

Ökobilanz zum Recycling von Gipsfaserplatten und Synthesegips aus Bleisäurebatterien

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Darmstadt,
16.08.2024

Autorinnen und Autoren

Dr. Matthias Buchert
Dr. Felix Mayer
Julia Schütz

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

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

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Eine Studie im Rahmen des Projektes ***Gipsrecycling 2.0 – Technische Vorbereitung der Verfügbarmachung von Gipsfaserplatten und Synthesegipsen zur Herstellung von RC-Gips – Gips-Rec2.0.***

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Förderrichtlinie „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)

Förderkennzeichen: 33R267C

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis	iii
1. Einleitung	1
2. Ziel und Untersuchungsrahmen	2
2.1. Ziele und Anwendungen der Studie	2
2.2. Festlegung des Untersuchungsrahmens	2
2.2.1. Zu untersuchendes System	2
2.2.2. Funktion und funktionelle Einheit	3
2.2.3. Festlegung der Systemgrenzen	3
2.2.4. Softwareumgebung	4
2.2.5. Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität	4
2.2.6. Technologische Repräsentativität	4
2.2.7. Geographische Repräsentativität	4
2.2.8. Zeitrepräsentativität	4
2.2.9. Umgang mit Allokation	4
2.2.10. Wirkungskategorien	5
2.2.11. Methoden der Auswertung	8
2.2.12. Einschränkungen, Verwendung und Zielgruppen	8
2.2.13. Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts	9
2.2.14. Konformität und kritische Prüfung	9
3. Sachbilanz	10
3.1. Datengrundlage	10
3.2. Modellierung von übergeordneten Prozessen	10
3.2.1. Strommix	11
3.2.2. Wärmemix des verarbeitenden Gewerbes	11
3.2.3. Transportdistanzen	12
3.2.4. Energetische Verwertung in einer Müllverbrennungsanlage	14
3.3. Modellierung der betrachteten Systeme	14
3.3.1. Gipsbereitstellung durch die Verwertung von Gipsfaserplatten	14
3.3.2. Gipsbereitstellung durch die Verwertung von Bleisäurebatterien	17
3.3.3. Gipsbereitstellung aus Rauchgasentschwefelungsanlagen und Naturgips	22
3.4. Einschätzung der Datenqualität	24
3.4.1. Technologische Repräsentativität	24
3.4.2. Geographische Repräsentativität	25

