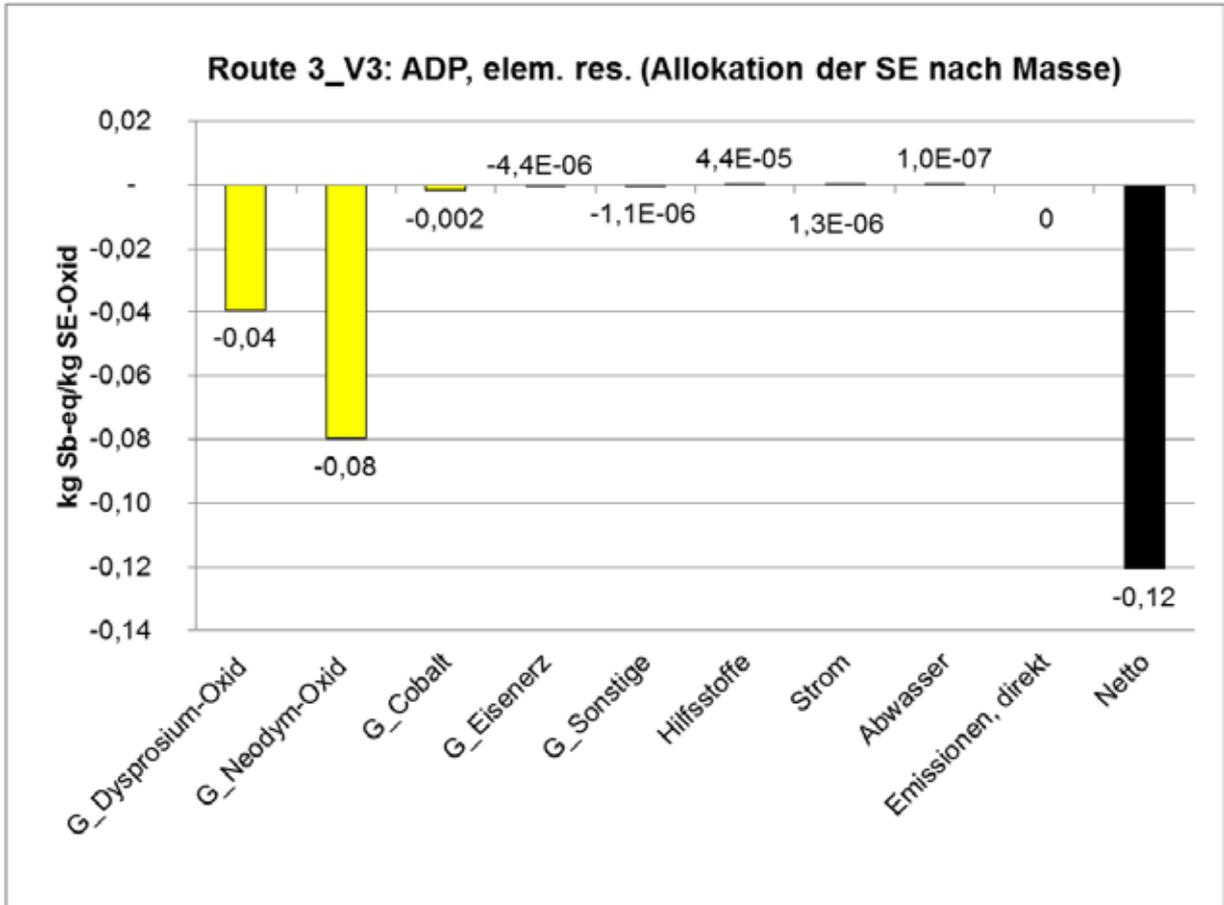


Abbildung 5-40: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (ADP, elem. reserve base), ökonomische Allokation

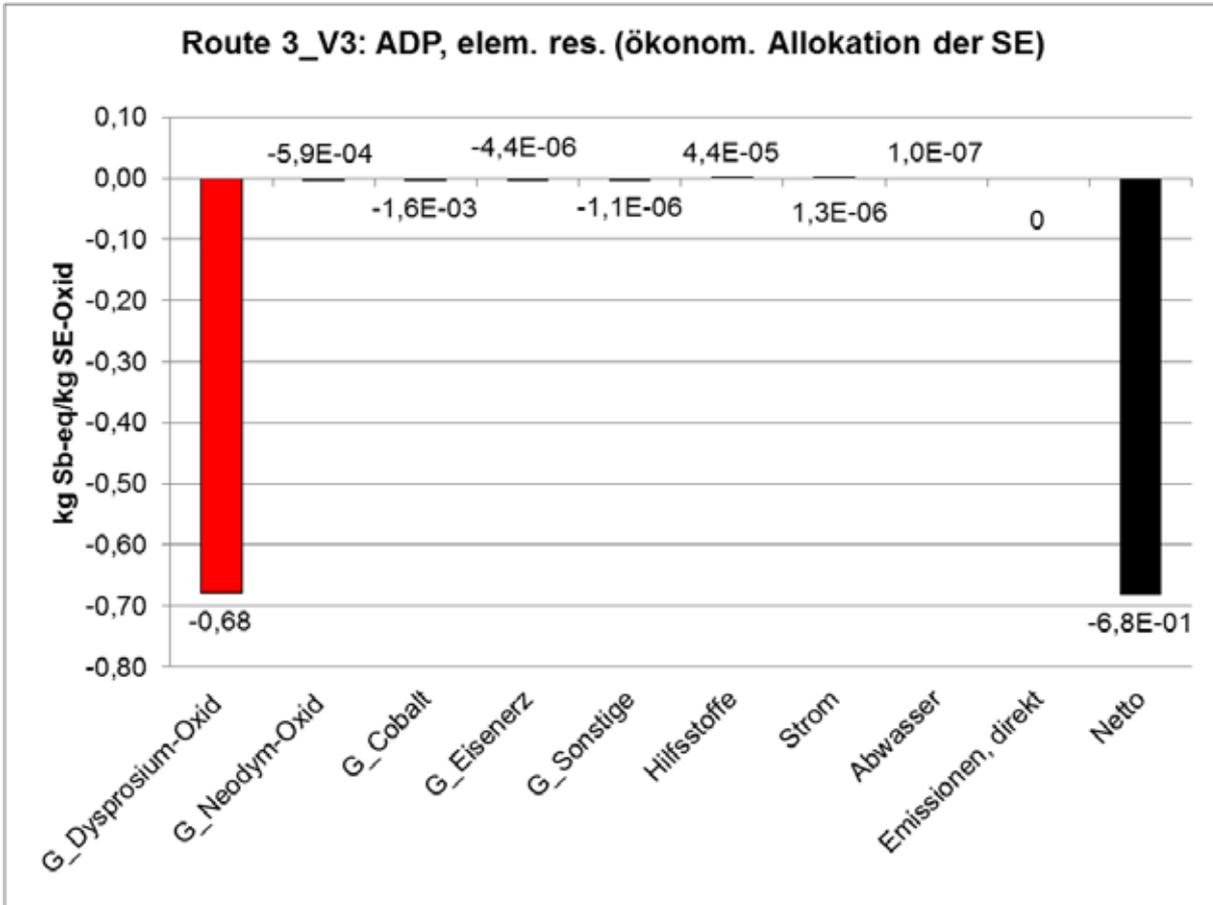


Abbildung 5-41: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (ADP, elem. ultimate reserve), Allokation nach Masse

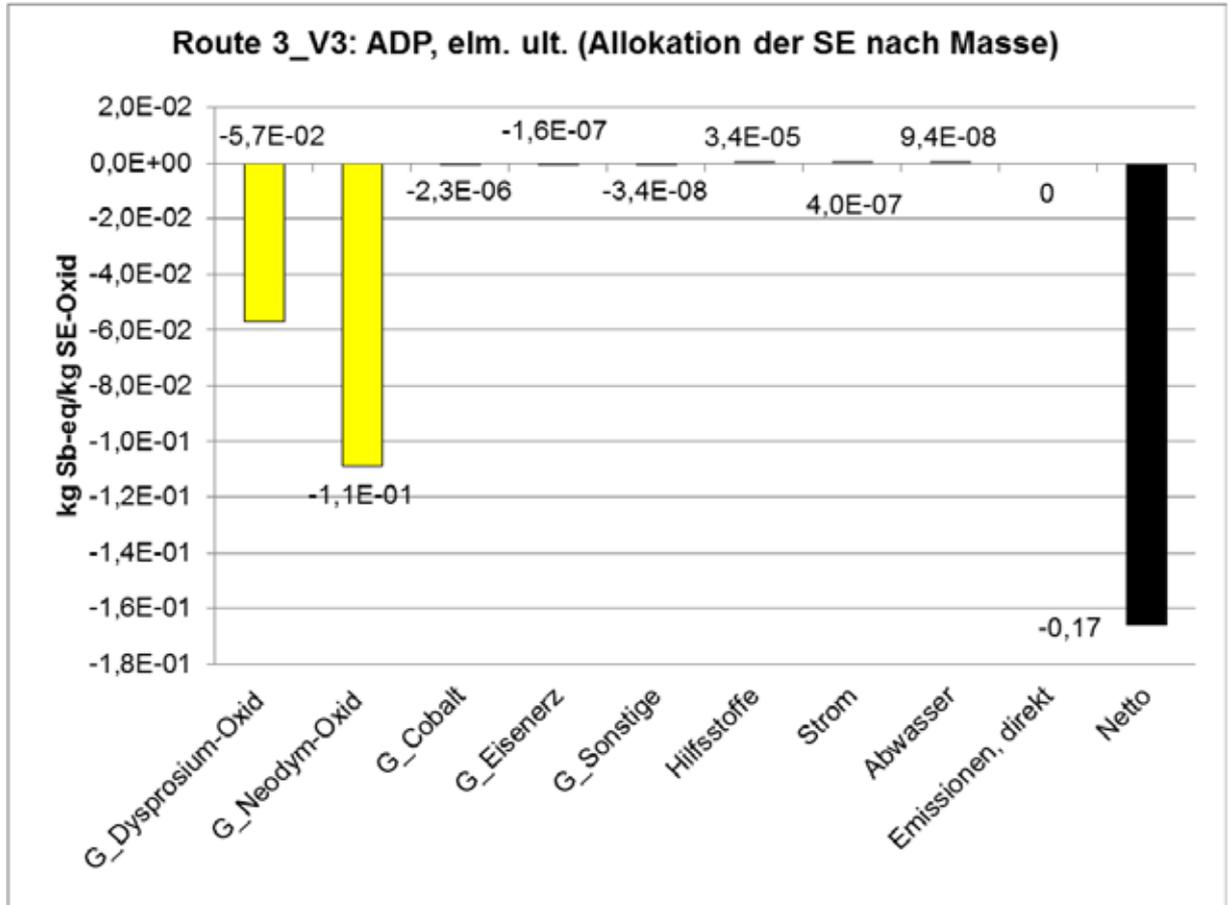
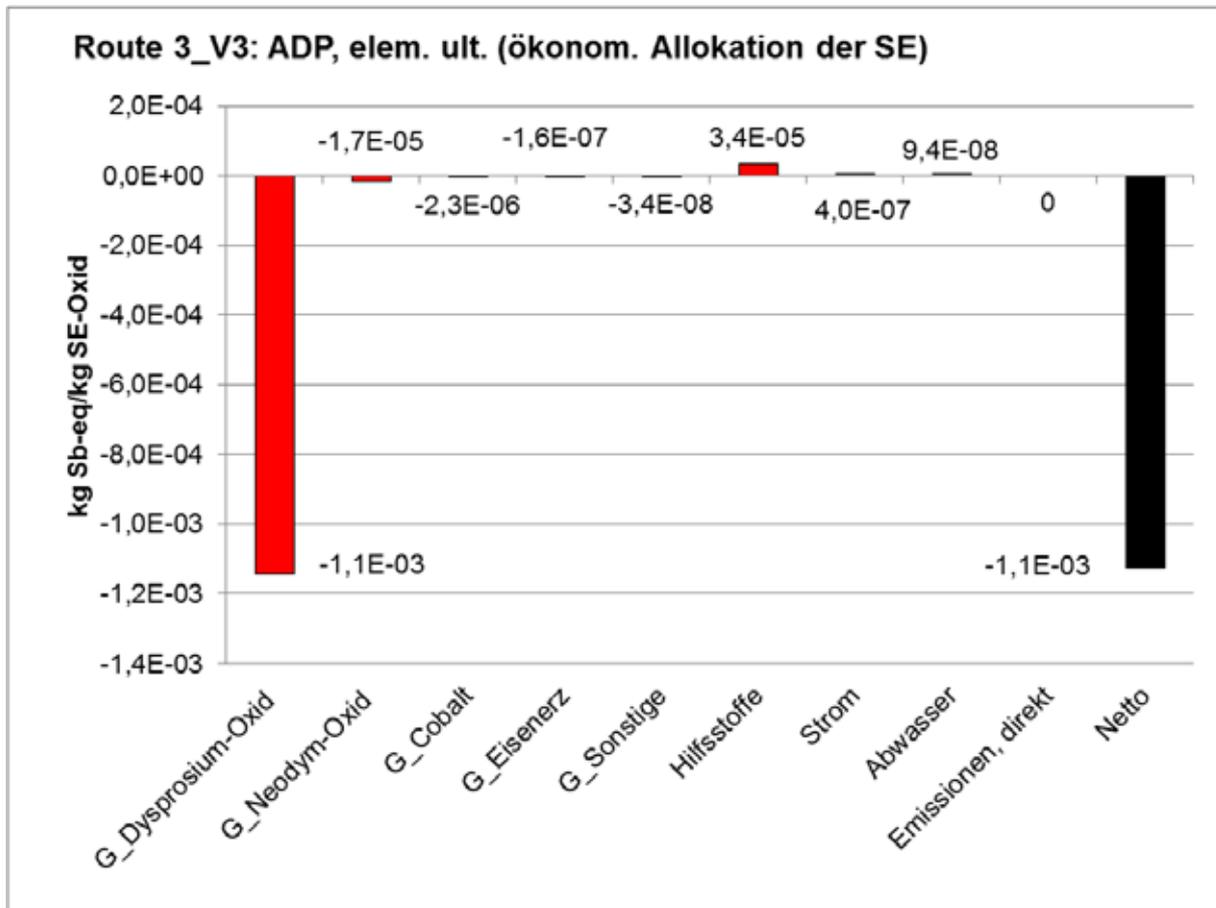


Abbildung 5-42: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (ADP, elem. ultimate reserve), ökonomische Allokation



5.3.6. Primärenergieverbrauch, gesamt (CED, total)

Beim Kumulierten Energieaufwand (CED) zeigen sich bei der Massenallokation relativ hohe Beiträge aus dem Einsatz von Hilfsstoffen und elektrischer Energie (vor allem im Verfahren 1), dennoch weist die Recyclingroute auch hier eine Nettogutschrift im Vergleich zur Primärproduktion auf.