3.4.3.	Zeitrepräsentativität	25
4.	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	25
4.1.	Überblick über die ausgewerteten Wirkungskategorien	25
4.2.	Detaillierte Darstellung der Ergebnisse für ausgewählter Wirkungskategorien	27
4.2.1.	Erderwärmungspotential	27
4.2.2.	Verknappung mineralischer Ressourcen	32
5.	Auswertung der Ökobilanz	33
5.1.	Identifizierung der signifikanten Parameter	33
5.2.	Beurteilung	36
5.2.1.	Vollständigkeitsprüfung	36
5.2.2.	Konsistenzprüfung	37
5.2.3.	Sensitivitätsprüfung	37
5.3.	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	45
5.3.1.	Sensitivitätsanalysen	45
5.3.2.	Einschränkungen	45
5.4.	Fazit und Empfehlungen	46
	Literaturverzeichnis	I
	Anhang	III
	Externes kritisches Gutachten	VII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Schematische Darstellung der Systemgrenzen	3
Abbildung 3-1	Rasterpunkte (10 km x 10 km) und Elektrostahlwerke in Deutschland. Veranschaulichung der kürzesten und zweitkürzesten Entfernung von einem beliebigen Rasterpunkt.	13
Abbildung 3-2	Schematische Darstellung der mechanischen Aufbereitung von Gipsfaserplatten	15
Abbildung 3-3	Prozesskette zur Aufbereitung von EoL GFP zu Gips	17
Abbildung 3-4	Standorte der Verwerter von EoL Bleisäurebatterien und Standortauswahl (geographische Mitte) für gemeinsame Verwertung von Altbatteriesäure	20
Abbildung 3-5	Prozesskette zur Aufbereitung von Altbatteriesäure zu Gips. Fällung mit CaCO_3 (oben) und Ca(OH)_2 (unten)	22
Abbildung 3-6	Prozessketten zur Erzeugung von Gips aus REA von Kohlekraftwerken und Naturgips	23
Abbildung 4-1	Überblick über ausgewertete Wirkungskategorien nach der cut-off Methodik, d.h. ohne Gutschriften nach der Substitutionsmethode (skaliert auf 100 %)	26
Abbildung 4-2	Erderwärmungspotential (GWP) der fünf untersuchten Systeme zur Gipsbereitstellung	28
Abbildung 4-3	Aufschlüsselung des GWP hinsichtlich der Lasten bei dem Prozessschritt „Aufbereitung zu Gips“ im System RC-Gips	29
Abbildung 4-4	Aufschlüsselung des GWP hinsichtlich der Lasten bei dem Prozessschritt „Aufbereitung zu Gips“ im System Synthesegips	30
Abbildung 4-5	GWP bei einer Betrachtung der fünf untersuchten Systeme nach der Substitutionsmethode	31
Abbildung 4-6	Darstellung der Gutschriften, die durch die Verwertung der Sekundärabfälle nach der Substitutionsmethode erteilt werden könnten.	32
Abbildung 4-7	Verknappungspotential mineralischer Ressourcen (MRS) der fünf untersuchten Systeme zur Gipsbereitstellung. Die Gutschriften im System RC-Gips sind nach der Substitutionsmethode gesondert ausgewiesen.	33
Abbildung 5-1	Beitragsanalyse für die fünf untersuchten Systeme und für alle betrachteten Wirkungskategorien. Gutschriften nach der Substitutionsmethode sind separat ausgewiesen.	35
Abbildung 5-2	Auswirkungen der Erhöhung von Transportdistanzen für Naturgips und REA-Gips und eine Verringerung der Transportdistanzen für RC-Gips.	38
Abbildung 5-3	Auswirkungen einer Optimierung bei der Aufbereitung von Altbatteriesäure zu Synthesegips	40
Abbildung 5-4	Erweiterung der funktionellen Einheit um den Sekundärnutzen der Abfallentsorgung. Fall 1 – Verwertung der GFP	41

Abbildung 5-5	Erweiterung der funktionellen Einheit um den Sekundärnutzen der Abfallentsorgung. Fall 1 – Verwertung der GFP	42
Abbildung 5-6	Systembetrachtung unter Berücksichtigung des Sekundärnutzens der stofflichen Verwertung	43
Abbildung 5-7	Auswirkungen der Erweiterung der funktionellen Einheit, um den Sekundärnutzen der Abfallentsorgung in den Systemen RC-Gips und Synthesegips zu berücksichtigen.	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Zusammenfassung der betrachteten Kategorien und deren Robustheit nach Anhängen zur PEF Methode	7
Tabelle 2-2	Ausschlusskriterien für Wirkungskategorien, die nicht innerhalb dieser Studie berücksichtigt wurden	7
Tabelle 3-1	Priorisierung der Datenquellen	10
Tabelle 3-2	Anteile der Energieträger an der Nettostromerzeugung für das Jahr 2022 (Fraunhofer ISE 2022) und spezifische CO ₂ -Emissionen (inkl. Im- und Exporte)	11
Tabelle 3-3	Wärmemix Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden und verarbeitendes Gewerbe (AG Energiebilanzen 2023; AG Fernwärme 2023)	12
Tabelle 3-4	Transportdistanzen in der Modellierung	14
Tabelle 3-5	Berechnung der Allokationsfaktoren für REA-Gips und Kohlestrom	24
Tabelle 5-1	Signifikante Parameter in den betrachteten Systemen	36
Tabelle 5-2	Inputs und Outputs bei der Bilanzierung der Entsorgung einer EoL GFP. Referenzfluss ist 1 t EoL GFP.	41

Abkürzungsverzeichnis

AP	Versauerungspotential (engl. Acidification Potential)
CaCO₃	Chemische Formel für Kalziumkarbonat
Ca(OH)₂	Chemische Formel für Kalziumhydroxid
CO₂-Äq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
EoL	End-of-life
EP	Eutrophierungspotential (engl. Eutrophication Potential)
fE	Funktionelle Einheit
Fe-Metalle	Eisenmetalle
GFP	Gipsfaserplatte
GWP	Erderwärmungspotential (engl. Global Warming Potential)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KEA	Kumulierter Energieaufwand
LU	Landnutzung (engl. Land Use)
Mg	Megagramm (1.000 kg)
MRS	Verknappungspotential mineralischer Ressourcen (engl. Mineral Resource Scarcity)
MVA	Müllverbrennungsanlage
NE-Metalle	Nicht-Eisen Metalle
PM	Feinstaubbildungspotential (engl. Particulate Matter)
POCP	Photochemisches Oxidationsbildungspotential (engl. Photochemical Oxidant Formation Potential)
RER	Europäischer Raum (verwendet innerhalb von ecoinvent-Datensätzen)
TRL	Technologie-Reifegrad (engl.: Technology Readiness Level)

1. Einleitung

Der jährliche Gipsbedarf in Deutschland betrug über die letzten Jahre etwa 10 Mio. Tonnen. Gips wird hauptsächlich für Gipsbauplatten (insb. Gipskartonplatten) benötigt. Der Gipsverbrauch beläuft sich in diesem Segment auf etwa 5 Mio. t. Weiterhin wird Gips für gebrannte Gipsbauprodukte (ca. 3 Mio. t) und in der Zementindustrie (ca. 2 Mio. t) benötigt.

Dieser Bedarf wird größtenteils durch Naturgips und Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) gedeckt. Naturgips wird in Deutschland im Tagebau oder Untertage abgebaut. Bei REA-Gips handelt es sich um das Reaktionsprodukt von Schwefeloxiden mit Kalkmilch¹. Dieser REA-Gips entsteht innerhalb der Rauchgasreinigung von Braun- und Steinkohlekraftwerken. Die Gipsindustrie greift zwar auf zahlreiche weitere Gipsquellen zu, diese decken in Summe aber nur etwa 5 % des Gesamtbedarfs. Dazu zählen neben Synthesegipsen (insb. Gips aus der Flusssäureherstellung oder Gips aus der Fruchtsäureproduktion) auch recycelter Gips oder kurz RC-Gips. Post-consumer Abfälle werden (Stand heute) an vier Aufbereitungsanlagen zu RC-Gips aufbereitet. Dabei handelt es sich bisher ausschließlich um Gipskartonplatten.

Die Gipsindustrie sieht sich perspektivisch mit einer Verknappungsproblematik konfrontiert. Einerseits führt der durch Bundestag und Bundesrat beschlossene Ausstieg aus der Kohleverstromung dazu, dass REA-Gips spätestens ab 2038 in Deutschland als Gipsquelle wegfällt, andererseits wird der Abbau von Naturgips aus naturschutzfachlicher Sicht zunehmend kritisch bewertet. Beim Abbau von Naturgips wird u.a. in den Wasserhaushalt eingegriffen und einzigartige und artenreiche Ökosysteme werden beeinträchtigt. Naturschutzverbände fordern daher bis spätestens 2040 eine Abkehr vom Naturgipsabbau.

Ein Beitrag zur Lösung der Verknappungsproblematik ist die Nutzbarmachung weiterer Stoffströme für die Gipsindustrie. Im Projekt GipsRec 2.0 wird der Fokus auf zwei bisher nicht genutzte Stoffströme gelegt:

- Post-consumer Gipsfaserplatten (GFP) und
- Altbatteriesäure² aus Bleisäurebatterien

GFP sollen ähnlich dem bereits etablierten Gipskartonplattenrecycling mechanisch aufbereitet werden und der Gipsindustrie zur Verfügung gestellt werden. Altbatteriesäure soll mittels Kalkmilch zu Synthesegips aufbereitet werden.