Im Verfahren 1 wird der Primärenergieverbrauch zu 50% Erdgas- und zu 14% vom Erdölverbrauch bestimmt, im Verfahren 3 zu 41% Erdgas- und zu 22% vom Erdölverbrauch.

Abbildung 5-43: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (CED, total), Allokation nach Masse

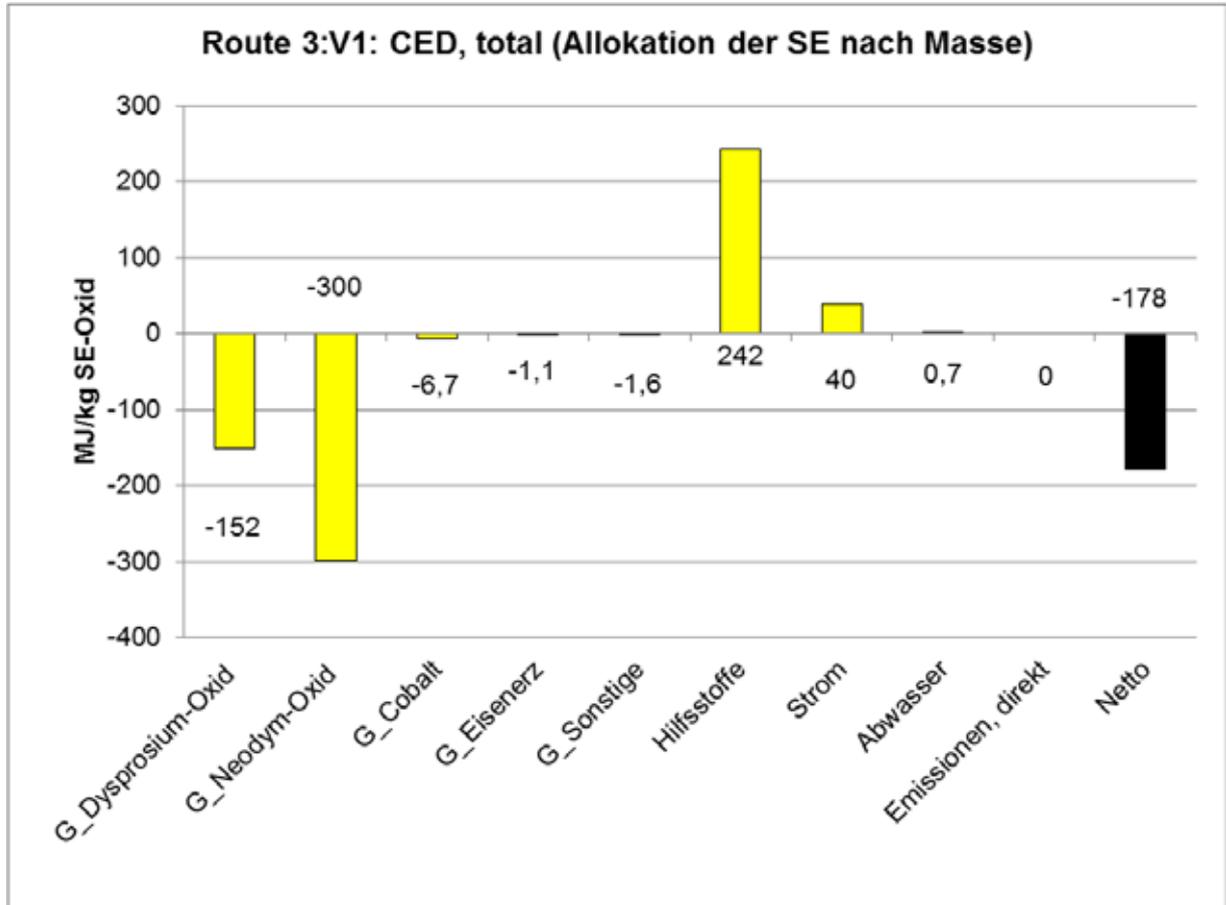


Abbildung 5-44: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 1 (CED, total), ökonomische Allokation

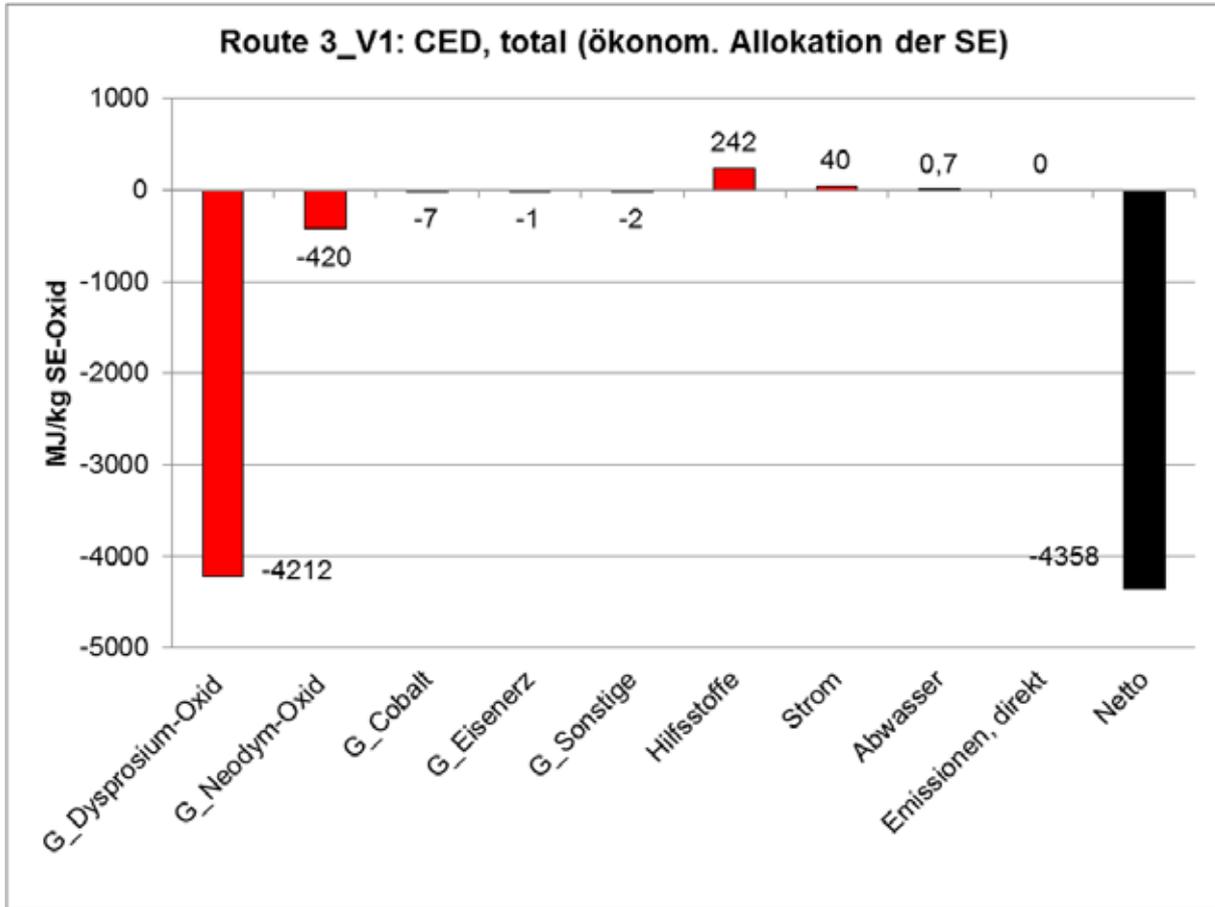


Abbildung 5-45: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (CED, total), Allokation nach Masse

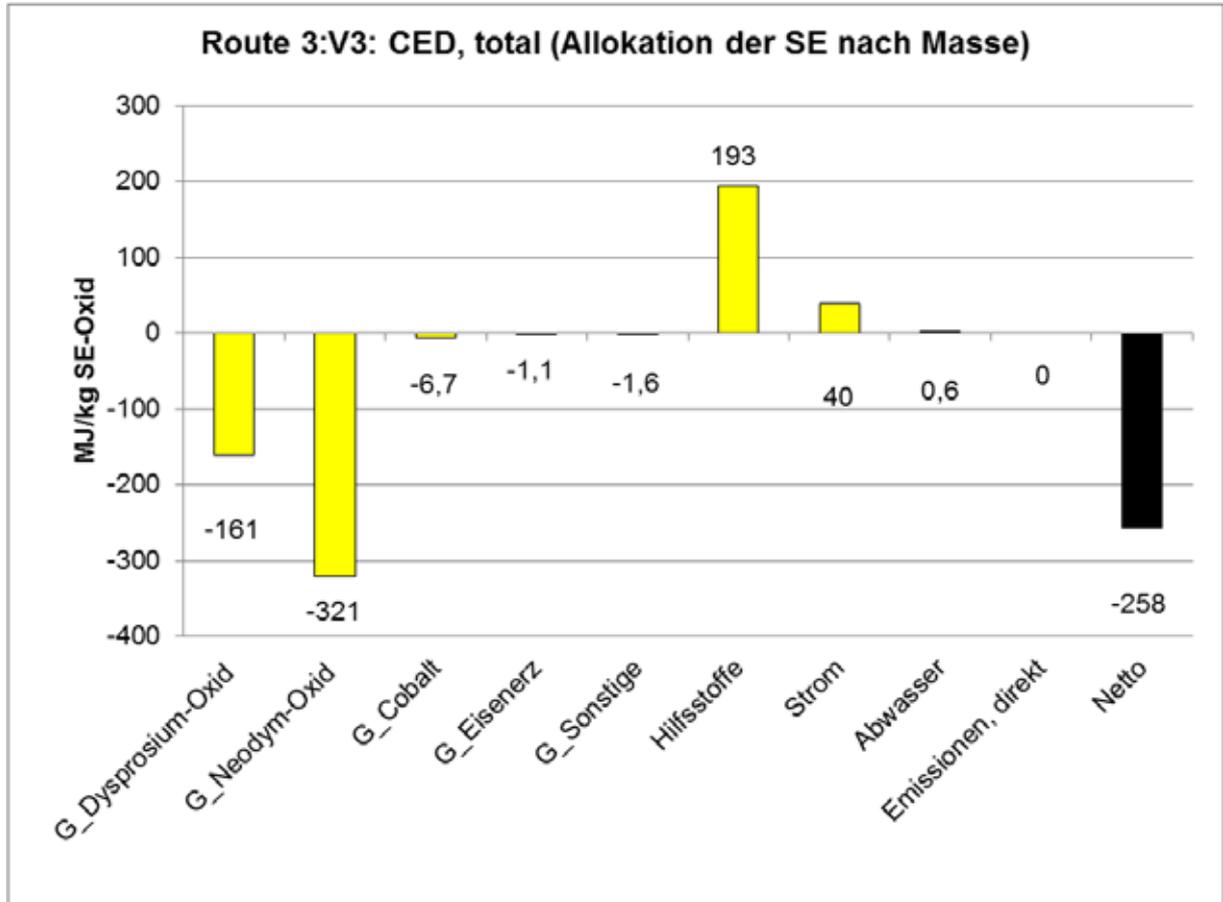
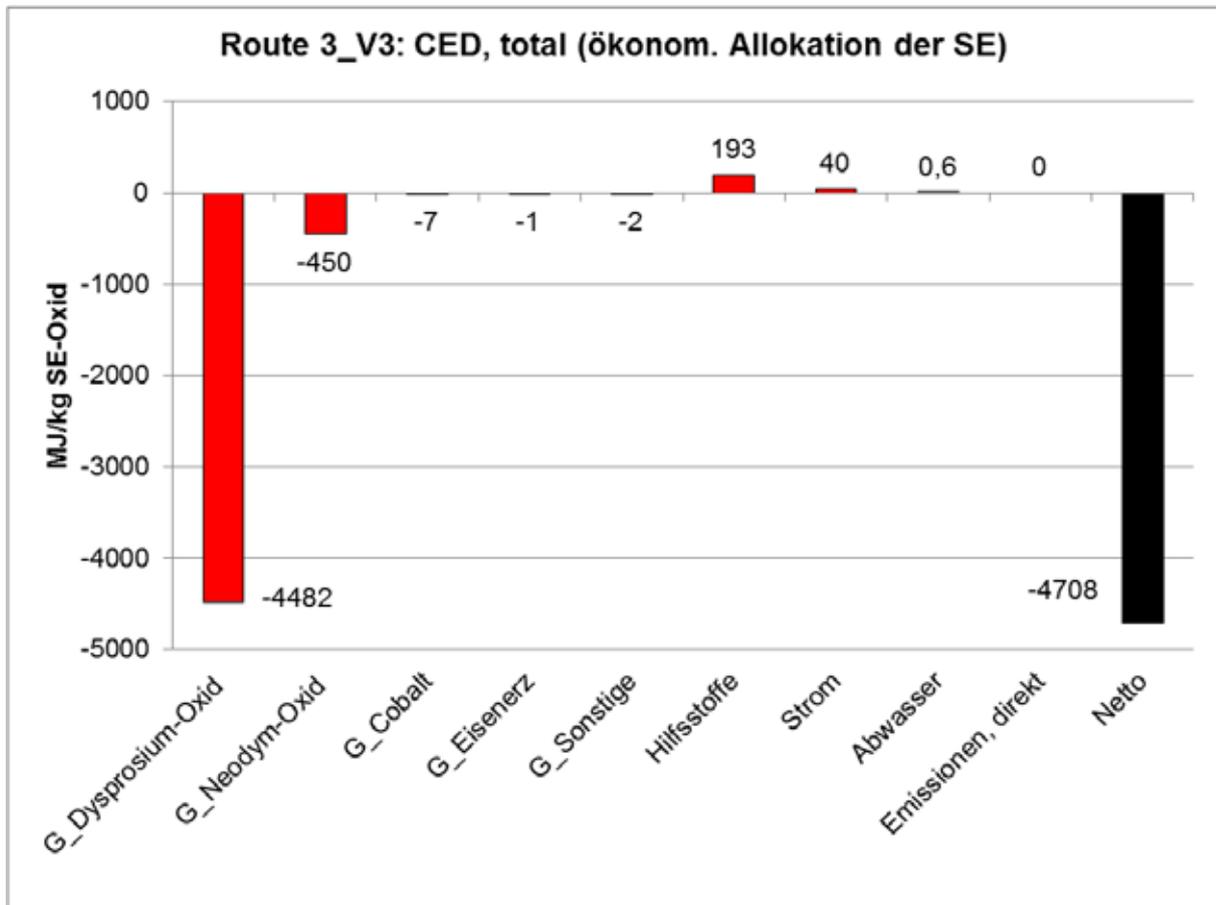


Abbildung 5-46: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (CED, total), ökonomische Allokation



5.3.7. Normierte Darstellung

Das Ergebnis der Normierung ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Es zeigt sich, dass die normierten Ergebnisse extrem dominiert werden von der ADP-Gutschrift für die Seltenen Erden, bei der Massenallokation dominieren Nd und Dy im Verhältnis 2:1, bei der ökonomischen Allokation dominiert beim ADP elem., reserve base die Dysprosiumgutschrift. Die normierten Ergebnisse für die Lasten liegen dagegen in der gleichen Größenordnung.

Bei der ökonomischen Allokation spielt auch der AP-Wert eine gewisse Rolle, der von der Gutschrift für die Schwefelsäure herrührt.

Da die Datensätze zu den Seltenen Erden dem MORE-Projekt nur in Form von aggregierten Datensätzen vorgelegt wurden, können die Hintergründe dieser Dominanz des ADPs der Seltenen Erden nicht genauer analysiert werden.

Abbildung 5-47: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (CED, total), Allokation nach Masse

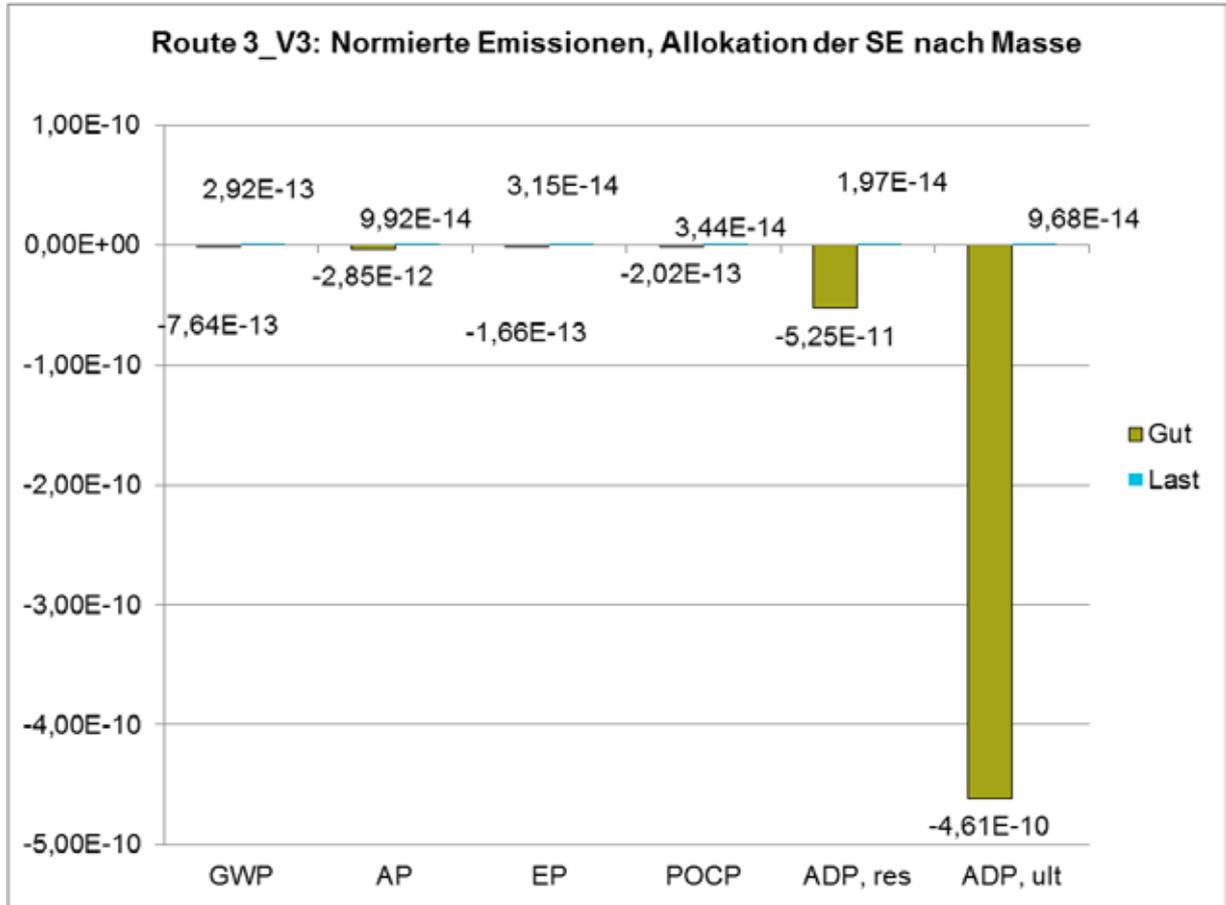
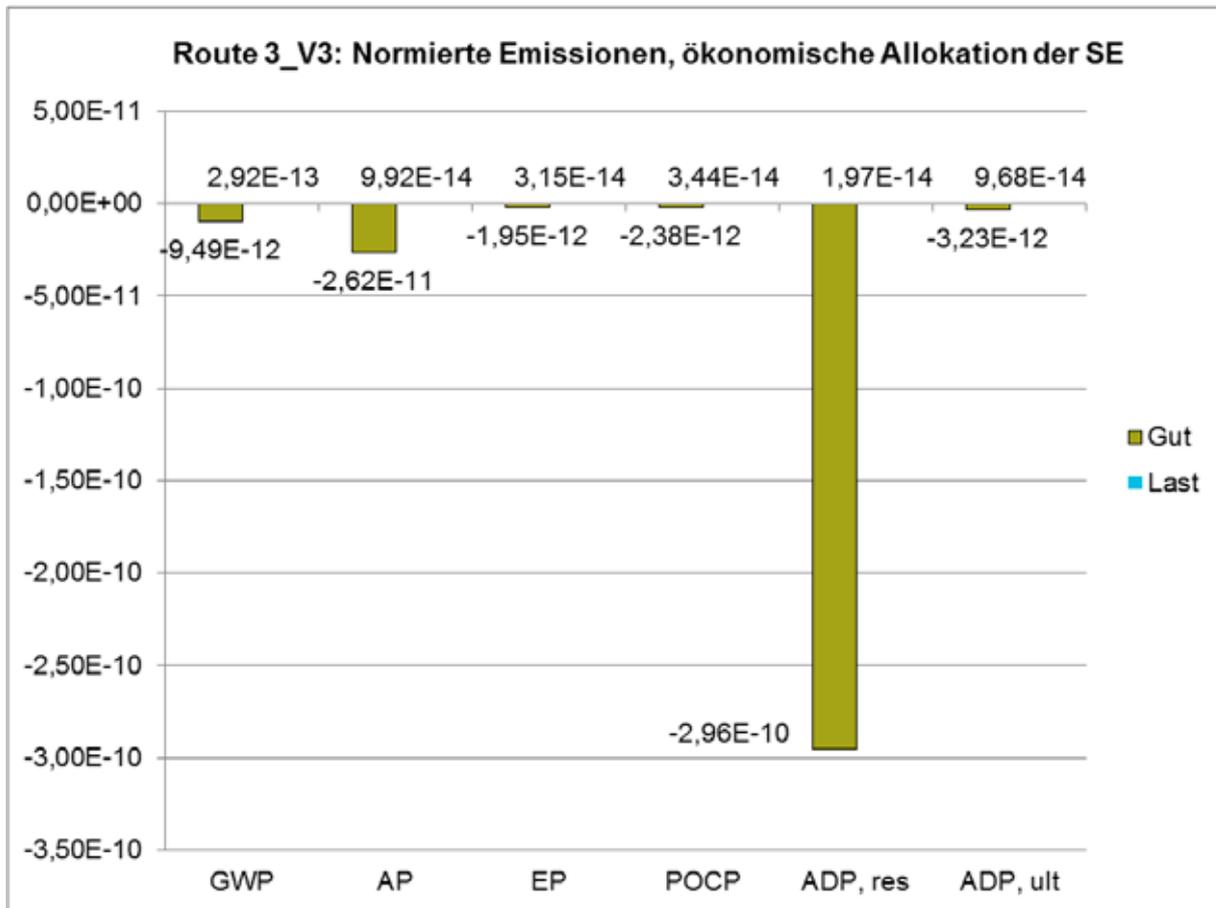


Abbildung 5-48: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (CED, total), ökonomische Allokation



6. Auswertung

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

6.1. Identifizierung der signifikanten Parameter

In allen Wirkungskategorien zeigen die Gutschriften für die zurückgewonnenen Seltenen Erden (Route 1 und 2: Nd und Dy; Route 3: Nd₂O₃ und Dy₂O₃) einen signifikanten Einfluss auf das Gesamtergebnis. Dies gilt sowohl für den Fall der Massentallokation der Gutschriften als auch für den Fall der ökonomischen Allokation.

Die Normierung der Wirkungskategorien zeigt für den Verbrauch elementarer Ressourcen (ADP_{elem.}) die höchsten Beiträge. In dieser Wirkungskategorie – hier noch einmal differenziert in den Verbrauch elementarer Ressourcen im Verhältnis zu den nachgewiesenen Reserven (ultimate reserve (ADP_{elem,ur})) sowie Verbrauch elementarer Ressourcen im Verhältnis zur Mindestreserve-basis (reserve base (ADP_{elem,rb})) hat die Definition zur Berechnung der Charakterisierungsfaktoren einen hohen Einfluss, einerseits auf die absolute Höhe der Werte, andererseits auf das Verhältnis der Knappheit einzelner Metalle untereinander [CML 2002].

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

6.2. Beurteilung

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

6.2.1. Vollständigkeitsprüfung

Für die vorliegenden Ökobilanzen wurden Daten zu allen für die Wiederverwendung bzw. das Recycling von NdFeB-Magneten wichtigen Prozessschritten erhoben. Weiterhin wurden alle notwendigen Daten für die Bilanz der Herstellung eines kompletten Elektromotors (inkl. NdFeB-Magneten) erfasst.

Alle Materialströme sowohl für die Zerlegung der Elektromotoren, der Abtrennung, Entmagnetisierung, Reinigung und Polierung der NdFeB-Magneten (Route 1) sowie für alle Schritte des werkstofflichen (Route 2) als auch des rohstofflichen Recyclings (Route 3) wurden vollständig erfasst und über die beschriebenen Prozessschritte verfolgt.