Dieser Ökobilanzbericht quantifiziert die Umweltauswirkungen, die mit der Bereitstellung von Gips aus GFP und Altbatteriesäure einhergehen. Die Umweltauswirkungen sollen im Rahmen einer vergleichenden Ökobilanz den Umweltauswirkungen einer marktrepräsentativen Mischung von Naturgips und REA-Gips gegenübergestellt werden.

¹ Unter dem Wort Kalk werden in diesem Bericht die chemischen Produkte Kalziumkarbonat, Kalziumoxid und Kalziumhydroxid subsumiert.

² Bei der Altbatteriesäure aus Bleisäurebatterien handelt es sich um verdünnte Schwefelsäure.

2. Ziel und Untersuchungsrahmen

In Übereinstimmung mit der ISO 14040/14044 wird die Definition des Ziels und Untersuchungsrahmens als erste Phase einer Ökobilanz (LCA) durchgeführt. Dabei sollen das Ziel und die Zielgruppe der Ökobilanz umrissen werden. Weiterhin soll die Repräsentativität der Studie abgeschätzt werden. Abschließend sind alle methodischen Entscheidungen, die bei der Durchführung der Ökobilanz angesetzt werden offenzulegen. Auch wenn Ökobilanzen heute durch die ISO-Normen 14040 und 14044 formalisiert sind, sind Bilanzierer*innen immer noch mit einer Vielzahl von methodischen Entscheidungen konfrontiert. Dies umfasst beispielsweise die Art der Modellierung, Allokationsfragen, Modellierung der End of Life (EoL) Phase, die Wahl der Systemgrenze und der funktionellen Einheit (fE). Die methodischen Entscheidungen werden in diesem Kapitel konkretisiert.

2.1. Ziele und Anwendungen der Studie

Ziel der Studie ist es die Umweltauswirkungen von alternativen Gipsquellen im Rahmen einer Ökobilanz aufzuzeigen. Bei den alternativen Gipsquellen handelt es sich um Recyclinggips (RC-Gips), der aus Gipsfaserplatten (GFP) zurückgewonnen wird, und um Synthesegips aus Bleisäurebatterien. Die Umweltauswirkungen dieser RC-Gipse sollen derer herkömmlichen Gipsquellen gegenübergestellt werden. Marktmäßig relevante herkömmliche Gipsquellen sind derzeit Naturgips und Synthesegips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA-Gips).

Obwohl Naturschutzaspekte Anlass geben über Alternativen für Naturgips nachzudenken, werden diese nicht quantifiziert, sondern lediglich am Rande qualitativ diskutiert. Weiterhin ist es nicht Ziel der Studie, den derzeitigen Gipsverbrauch zu hinterfragen, Strategien zur Gipsvermeidung aufzuzeigen, auf zukünftige Entwicklungen einzugehen oder alternative Baustoffe aufzuzeigen.

2.2. Festlegung des Untersuchungsrahmens

Im Rahmen dieser Studie werden zwei **Produkt-Ökobilanzen** (RC-Gips aus GFP und Synthesegips aus Bleisäurebatterien) gerechnet, deren Hauptinput Abfallstoffe sind. Diese werden einer Produktökobilanz für REA-Gips und Naturgips im Rahmen einer **komparativen Ökobilanz** gegenübergestellt. Die Bilanzierung wird als **attributive Lebenszyklusanalyse** durchgeführt. Im Gegensatz zu einer handlungskonsequenzorientierten Modellierung werden die untersuchten Produktflüsse nicht als marginale Änderungen des Systems betrachtet und Marktdynamiken (z. B. Verschiebungen des Marktgleichgewichts) werden nicht miteinbezogen. Somit wird mit der attributiven Lebenszyklusanalyse eine Zustandsbeschreibung der Umweltwirkungen eines Produktsystems vorgenommen.