Für die Prozessschritte der Routen 1 und 3 ist die Datenlage als befriedigend bis gut zu betrachten, ungeachtet der Tatsache, dass alle Daten über Laborversuche erhalten wurden. Sowohl die Detailergebnisse der Wirkungsabschätzung (Kapitel 5) als auch die Ergebnisse der Sensitivitätsprüfung zeigen die Robustheit der Ökobilanzergebnisse. Im Falle der Route 2 ist die Datenlage ebenfalls als befriedigend bis gut zu bewerten, da die Daten zwar aus der

industriellen Praxis abgeleitet wurden, allerdings aus Geheimhaltungsgründen nicht im Rahmen der Studie eingesehen werden konnten..

6.2.2. Sensitivitätsprüfung

6.2.2.1. Sensitivität: geringerer Dysprosiumgehalt

In dieser Sensitivität wurde das Verfahren 3 des rohstofflichen Recyclings mit einem verringerten Dysprosiumgehalt der NdFeB-Magneten gerechnet. Die nächsten beiden Abbildungen zeigen die GWP-Werte für das Verfahren 3 der Route 3 mit einem Dysprosiumgehalt von 4 % und einem Neodymgehalt von 26 % (Basiswerte: 10% Dy, 20 % Nd), jeweils für die Rechnung mit einer ökonomischen Allokation der SE und eine Allokation nach Masse.

Bei der Massenallokation ändert sich das Gesamtergebnis nur geringfügig (der Vorteil der Route 3 gegenüber der Primärgewinnung von Dysprosium- und Neodymoxid sinkt lediglich von 116,5 kg CO₂-eq/kg SE-Oxid auf 16,3 kg CO₂-eq/kg), es verschiebt sich vor allem das Verhältnis zwischen der Dy- und der Nd-Gutschrift. Im Falle der ökonomischen Allokation ist der Nettovorteil bei der Sensitivitätsrechnung erwartungsgemäß erheblich geringer im Vergleich zum Basisergebnis (186,9 kg CO₂-eq/kg SE-Oxid statt 384,0 kg CO₂-eq/kg SE-Oxid für das Basisergebnis). Nichtsdestotrotz zeigt sich auch nach der ökonomischen Allokation für die Sensitivitätsrechnung eine sehr hohe Vorteilhaftigkeit des Recyclingverfahrens im Vergleich zur Primärgewinnung der SE Oxide.

Abbildung 6-1: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (GWP) – Szenario reduzierter Dy-Gehalt, Allokation der SE nach Masse

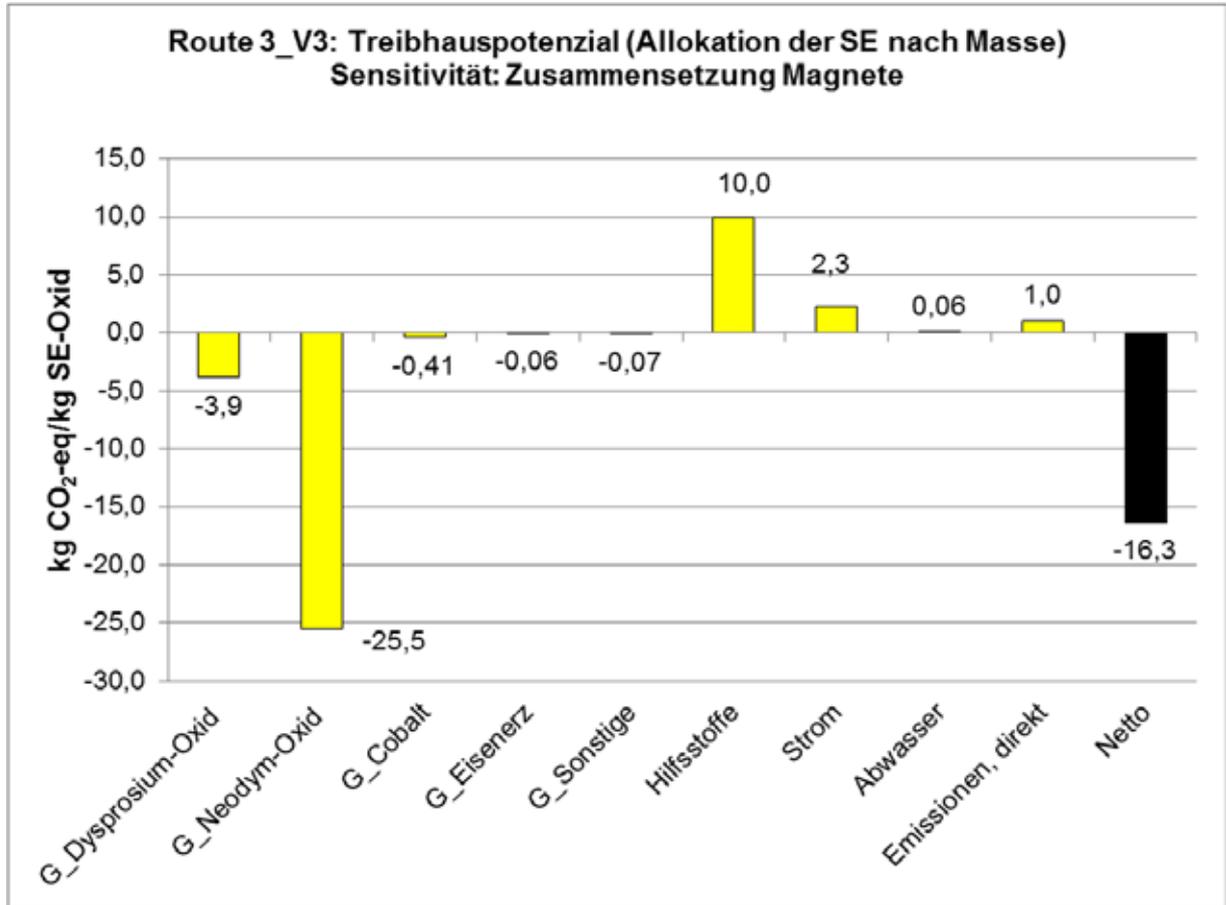
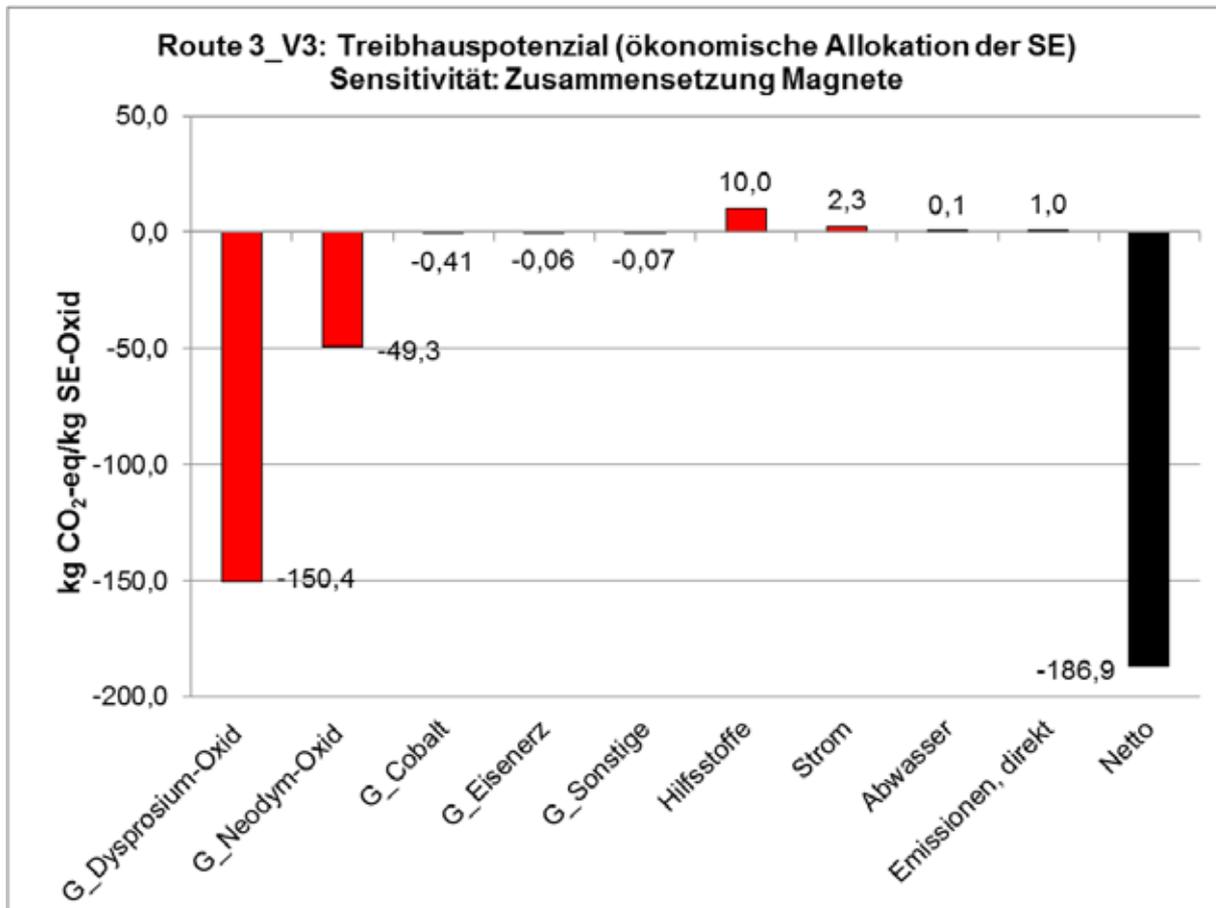


Abbildung 6-2: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (GWP) – Szenario reduzierter Dy-Gehalt, Ökonomische Allokation der SE



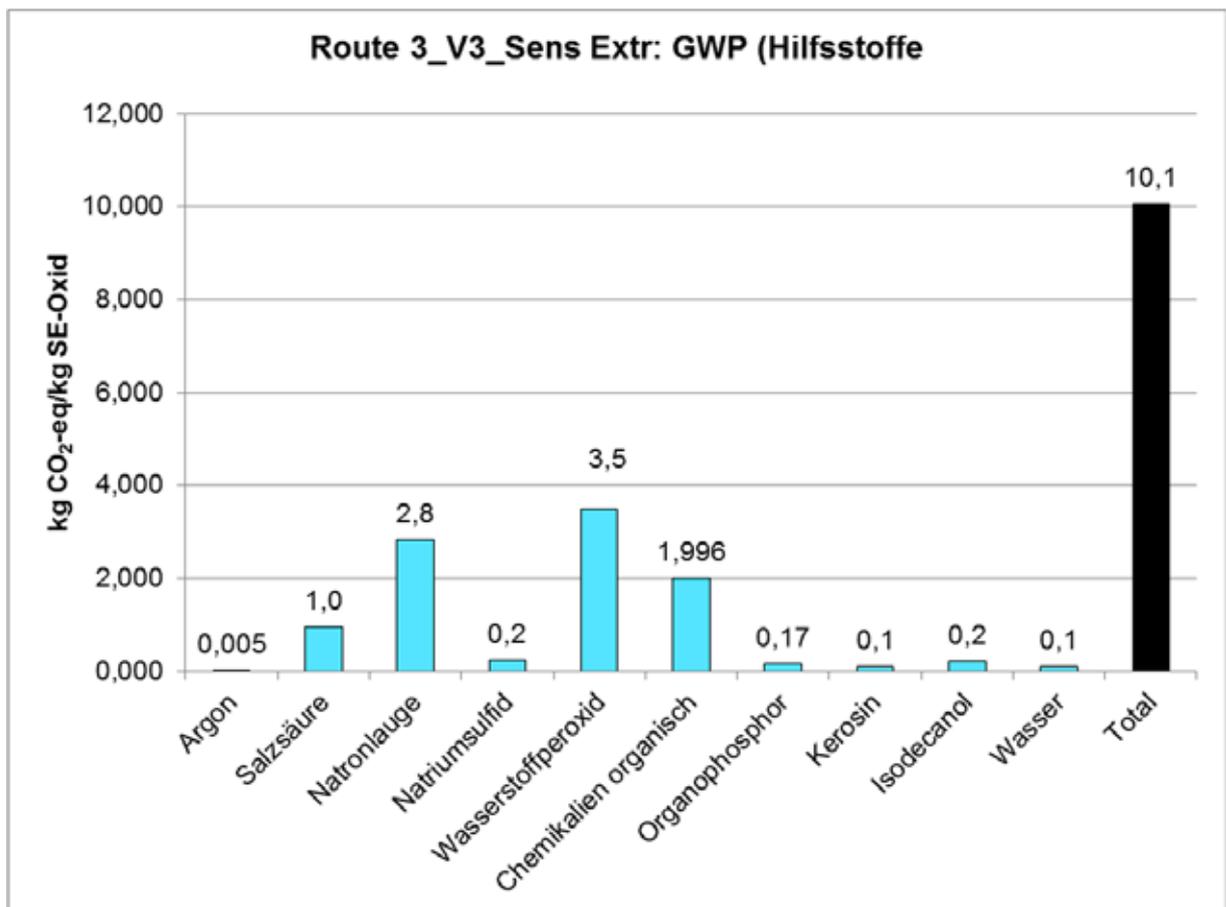
Da keine spezifischen Informationen zur Primärproduktion und zur Produktion von Sekundär-magneten im Rahmen werkstofflichen Recyclings vorliegen, ist für die Route 2 eine Berechnung mit einem reduzierten Dy-Gehalt nicht möglich. Für die Route 1 wird die Sensitivität ebenfalls nicht berechnet, da sich die Schritte der Demontage und Reinigung der Magnete in diesem Fall nicht unterscheiden und die Gutschrift für die Primärmagnete aufgrund der Vertraulichkeit der Daten nicht angepasst werden kann.

6.2.2.2. Sensitivität: anderer Datensatz für Extraktionsmittel

Diese Sensitivität untersucht den Einfluss des Extraktionsmittels, das für die Solvent-extraktion im Verfahren 3 des rohstofflichen Recyclings eingesetzt wird. Anstelle des in den Basisrechnungen verwendeten Datensatzes „Chemikalien, organisch“ wird hier der ecoinvent-Datensatz „Organophosphor-Verbindungen, RER“ verwendet. Dieser beschreibt die Produktion einer Gruppe von Pestiziden, die chemisch verwandt zum Extraktionsmittel PC-88A sind. Der Aufwand zur Herstellung dieser Verbindungen ist etwa doppelt so hoch

wie derjenige des generischen Datensatzes „Chemikalien, organisch“. Die folgende Abbildung zeigt die GWP-Werte der eingesetzten Hilfsstoffe. Es zeigt sich, dass das GWP, welches dem generischen Datensatz zugeordnet ist, nur geringfügig reduziert ist (1,996 kg CO₂-eq/kg SE-Oxide gegenüber 2,04 kg CO₂-eq/kg SE-Oxide im Basisszenario des Verfahrens 3). Dies liegt daran, dass dieser Wert überwiegend auf den Einsatz der Oxalsäure zurückzuführen ist. Die Organophosphor-Verbindungen haben demgegenüber nur einen sehr geringen Einfluss auf den Gesamtwert der eingesetzten Hilfsstoffe (10,1 kg CO₂-eq/kg SE-Oxide gegenüber 10 kg CO₂-eq/kg SE-Oxide im Basisszenario des Verfahrens 3).

Abbildung 6-3: Rohstoffliches Recycling – Verfahren 3 (GWP) – Szenario Extraktionsmittel, Beiträge der Hilfsstoffe



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, da je nach Route unterschiedliche Datenlieferanten (Laborversuche oder industrielle Praxis) mit unterschiedlichem Ansatz angesprochen wurden. Alle Daten zu den direkten Schritten der Routen 1, 2 und 3 wurden

bei Partnern des Forschungsverbundes MORE erhoben. So finden sich großtechnische Prozesse bis zu manuellen Laborversuchen (frühes Forschungsstadium, Universität). Im Hinblick auf die robusten Gesamtergebnisse wird der Einfluss jedoch als gering eingeschätzt.

Im Forschungsverbund MORE 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 Wiederverwendungs- bzw. Recyclingprozesse sichert die Gleichbehandlung der Gutschriften für recycelte Wertstoffe eine konsistente Methodik. So werden die Aufwände zur Sekundärmaterialherstellung immer mit einer 100 %-Gutschrift des Primärprozesses gegengerechnet.

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

Die Datenqualität der Vorketten wird dagegen als sehr unterschiedlich bewertet. Für die Gesamtbewertung des Ergebnisses hat vor allem die Datenqualität der Primärherstellung von Neodym und Dysprosium einen sehr großen Einfluss auf das Ergebnis. Da insbesondere zur Primärgewinnung von Dysprosium in China nur unzureichende Informationen erhältlich sind, diese aber vor allem die Ergebnisse der Bilanzierung mit ökonomischer Allokation dominieren, lassen sich sämtliche Schlussfolgerungen nur ziehen vorbehaltlich dieser Unsicherheit der SE-Vorketten.

6.3. Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen

Wie aus den Ergebnissen der Wirkungsabschätzungen hervorgeht, sind alle drei über LCA in MORE untersuchten Routen (Route 1, Reuse: Wiederverwendung von NdFeB-Magneten; Route 2: Remelt, werkstoffliches Recycling von NdFeB-Magneten; Route 3: Remat: Rückgewinnung von SE-Oxiden aus abgetrennten NdFeB-Magneten) bezüglich der untersuchten Wirkungskategorien vorteilhaft im Vergleich zur Primärproduktion von NdFeB-Magneten bzw. den entsprechenden SE-Oxiden.

Route 1: Reuse

Die mechanische Abtrennung von NdFeB-Magneten von Elektromotoren und deren Wiederverwendung (nach Entmagnetisierung, Reinigung und Polierung) ist. Im Vergleich zu einem Elektromotor mit NdFeB-Magneten aus der Primärherstellung nach allen untersuchten Wirkungskategorien (GWP, $ADP_{\text{elementar}}$, AP, EP, POCP und CED total) besser. Die Detailanalysen der Demontage- und Reinigungsschritte zeigen, dass vor allem die Teilschritte Reinigen (Siliziumcarbid!) und Entmagnetisieren (elektrische Energie) die größten ökologischen Belastungen verursachen, die jedoch durch die Gutschriften für die wiederverwendeten NdFeB-Magneten übertroffen werden. Einschränkend muss erwähnt werden, dass die Ergebnisse der Route 1 auf Laborergebnissen beruhen, die während des Verbundprojektes MORE gewonnen wurden. Aus dem Kreis der MORE-Partner wurde gegen Projektende darauf hingewiesen, dass im Falle einer Motordemontage in einer semi-industriellen bzw. industriellen Anlage vor allem im Teilschritt Entmagnetisierung noch

einfach zu erschließende und deutliche Optimierungspotenziale zur Reduzierung des Verbrauchs an elektrischer Energie durch den Infrarotstrahler bestehen (Optimierung der Einwirkungszone und -zeit der Infrarotstrahlung auf die NdFeB-Magnete). Die Ökobilanz-ergebnisse können daher auch vor diesem Hintergrund für die Route 1 als robust eingeschätzt werden.

Ein weiteres interessantes und wichtiges Ergebnis ist, dass die Einbauweiser der Magneten – d. h. Motoren mit geklebten oder vergrabenen Magneten – für die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Die Wiederverwendung von Magneten ist, wie in MORE gezeigt wurde, technisch möglich, wird heute jedoch nicht praktiziert. Um die Wiederverwendungsmöglichkeit zu realisieren, müssten die Magnete standardisiert werden. (vgl. Hauptbericht zum Verbundprojekt MORE).

Route 2: Remelt

Das werkstoffliche Recycling von NdFeB-Magneten, d. h. den (anteiligen) Einsatz von abgetrennten Sekundärmagneten zur Produktion neuer NdFeB-Magnete zeigt ebenfalls Vorteile, in allen untersuchten Wirkungskategorien, obgleich lediglich 30% Zumischung von Sekundärmaterial zur Produktion der neuen NdFeB-Magneten angesetzt wurde. Diese Zumischung ist aus Qualitätsgründen notwendig. Die Remanenzen solcher Magnete liegen ca. 3 % niedriger als von Magneten aus 100 % Primärmaterial und es ist fraglich, ob für solche Magnete ein Absatzmarkt vorhanden ist.

Route 3, Remat: Verfahren 1 und 3

Im Rahmen der Arbeiten von MORE zum rohstofflichen Recycling von NdFeB-Magneten wurden drei verschiedene Verfahren untersucht. Verfahren 2 stellt einen Reaktionsweg dar, der sich im Laufe der Arbeiten von MORE überholt hat. Daher wurde auch auf eine Ökobilanzierung von Verfahren 2 verzichtet. Verfahren 1 produziert ein Mischoxid der Seltenen Erden (hauptsächlich Neodym und Dysprosium). Nach Verfahren 3 werden nach einer Solventextraktionsstufe Neodymoxid und Dysprosiumoxid in sehr hoher Reinheit erhalten. Dieses Material wäre geeignet über eine Schmelzflusselektrolyse zu Neodym- sowie Dysprosiummetall umgesetzt zu werden. Diese Metalle könnten dann direkt wieder zur Herstellung von NdFeB-Magneten eingesetzt werden. Verfahren 3 stellt die ausgereifteste Verfahrensvariante des rohstofflichen Recyclings dar, welche im Rahmen von MORE entwickelt wurde (vgl. Hauptbericht zum Verbundprojekt MORE). Auch für das rohstoffliche Recycling der NdFeB-Magnete zeigen sich im Vergleich zur Primärkette der SE-Oxide Vorteile für alle Wirkungskategorien. Verfahren 3 zeigt im Vergleich zu Verfahren 1 noch etwas bessere Ergebnisse und unterstreicht die Vorteilhaftigkeit dieses Weges im Vergleich zu Verfahren 1 (Produktion von SE-Mischoxiden).

Einschränkungen

Die oben genannten Aussagen gelten unter der Voraussetzung des lastenfreien Einganges der Magneten in die Verwertung. Einschränkungen bzgl. der Datenqualität betreffen für alle Routen die Datenqualität der Primärdaten der SE sowie im Falle von Route 1 und Route 3 die Tatsache, dass die Prozessdaten auf Laborergebnissen beruhen. Im Zuge von MORE konnten von PE International über Projektpartner exklusive Daten zur Primärherstellung der

SE Neodym und Dysprosium erhalten werden. Die Schwierigkeiten bei der Erhebung von Sachbilanzdaten zu der Primärherstellung der SE sind bekannt und mit der Tatsache verbunden, dass deutlich mehr als 90% der SE in China gewonnen und verarbeitet werden (schwieriger Datenzugang, Quellen häufig nur in chinesischer Sprache usw.). In Gesprächen mit PE International konnten jedoch Unklarheiten zum Datensatz ausgeräumt und gegen Projektende ein aktualisierter Datensatz erhalten werden. Die Aktualisierung der SE-Primärdaten betraf vor allem die Aktualisierung der Daten nach der ökonomischen Allokation, was angesichts der starken Preisschwankungen bei SE eine große Rolle spielt. Die ökonomische Allokation, die für die Ökobilanzen in MORE zu Grunde gelegt wurden, basiert auf den Preisen von Sommer 2013.

Sensitivitätsanalysen

Bei allen Ökobilanzen im Rahmen von MORE zu allen drei Routen wurden für die Gutschriften der SE jeweils nach Massenallokation und nach ökonomischer Allokation gerechnet. Für beide Allokationsverfahren gibt es Gründe; letztlich ist diese Vorgehensweise als durchgängiger Sensitivitätsansatz zu verstehen. Durch die große Bandbreite der Sachbilanzdaten für die Primärrouten der SE zeigt sich in den absoluten Werten eine große Bandbreite bei den Nettoergebnissen. Dabei stellen die Ergebnisse nach Massenallokation die konservativen Varianten dar. Unter Annahme des lastenfreien Eingangs der entsorgten Magnete führen die Ökobilanzergebnisse nach beiden Allokationsverfahren zu relativ gleichen Aussagen. Dies unterstreicht die Robustheit der Ökobilanzergebnisse von MORE und relativiert damit auch Datenunsicherheiten bei den SE-Primärdaten. Eine weitere Sensitivitätsanalyse betraf nach Anregung des Critical Reviewers für Route 3 den Dysprosiumgehalt der generischen NdFeB-Magnetzusammensetzung. Statt 20 Gew% Neodym und 10% Gew% Dysprosium wurden in einer Sensitivitätsanalyse 26 Gew% Neodym und 4% Dysprosium angesetzt. Dies adressiert aktuelle Bemühungen der Industrie den notwendigen Dysprosiumgehalt in NdFeB-Magneten soweit als technisch vertretbar und möglich zu begrenzen. Erwartungsgemäß wurden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung im Falle der Massenallokation nicht beeinflusst. Im Falle der ökonomischen Allokation zeigten sich deutliche Veränderungen, da Dysprosium aufgrund seines hohen Preises besonders hohe Gutschriften liefert. Die Ökobilanz fiel in diesem Fall zwar weniger deutlich positiv aus, bewegte sich jedoch immer noch im positiven Bereich im Sinne des Recyclings.

Schließlich wurde ebenfalls auf Anregung des Critical Reviewers für das Solventextraktionsmittel in Route 3, Verfahren 3 eine Sensitivität hinsichtlich der Vorkette für diese spezielle Verbindung gerechnet. Im Ergebnis zeigte sich trotz ca. doppelt so hoher Vorkettenbelastung für diesen Hilfsstoff kein nennenswerter Einfluss auf das Gesamtergebnis. Dies unterstreicht ebenfalls die Robustheit der Ökobilanzergebnisse.

Fazit und Empfehlungen

Unter den getroffenen Annahmen schneiden alle Routen bei den untersuchten Wirkungskategorien vorteilhaft ab. Die jeweilige Wahl des Verfahrens in der Praxis (Route 1, 2 oder 3) wird vom Verschmutzungsgrad der Magneten und der Marktnachfrage abhängen. Die Ergebnisse basieren (Ausnahme Route 2) jedoch überwiegend auf Labordaten. Skaleneffekte bei Automatisierung und Upscaling, d. h. Minderungspotenziale sind noch

denkbar als auch ggf. erhöhte Aufwendungen für die Motordemontage und Magnetabtrennung im Falle einer Automatisierung. Die Strahlenbelastung wurde aus methodischen Gründen und Datengründen heraus nicht als Wirkungskategorie in den Ökobilanzen quantifiziert. Ungeachtet dessen besteht hier ein weiterer großer ökologischer Vorteil im Falle der Wiederverwendung bzw. dem werkstofflichen oder rohstofflichen Recycling von NdFeB-Magneten gegenüber der Primärroute.