2.2.1. Zu untersuchendes System

Insgesamt werden zwei Produktsysteme für Sekundärgipse, also Gipse aus Abfallstoffen, bilanziert. Innerhalb des ersten Produktsystems durchlaufen separat gesammelte GFP einen mechanischen Aufbereitungspfad zur Erzeugung von RC-Gips. Die Aufbereitung verfolgt die Ausschleusung von Fremdmaterialien (z.B. Kunststoffe, Metalle, nicht-gipshaltige Mineralstoffe) und Papierfasern sowie die Zerkleinerung von GFP zu Mahlgut.

Im zweiten Produktsystem wird die verdünnte Schwefelsäure aus End of Life (EoL) Blei-Säure-Batterien mit Kalkmilch versetzt, um Gips zu erzeugen. Neben der Erzeugung von Synthesegips dient dieser Schritt ebenfalls der Schadstoffentfrachtung. Verunreinigungen der Batteriesäure, insbesondere Schwermetalle, werden nicht im Gips gebunden, sondern verbleiben in der Säure.

2.2.2. Funktion und funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit (fE) ist die **Produktion von 1 Mg Gips**. Zur besseren Vergleichbarkeit handelt es sich bei dem Gips um Kalziumsulfat Dihydrat ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) mit 0 % freiem Wasser. Das Zielprodukt soll dabei die Qualitätsempfehlungen für Recyclinggips, hinsichtlich der Grenzwerte für Schadstoffe und unerwünschte Begleitelemente unterschreiten. Die Erfüllung der Qualitätsempfehlungen erleichtert die Annahme in Gipswerken.

2.2.3. Festlegung der Systemgrenzen

Für beide Produktsysteme beginnt die Bilanzierung mit dem Zeitpunkt, ab dem die GFP beziehungsweise die verdünnte Schwefelsäure aus Altbatterien zu Abfall werden. Nach §3 KrWG ist dies zunächst der Zeitpunkt, ab dem sich der/die Besitzer*in eines Stoffes oder Gegenstandes entledigen will oder entledigen muss. Das „Vorleben“ der Produkte wird nicht betrachtet und die Abfallströme gehen lastenfrei in die Bilanz ein. Für die verdünnte Schwefelsäure aus Altbatterien ist zu beachten, dass es sich dabei bereits um einen Sekundärabfall der Verwertung von Blei-Säure Batterien handelt. Die Verwertung von Blei-Säure Batterien verfolgt derzeit primär das Ziel Blei zurückzugewinnen. Die separierte Schwefelsäure stellt dabei kein Zielprodukt dar und wird i. d. R. keinem hochwertigen Verwertungspfad zugeführt. Daraus wird abgeleitet, dass die verdünnte Schwefelsäure aus Altbatterien lastenfrei in die Bilanz eingeht und die Aufwendungen des Batterierecycling nicht der Schwefelsäure angelastet werden. Die Bilanzierung endet mit der Erzeugung marktfähiger Rezyklate und der vollständigen und gesetzeskonformen Verwertung bzw. Entsorgung aller Sekundärabfälle. Alle benötigten Prozessschritte zur Erreichung dieser Kriterien werden innerhalb der Bilanz berücksichtigt.

Weiterhin werden zwei Vergleichssysteme gerechnet. Hier wird die Gipsbereitstellung durch Naturgips und REA-Gips bilanziert. Bei REA-Gips ist zu beachten, dass die Verbrennung von Kohle (Bereitstellung des Edukts SO_x) sowie die Produktion von Kalkmilch (Bereitstellung des Edukts CaOH_2) zunächst vollständig der Kohlestromerzeugung alloziert wird. Abbildung 2-1 stellt die Systemgrenzen schematisch dar.

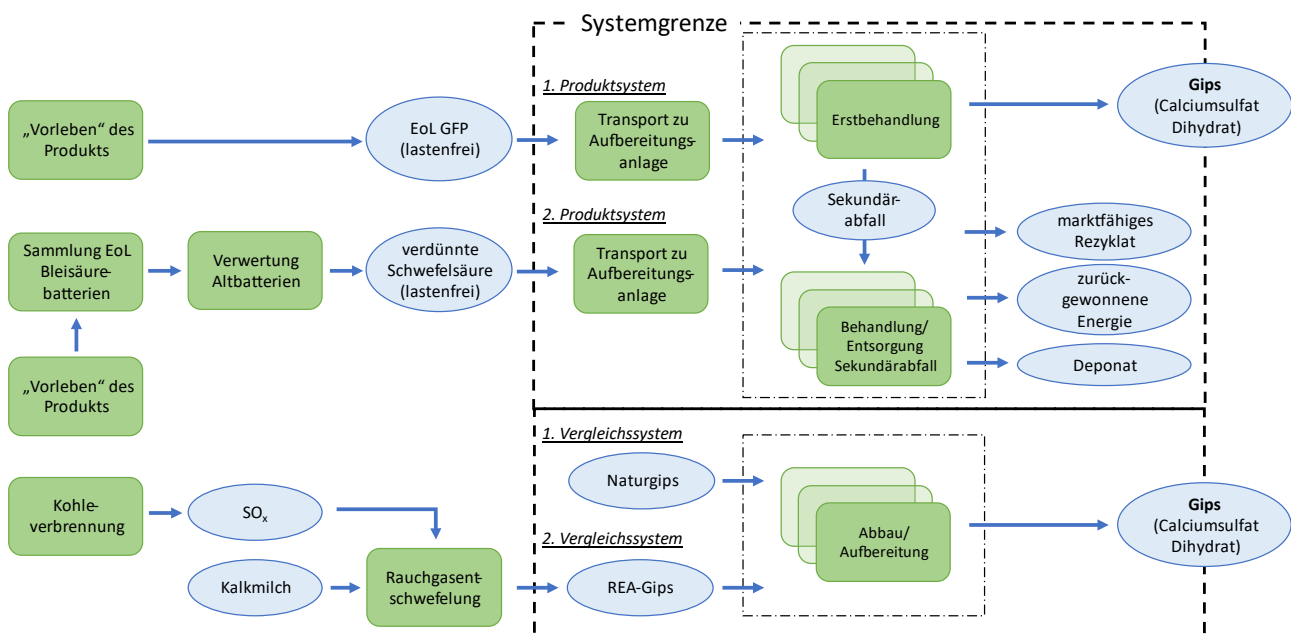


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Systemgrenzen

102 2.2.4. Softwareumgebung

103 Der Kern einer Ökobilanz ist es, Prozesse über deren gesamten Lebenszyklus zu betrachten. Ent-
104 sprechend komplex und umfangreich gestalten sich die Prozessketten, wenn sämtliche Lebenszyk-
105 len eines jeden Prozessschrittes holistisch abgedeckt werden. Daher werden Ökobilanzen heute
106 meist mittels Ökobilanzierungssoftware in Zusammenhang mit integrierten Datenbanken gerechnet.

107 Zur Berechnung der hier vorliegenden Studie wird auf die Softwarelösungen openLCA v. 2.1 (Gre-
108 enDelta 2024a) zurückgegriffen. Die verwendete Datenbank ist die ecoinvent-Datenbank (cut-off, v.
109 3.10, Stand: 2024 (Wernet et al. 2016)) Die Datenbank wird zur Berechnung des Hintergrunds-
110 systems genutzt.

111 2.2.5. Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität

112 Die Bilanz der Systeme zur Verwertung von EoL GFP und Altbatteriesäure soll möglichst auf Pri-
113 märdaten und die Systeme so detailgetreu wie möglich entsprechend der technologischen, geogra-
114 phischen und zeitlichen Repräsentativität abbilden. Für die Vergleichssysteme und Hintergrunds-
115 teme soll auf bereits bestehende Daten aus Literatur und Datenbanken zurückgegriffen werden.