Die vielversprechenden Ökobilanzergebnisse legen den Partnern von MORE nahe, die entwickelten Verfahren (Routen 1 bis 3) weiterzuentwickeln und möglichst zur industriellen Reife zu bringen.

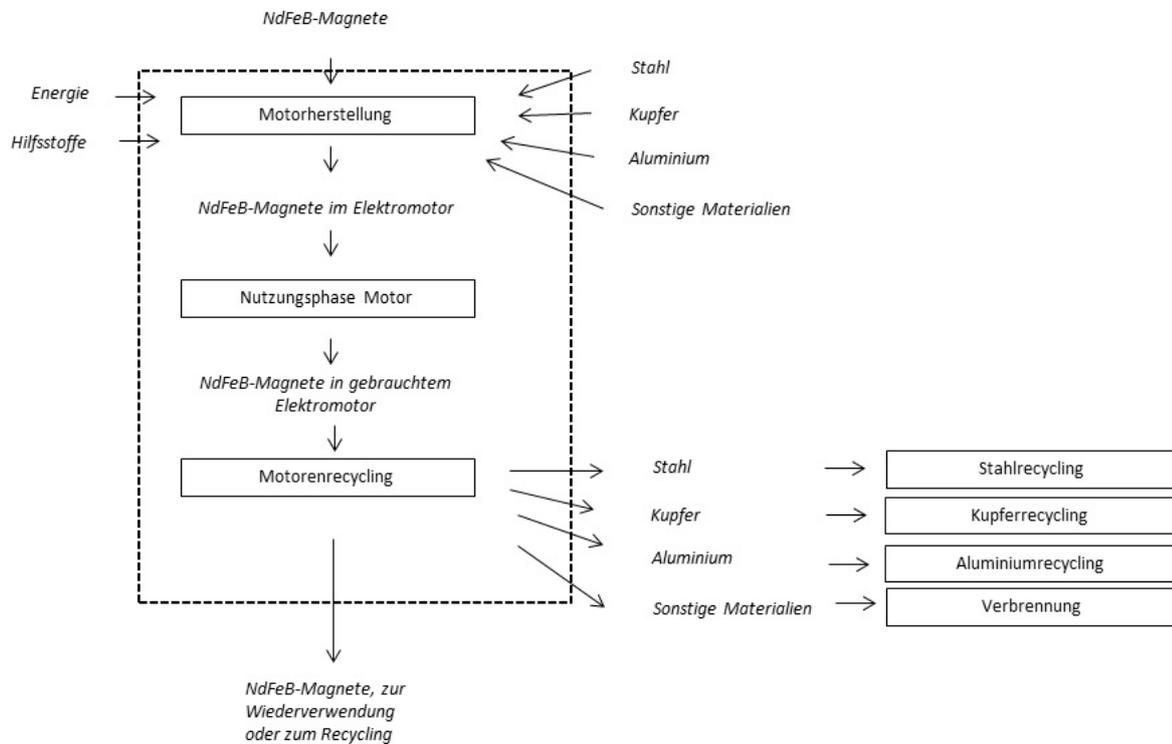
7. Exkurs: Motorherstellung und Recycling

In diesem Exkurs werden die Produktion und das Recycling eines Elektromotors betrachtet.

Die Systemgrenzen der Motorenproduktion umfassen:

- Herstellung eines Elektromotors (inkl. Vorketten für die NdFeB-Magnete und die übrigen Materialien, wie Stahl, Aluminium, Kupfer, usw.)
- Demontage des Motors nach der Nutzungsphase
- Recycling bzw. Entsorgung der Materialien

Abbildung 7-1: Systemgrenzen Motorherstellung, -nutzung und Recycling



7.1. Prozessbeschreibung Motordemontage

Der erste Prozessschritt ist die Demontage des Elektromotors. Zunächst wird der Stator vom Rotor getrennt. Die weitaus meisten Komponenten des Elektromotors (aus Stahl, Aluminium und Kupfer) werden bestehenden Recyclingverfahren zugeführt. Nur geringe Gewichtsanteile (vor allem Kunststoffkomponenten) werden als Reststoffe in Verbrennungsanlagen entsorgt. Die Magnete befinden sich nach diesem Schritt noch auf dem Rotor und werden im nächsten Schritt weiterbehandelt.

Eine detaillierte Beschreibung der Motordemontage findet sich im Gesamtbericht von MORE [Siemens 2014].

In die Sachbilanz der LCA gehen hier folgenden Abfallbehandlungen ein:

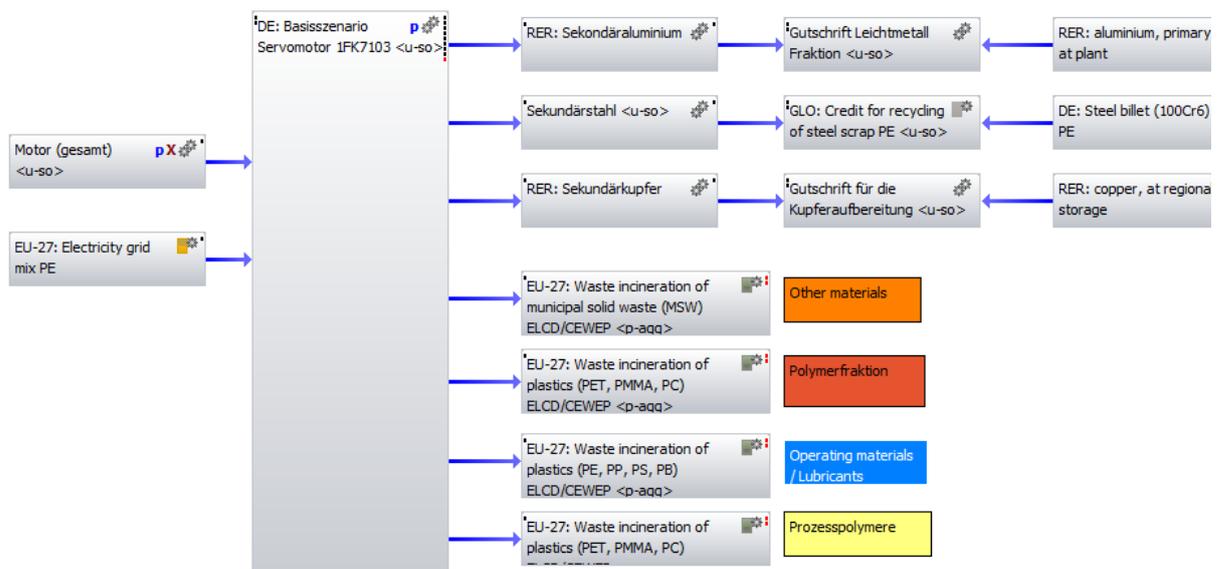
- Aluminium, Kupfer und Stahl werden recyclet. Der metallische Materialanteil am Motorgewicht beträgt 73% des Motorgewichts, dieser steigt bei größeren Motoren auf bis zu ~92%.
- Polymere, Verpackung, Betriebs- und andere Materialien werden in einer konventionellen Hausmüllverbrennung entsorgt (24.3% des Motorgewichts)

- Die später abgetrennten Magnete werden wiederverwendet (2-3% des Motorgewichts, je nach Art und Größe des Motors)

7.2. Datengrundlage Motordemontage

Ein allgemeiner Traktionsmotor wurde mit den Projektpartnern abgestimmt und die Details zu den Komponenten festgelegt.

Abbildung 7-2: Motordemontage mit Metall-Recycling und Abfallverbrennung

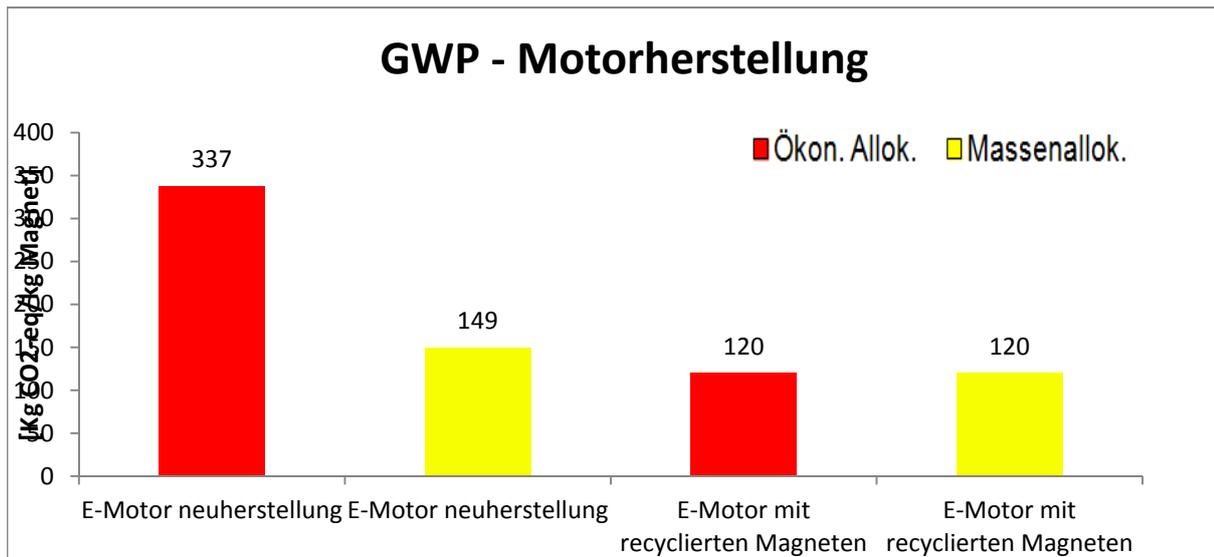


Für die Bilanzierung der Produktion, der Nutzung und des Recyclings von Motoren werden Gutschriften berücksichtigt. Sie werden einerseits aus der thermischen Entsorgung von anfallenden Abfällen (Rotordemontage, Reinigung und Polierung) ermittelt. Andererseits werden Sekundärstahl, Sekundäraluminium und Sekundärkupfer durch inverse Produktion von Primärmaterial berücksichtigt.

7.3. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

7.3.1. Treibhauspotenzial (GWP)

Abbildung 7-3: GWP Vergleich zw. neu hergestellten Motoren und Motoren mit wiederverwendeten Magneten

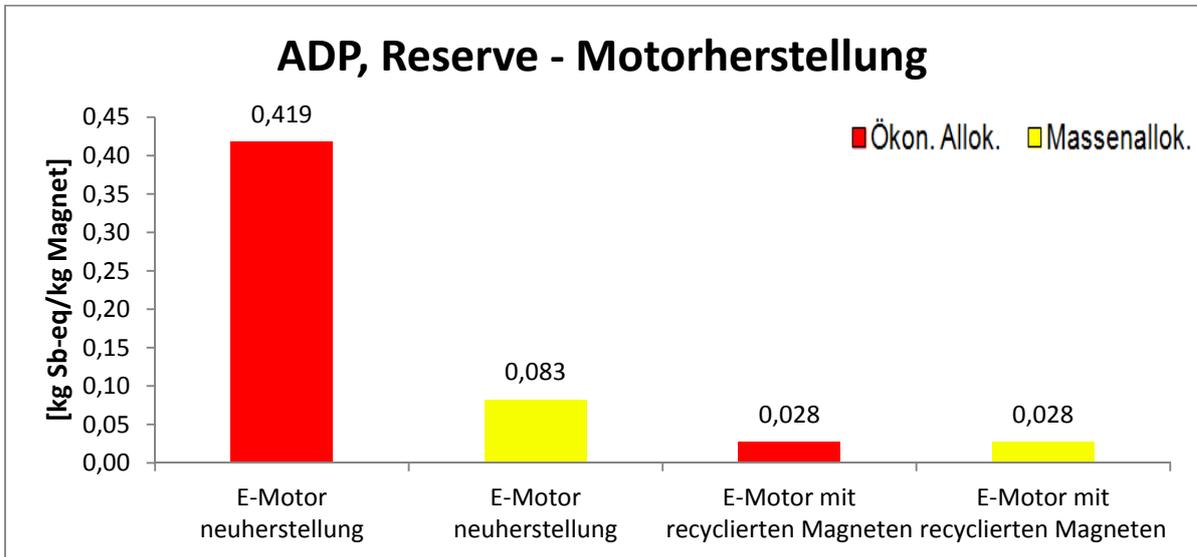


Die Ergebnisse zeigen jeweils den gesamten GWP für die Herstellung eines Elektromotors auf der Ebene von 1kg Magnet. Die Motorneuherstellung geht von Magneten aus der Primärherstellungskette aus. Der rote Ergebnisbalken steht für eine ökonomische Allokation der Primärkette der Seltenen Erden, der gelbe Balken (als Sensitivität) für eine Massenallokation der Primärkette der Seltenen Erden.

Die Differenz zwischen den neu hergestellten Magneten und den wiederverwendeten Magneten ist als Gutschrift berechnet worden. Die Menge, die gutgeschrieben ist, ist bei jeder Allokationsart subtrahiert. Deswegen sind die Ergebnisse bei den Motoren mit wiederverwendeten Magneten gleich. Die ökologische Vorteilhaftigkeit der Motorherstellung mit wiederverwendeten Magneten ist für jede der beiden Allokationsvarianten gegeben. Alle übrigen Komponenten des Elektromotors bestehen nach diesen Bilanzen aus Komponenten (Stahl, Kupfer usw.), die aus der Primärherstellung bereitgestellt wurden.