116 2.2.6. Technologische Repräsentativität

117 Die zu untersuchenden Produktsysteme und Vergleichssysteme sollen für den Industriemaßstab
118 bilanziert werden.

119 2.2.7. Geographische Repräsentativität

120 Die Ökobilanz soll den geographischen Bezug Deutschland haben.

121 2.2.8. Zeitrepräsentativität

122 Die Produktsysteme sollen entsprechend des Referenzjahres 2022 bilanziert werden.

123 2.2.9. Umgang mit Allokation

124 Die Bilanz orientiert sich zunächst am cut-off Ansatz. Das bedeutet, die Bilanz wird an dem Punkt
125 abgeschnitten, an dem recycelbares Material das Produktsystem verlässt. Großer Vorteil der cut-off
126 Methodik ist, dass diese deutlich einfacher zu kommunizieren ist als beispielsweise die Allokations-
127 methode in der apos³ oder in der PEF-Variante⁴.

128 In einem zweiten Schritt soll zusätzlich zur Berechnung nach cut-off entsprechend der Substitutions-
129 methode gerechnet werden. Dabei wird der Sekundärnutzen durch Erzeugung von Sekundärroh-
130 stoffen (z.B. aus der Rückgewinnung von Metallen) sowie die Erzeugung von Energie (z.B. aus der
131 energetischen Verwertung von Reststoffen) gesondert als Gutschrift ausgewiesen.

³ apos (engl. Allocation at point of substitution) ist eine Allokationsvariante der ecoinvent Datenbank, bei der die Verant-
wortung für die Abfälle (Belastungen) zwischen den Erzeugern (abgebendes Produktsystem) und den späteren Nut-
zern (aufnehmendes Produktsystem) aufgeteilt wird.

⁴ Die PEF-Methode verwendet spezifische Allokationsfaktoren, um die Lasten zwischen aufnehmenden und abnehmen-
den Systemen aufzuteilen.

Abgesehen von EoL Allokationen sind im Basisfall keine Allokationen im Vordergrundsystem notwendig, da keine multifunktionalen Prozesse betrachtet werden. In Hintergrundprozessen wird die bereits vorhandene Allokation von ecoinvent (cut-off) verwendet⁵.

Wie in 2.2.3 beschrieben, soll eine Ausweisung der Gutschriften erfolgen, wenn durch Sekundärfälle ein nützliches Koppelprodukt erzeugt werden kann. Für zurückgewonnene Energie erfolgt eine Gutschrift gegenüber den Umweltlasten des aktuellen Strom- und Fernwärmemix. Für zurückgewonnene Metalle erfolgt eine Gutschrift gegenüber den Umweltlasten für die Herstellung von Primärmaterial.

2.2.10. Wirkungskategorien

Von den einzelnen Prozessen 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.

Bezüglich der zu betrachtenden Wirkungskategorien führt die Fachliteratur aus: „Da ISO 14044 keine feste Liste von Wirkungskategorien vorgibt, nicht einmal eine Empfehlungsliste, obliegt die Auswahl der Kategorien den Erstellern der Ökobilanz.“ (Klöpffer 2009)

In Anpassung an die Thematik und die bestehenden Fragestellungen wird die Methode Environmental footprint (EF 3.1) aus dem Methodenpack 2.3.1 in openLCA (GreenDelta 2024b) als Methode zur Wirkungsabschätzung ausgewählt. Hinsichtlich der Kategorie „global warming potential“, wird die Methode um die IPCC 2021 | GWP 100 ersetzt, da diese aktueller ist. Zusätzlich wird die Methode um den kumulierten Energieaufwand (KEA) ergänzt⁶. Die Methoden wurden dahingehend angepasst, dass Langzeit (longterm) Emissionen von der Betrachtung ausgeschlossen wurden. Bei allen Methoden erfolgt die Wirkungsabschätzung auf Midpoint-Ebene, d. h. in der Mitte der Wirkungskette bzw. auf Basis umweltwirksamer Stoffe und nicht auf Basis der daraus resultierenden Wirkungen. Die problemorientierten Midpoint-Wirkungsindikatorergebnisse haben den Vorteil einer höheren Datensicherheit und enthalten keine Normierung bzw. Gewichtung.