7.3.2. Elementarer Ressourcenverbrauch (ADP, elem. ultimate reserve)

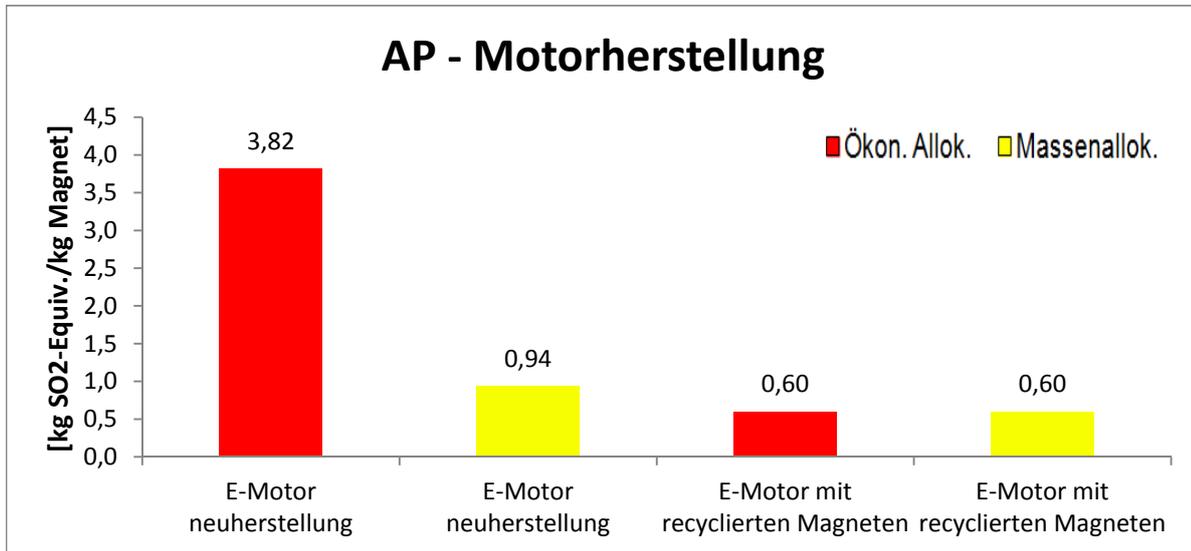
Abbildung 7-4: ADP, elem. ultimate reserve- Vergleich zw. neuhergestellten Motoren und Motoren mit wiederverwendeten Magneten



Der Vorteil von wiederverwendeten Magneten wird durch den ADP-Wert bei der Motorherstellung noch deutlicher im Vergleich zu anderen Wirkungskategorien. Selbst bei Massenallokation zeigt die Motorherstellung mit wiederverwendeten Magneten einen um 66% geringeren ADP-Wert im Vergleich zur Motorneuherstellung.

7.3.3. Versauerungspotenzial (AP) Motorherstellung

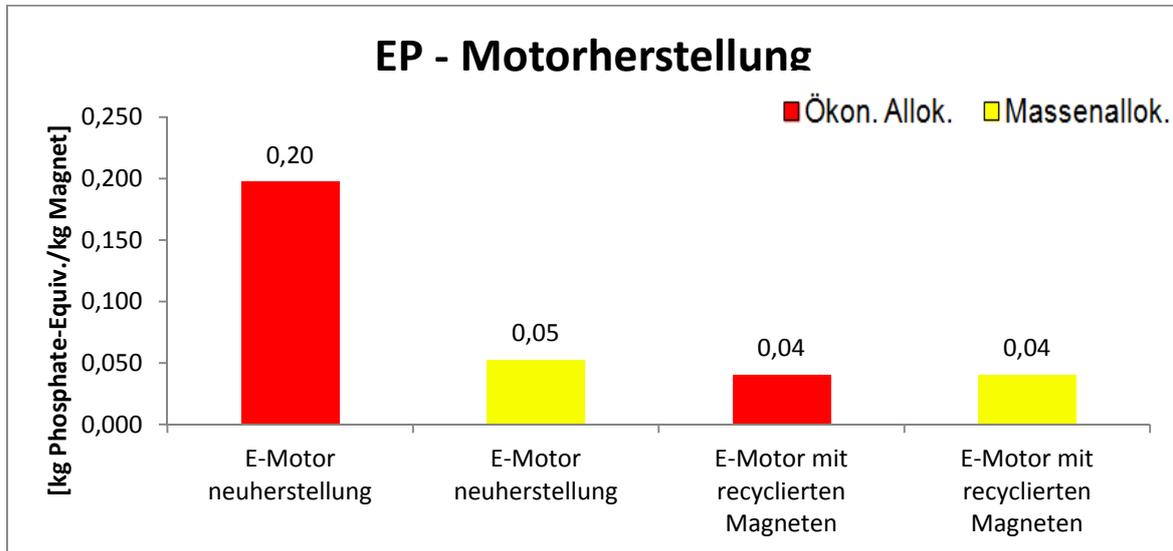
Abbildung 7-5: AP Vergleich zw. neuhergestellten Motoren und Motoren mit wiederverwendeten Magneten



Bei Massenallokation zeigt die Motorherstellung mit wiederverwendeten Magneten ein um 36% geringeres Versauerungspotenzial (AP) im Vergleich zur Motorneuherstellung.

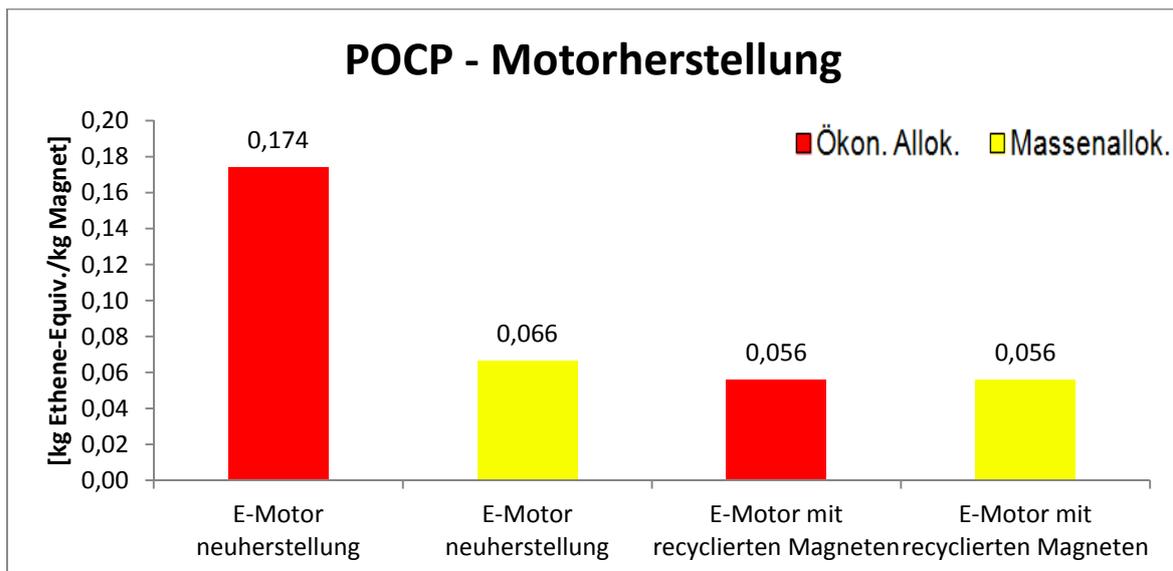
7.3.4. Eutrophierungspotenzial (EP)

Abbildung 7-6: EP Vergleich zw. neuhergestellten Motoren und Motoren mit wiederverwendeten Magneten



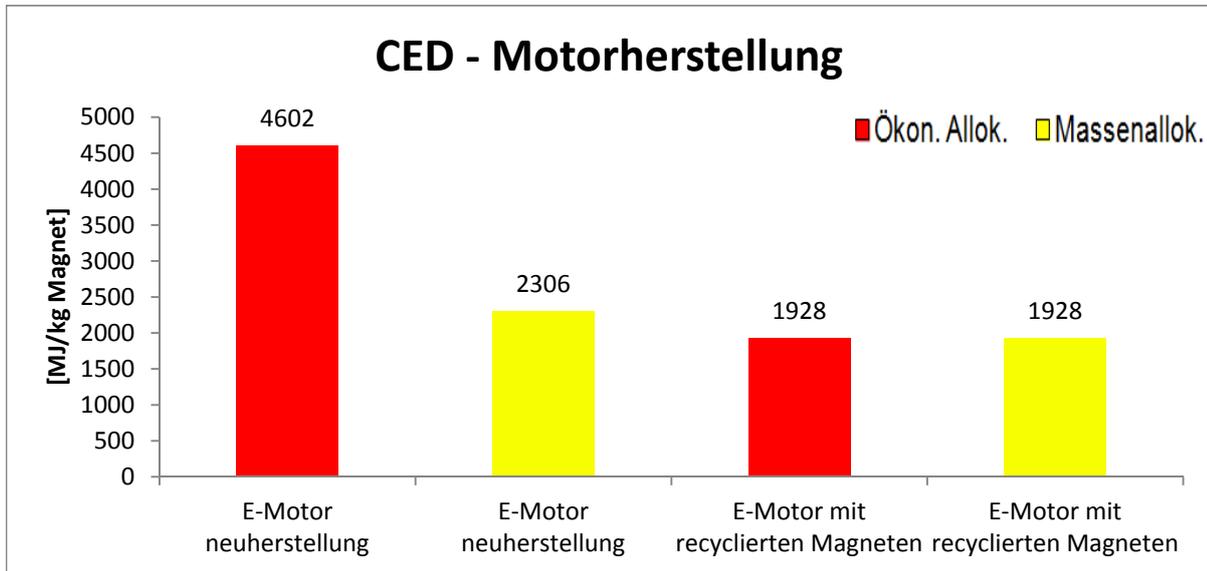
7.3.5. Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)

Abbildung 7-7: POCP Vergleich zw. neuhergestellten Motoren und Motoren mit wiederverwendeten Magneten



7.3.6. Kumulierter Energieaufwand (CED total)

Abbildung 7-8: CED Vergleich zw. Neuhergestellte Motoren und Motoren mit wiederverwendeten Magneten



Die vorherigen Abbildungen für die Ergebnisse zu EP, POCP und Kumuliertem Energieaufwand (CED total) zeigen, dass die Motoren mit recycelten Magneten durchgängig kleinere Umweltwirkungen aufweisen als Motoren, die neue Magnete (aus Primärproduktion) verwenden. Dies gilt sowohl nach ökonomischer als auch nach Massenallokation der Primärherstellung der Seltenen Erden.

8. Literatur

- Binnemans et al. 2013 Binnemans, K.; Blanpain, B.; Buchert, M.; Gerven, T.; Jones, T.; Walton, A.; Yongxian, Y., Recycling of rare earths: a critical review, *Journal of Cleaner Production*, Volume 51, 15 July 2013, Pages 1-22.
- Buchert et al. 2011a Buchert, M.; Jenseit, W.; Merz, C.; Schüler, D. Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LiBRi. Teilprojekt: LCA der Recyclingverfahren. Öko-Institut, Darmstadt, 2011
- Buchert et al. 2011b Buchert, M.; Jenseit, W.; Merz, C., Schüler, D.: Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“(LithoRec). Öko-Institut, Darmstadt, 2011
- CML 2001 Life cycle assessment. An operational guide to the ISO standard; Centre of Environmental Science (CML), Leiden University, 2001
- CML 2002 Oers, L. van, A. de Koning, J.B. Guinée & G. Huppes: Abiotic resource depletion in LCA – Improving characterization factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook. DWW report, 2002
- CML 2010 Database CML-IA v3.7, Institute of Environmental Sciences, Leiden University, Leiden, April 2010;
<http://www.cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>
- Du/Graedel 2011 Du, X.; Graedel, T. E.: Uncovering the global life cycles of the rare earth elements.” *Nature Scientific Reports* 1 (2011): 145. DOI: 10.1038/srep00145
- ecoinvent v2.2 Ökobilanz-Datenbank ecoinvent v2.2; <http://www.ecoinvent.org>; integriert in GaBi v6.0
- EC 2013 European Commission (2013) Commission Recommendation on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of the products and organizations. Annex II: Product Environmental Footprint (PEF) Guide to Commission Recommendation on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of the products and organizations. Official Journal of the European Union Volume 56, L 124, 4.5.2013
- GaBi v6.0 Ökobilanz-Software und Datenbank GaBi v6.0, PE Europe GmbH; <http://www.pe-europe.com>
- Goedkoop et al. 2009 Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., de Schryver, A., Struijs, J. & van Zelm, R., 2009. ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition. Report 1: characterisation.
- Goedkoop/Spriensma 1999 Goedkoop, M.; Spruiensma, R.S., The Eco-indicator 99, a Damage oriented method for LCIA, Ministry VROM, the Hague 1999
- Guinée 1995 Guinée J.B.: *Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products: with a case study on margarines* (PhD thesis). 1995

- Guinée et al. 2001 Guinée J.B., de Bruijn H., van Duin R., Gorrée M., Heijungs R., Huijbregts M.A.J., Huppés G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Sleeswijk A.W., Suh S., de Haes H.A.U.: Life cycle assessment – an operational guide to the ISO standards, part 2b. Centre of Environmental Science (CML), Leiden University, Leiden, 2001
- Guinée et al. 2002 Guinée J.B. (Ed.); Gorrée M.; Heijungs R.; Huppés G.; Kleijn R.; Wegener Sleeswijk A.; Udo de Haes H.A.; de Bruijn J.A.; van Duin R & Huijbregts M.A.J. (2002): Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (<http://www.leidenuniv.nl/cml/lca2/index.html>)
- Hauschild et al. 2008 Hauschild M., Huijbregts M., Jolliet O., Margni M., MacLeod M., van de Meent D., Rosenbaum R.K., McKone T. (2008): Building a model based on scientific consensus for Life Cycle Impact: Assessment of Chemicals: the Search for Harmony and Parsimony. Environmental Science and Technology 42(19), 7032-7036 (<http://dx.doi.org/10.1021/es703145t>).
- Hauschild/Wenzel 1998 Hauschild, M.Z. and Wenzel, H.: Environmental assessment of products. Vol. 2 - Scientific background, 565 pp. Chapman & Hall, United Kingdom, ISBN 0412 80810 2, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA. USA, 1998
- Humbert et al. 2012 Humbert, S.; De Schryver, A.; Bengoa, X.; Margni, M.; Jolliet, O. (2012): IMPACT 2002+ User Guide: Draft for version Q2.21, EPFL, Lausanne, Switzerland
- ILCD 2010 ILCD-Handbook: General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance; European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability; 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
- ISO 2013 ISO/TS 14067:2013 Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification and communication. May 2013
- Klöpffer 2009 Klöpffer, W.; Grahl, B.: Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf; Wiley-VCH, Weinheim, 2009
- Rosenbaum et al. 2008 Rosenbaum R.K., Bachmann T.K., Gold L.S., Huijbregts M.A.J., Jolliet O., Juraske R., Koehler A., Larsen H.F., MacLeod M., Margni M., McKone T.E., Payet J., Schuhmacher M., Van de Meent D., Hauschild M.Z. (2008): USEtox-The UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment. International Journal of Life Cycle Assessment 13(7) 532-546 (<http://dx.doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4>).

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

Annex 1: Externes kritisches Gutachten

Kritische Prüfung der Studie

ÖKOBILANZEN IM PROJEKT MOTOR RECYCLING (MORE)

Auftraggeber:	Öko-Institut e.V. Darmstadt mit Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin
Prüfer:	Prof. Dr. Matthias Finkbeiner, Berlin
Normbezug:	DIN EN SO 14040 (2006): Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen DIN EN ISO 14044 (2006): Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen

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 26.09.2014 vorgelegten Fassung.

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

Prüfungsverfahren

Das Prüfungsverfahren wurde zwischen dem Öko-Institut und der Siemens AG als den Erstellern der Ökobilanz und dem externen Sachverständigen koordiniert. Das Prüfungsverfahren fand parallel zur Durchführung der Ökobilanz statt.

Das Auftakttreffen mit dem Öko-Institut und Siemens fand am 04. März 2014 in Berlin bei Siemens statt. Neben ersten Festlegungen zu Ziel und Untersuchungsrahmen wurden auch der Umfang und der Prozess der Kritischen Prüfung festgelegt. Das zweite Treffen wurde an gleicher Stelle und mit gleicher Beteiligung am 19. Mai 2014 durchgeführt. In diesem Treffen wurden bereits erste, noch vorläufige Ergebnisse präsentiert und die Auswahl von Daten und methodischen Festlegungen der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung besprochen. Ein wesentlicher Aspekt war dabei die Diskussion über eine möglichst konsistente Modellierung und Ergebnisdarstellung der drei Recyclingrouten.

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

Die formale Prüfung auf Normkonformität begann nach Vorlage des ersten Entwurfes des Abschlußberichtes der Studie am 02. Juli 2014. Der Sachverständige hat den Bericht umfassend analysiert und auf Normkonformität geprüft. Die Prüfung ergab insgesamt 73 Hinweise genereller, technischer und redaktioneller Art, die dem Auftraggeber am 20. Juli 2014 übermittelt wurden.

Der zweite, überarbeitete Entwurf des Abschlußberichtes wurde dem Prüfer am 01.09.2014 übermittelt. Die Prüfung des zweiten Entwurfes ergab, dass die Prüfhinweise konstruktiv und umfassend berücksichtigt wurden. Es verblieben nur noch wenige offene Punkt oder Rückfragen, die in Form von 10 weiteren Kommentaren am 11.09.2014 an den Auftraggeber übermittelt wurden.

Die finale Version des Abschlußberichtes wurde dem Prüfer am 26. September 2014 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 von Recyclingverfahren von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben im Rahmen des MORE-Projektes. Den beteiligten Verbundpartnern sollen damit zeitnah die ökologischen Vorteile und Schwachstellen aufgezeigt werden. Die drei untersuchten Verfahren umfassen die Wiederverwendung von gereinigten NdFeB-Magneten, die werkstoffliche Verwertung durch Rückführung des Magnetmaterials und die rohstoffliche Verwertung durch Rückgewinnung von Seltene Erden-Mischoxid bzw. Neodymoxid und Dysprosiumoxid aus gebrauchten Magneten.

Der Fokus der Studie liegt auf dem Recycling, sodass die Primärherstellung und auch die Nutzung der Magnete nicht näher analysiert wurden. Bezüglich der End-of-Life-Modellierung wurde der sog. Recycled-Content-Ansatz gewählt. Die Magnete gehen demnach lastenfrei in die Modellierung ein.

Ein ökobilanzieller Vergleich der verschiedenen in MORE untersuchten Wiederverwendungs- und Recyclingrouten war ausdrücklich nicht Ziel dieser Studie, da die Verfahren jeweils unterschiedliche Qualitäten (z.B. Verunreinigungsgrad) der gebrauchten Magnete adressieren und sich auch die Produkte der Verfahren unterscheiden.

Einzelne Datensätze, insbesondere für Herstellung der Seltenen Erden und die Verteilung der Umweltlasten zwischen verschiedenen Seltenen Erden sowie der mit ihnen gekoppelten Produkte, haben einen starken Ergebniseinfluss, der durch Sensitivitätsanalysen eingeschätzt wurde. Es wird transparent darauf hingewiesen, dass die Ökobilanzergebnisse zu den einzelnen Recyclingverfahren unter dem Vorbehalt bewertet werden müssen, dass die Sachbilanzdaten auf noch nicht serienreifen Einzel- und Laborversuchen beruhen.

Ergebnis

Die Ökobilanz wurde in Übereinstimmung mit ISO 14040 and ISO 14044 erstellt. Die verwendeten Methoden und die Modellierung des Produktsystems sind geeignet, die in der Studie formulierten Ziele zu erfüllen. Der Bericht ist umfassend und beschreibt den Untersuchungsrahmen der Studie in transparenter Weise.



Matthias Finkbeiner
29. September 2014

Annex 2: Verwendete generische Datensätze

Tabelle A-1: Für die MORE-Ökobilanz verwendete generische Datensätze (Route 1)

Zweck	Datensatz	Quelle	Kommentar
Reinigung	DE: Municipal waste water treatment (variable sludge treatment)	Gabi v6.0	Wasserentsorgung
	CH: disposal, hazardous waste, 25% water, to hazardous waste incineration	Ecoinvent v2.2	Ethanol Abfall
	DE: Ethanol PE	Gabi v6.0	pro Batch (3h) etwa 5 – 10 ml Ethanol-Verlust, 1ml Ethanol/Magnet
	EU-27: Process water PE	Gabi v6.0	3 Liter Wasser pro kg SiC
	EU-27: Waste incineration of municipal solid waste (MSW) ELCD/CEWEP	ELCD/CEWEP (inverted)	SiC Abfall
	RER: silicon carbide, at plant	Ecoinvent v221	pro Batch gehen ca. 1 g der jeweiligen Materialien verloren (SiC) nach spätestens 5 Ansätzen sollte das SiC komplett erneuert werden
	DE: Electricity grid mix (production mix)	Gabi v6.0	Leistungsaufnahme Schleifrommel 51 W für 3 Stunden oder 0,000306 kWh/Magnet
Polierung	DE: Municipal waste water treatment (variable sludge treatment)	Gabi v6.0	Wasserentsorgung

			Schleiffrömmel 51 W
	DE: Electricity grid mix (production mix)	Gabi v6.0	1,5h Polierzeit oder 0,000153 kWh/Magnet
	DE: Polyphenylene sulfide granulate (PPS) PE	Gabi v6.0	Einsatzmaterial: 3 g PPS-Granulat*/Magnet Kann wiederverwendet werden pro Batch gehen ca. 1 g der jeweiligen Materialien verloren (PPS)
	EU-27: Process water PE	Gabi v6.0	3 L Wasser (PPS spülen)
	EU-27: Waste incineration of municipal solid waste (MSW) ELCD/CEWEP	Gabi v6.0	PPS Abfall
Motordemontage Gutschriften	RER: aluminium, primary, at plant	Evoinvent v2.2	
	RER: Sekundäraluminium	Ecoinvent v2.2	Leichtmetalle
	US: Old mixed aluminum - scrap credit (open loop) PE <u-so>	Gabi v6.0	
	RER: copper, at regional storage	Ecoinvent v2.21	
	RER: Sekundärkupfer	Ecoinvent v2.2	Nonferrous heavy metals
	Gutschrift für die Kupferaufbereitung <u-so>	Nutzerdefiniert	Aus der Stahlebene genommen; 1:1 verglichen
	DE: Steel billet (100Cr6) PE	Gabi v6.0	

	Sekundärstahl <u-so>	Ecoinvent v2.2	Stahl & Eisen Fraktion + Sondermetalle
	GLO: Credit for recycling of steel scrap PE <u-so>	Gabi v6.0	
	EU-27: Waste incineration of plastics (PET, PMMA, PC) ELCD/CEWEP <p-agg>	ELCD/CEWEP (inverted)	Polymerfraktionen von Rotor
	EU-27: Waste incineration of plastics (PE, PP, PS, PB) ELCD/CEWEP <p-agg>	ELCD/CEWEP (inverted)	Betriebsmaterialien, Schmierstoffe
	EU-27: Waste incineration of municipal solid waste (MSW) ELCD/CEWEP <p-agg>	ELCD/CEWEP (inverted)	Sonstige Materialien
Auspressung/ Abscherung Magnet- abtrennung	GLO: Compressed air 7 bar (low power consumption) PE <u-so>	Gabi v6.0	Druckluftzylinder
	DE: Electricity grid mix (production mix)	Gabi v6.0	Strom für Steuermodule und Infrarotstrahler

Tabelle A-2: Für die MORE-Ökobilanz verwendete generische Datensätze (Routen 2 und 3)

Zweck	Datensatz	Quelle	Kommentar
	Neodym	PE	
	Dysprosium	PE	
	CN: Seltene Erden Oxid-Produktion aus Bastnäsit	ecoinvent v2.2	
Gutschriften	GLO: Kobalt, ab Werk	ecoinvent v2.2, invertiert	
	DE: Schwefelsäure Mix (96%) PE	ecoinvent v2.2, invertiert	
	GLO: Eisenerz, 65% Fe, ab Anreicherung	ecoinvent v2.2, invertiert	
	RER: Transport, Frachter, Binnengewässer	ecoinvent v2.2, invertiert	
	OCE: Transport, Frachter Übersee	ecoinvent v2.2, invertiert	
	RER: Transport, Fracht, Schiene	ecoinvent v2.2, invertiert	
	RER: Steinkohlekoks, ab Werk	ecoinvent v2.2, invertiert	
	UCTE: Steinkohle - Mix, ab Regionallager	ecoinvent v2.2, invertiert	
Energie	DE: Strom Mix PE	GaBi v6.0	
	GLO: Druckluft 7 bar (niedriger Stromverbrauch) PE	GaBi v6.0	
	DE: Koks Mix PE	GaBi v6.0	
	RER: Nutzwärme, Erdgas, ab Industriefeuerung >100kW	ecoinvent v2.2	
Hilfsstoffe	DE: Argon (flüssig) PE	GaBi v6.0	

	DE: Salzsäure Mix (100%) PE	GaBi v6.0
	DE: Natronlauge (Natriumhydroxid) Mix (100%) PE	GaBi v6.0
	DE: Wasserstoffperoxid (100% H2O2) (Wasserstoff aus Steam Reforming) PE	GaBi v6.0
	RER: Natriumsulfat, Pulver, Produktionsmix, ab Werk	ecoinvent v2.2
	RER: Organophosphor-Verbindungen, ab Regionallager	ecoinvent v2.2
	RER: Kerosin, ab Raffinerie	ecoinvent v2.2
	GLO: Chemikalien organisch, ab Werk	ecoinvent v2.2
	RER: Stickstoff, flüssig, ab Werk	ecoinvent v2.2
	RER: Kohlenmonoxid, CO, ab Werk	ecoinvent v2.2
	RER: Butene, gemischt, ab Werk	ecoinvent v2.2
	RER: Wasserstoff, flüssig, ab Werk	ecoinvent v2.2
Wasser	EU-27: Prozeßwasser PE	GaBi v6.0
Abwasser	DE: Kommunale Abwasserbehandlung (Klärschlamm-Verbrennung) PE	GaBi v6.0