Folgende Midpoint-Kategorien werden für diese Studie ausgewählt:

Die Berechnung des **Erderwärmungspotentials** (global warming potential - GWP) in Form von CO₂-Äquivalenten wird allgemein anerkannt. Mit dem Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) besteht zudem ein internationales Fachgremium, das sowohl die Methode als auch die entsprechenden Kennzahlen für klimawirksame Substanzen errechnet und fortschreibt. Bei der Berechnung von CO₂-Äquivalenten muss die Verweilzeit der Gase in der Troposphäre berücksichtigt werden. ISO 14067 legt den Bezugszeitraum auf der 100-Jahre-Basis fest und dieser Empfehlung folgen wir.

Eine **Versauerung** kann sowohl bei terrestrischen als auch bei aquatischen Systemen eintreten. Verantwortlich sind die Emissionen säurebildender Abgase. Die Berechnung des Versauerungspotentials (acidification potential - AP) erfolgt in der EF 3.1 Methode in mol H⁺-Äquivalenten.

⁵ Richtigerweise müsste bei Anwendung der Substitutionsmethode auch die Hintergrunddatenbank angepasst werden, da die Substitutionsmethode vom Ansatz her konsequentieller Natur ist.

⁶ Basiert auf der Methode „Cumulative Energy Demand (LHV)“ aus dem Methodenpaket „openLCA LCIA methods 2.3.1“

Die **Eutrophierung** (EP, hier: Eutrophication potential) steht für eine Nährstoffzufuhr im Übermaß, sowohl für Gewässer als auch für Böden. Im vorliegenden Projektzusammenhang wird das terrestrische und aquatische⁷ Eutrophierungspotential betrachtet. Das Eutrophierungspotential von Nährstoffemissionen wird hierbei durch die Aggregation von kg Phosphor-Äquivalenten (EP, Süßwasser), kg Stickstoff-Äquivalenten (EP, marin) und mol Stickstoff-Äquivalenten (EP, terrestrisch) ermittelt.

Die Kategorie **Feinstaub** (fine particual matter formation potential – PM) umfasst primären und sekundären Feinstaub. Primärer Feinstaub entsteht an der Quelle (z. B. durch Verbrennung) und repräsentiert einen Teil des Schwebstaubs, der in seinem Durchmesser wenige Mikrometer aufweist (z. B. PM₁₀=Feinstaub kleiner 10 µm). Sekundärer Feinstaub entsteht durch die Koagulation oder chemische Reaktionen von Molekülen (insbesondere Ammoniak, Schwefel- und Stickoxide) in der Atmosphäre. Die gesundheitlichen Auswirkungen von Feinstaub auf Mensch und Tier sind vielfältig und noch nicht vollständig untersucht. Neben Einflüssen auf die Atemwege und die Lungenfunktion werden dem Feinstaub auch Auswirkungen auf das Herz-Kreislauf-System zugeschrieben. Das Feinstaubpotential wird über die entsprechenden Charakterisierungsfaktoren zu einer Krankheitsinzidenz aggregiert.

Die Kategorie **Bildung von photochemischem Ozon** (photochemical ozone formation - POF) bezieht sich auf den Prozess, bei dem bodennahes Ozon in der Atmosphäre durch chemische Reaktionen entsteht. Diese laufen unter dem Einfluss von Sonnenlicht ab und involvieren in der Regel Vorläufersubstanzen wie Stickstoffoxide (NO_x) oder flüchtige organische Verbindungen (VOCs). Bodennahes Ozon kann schädliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, Pflanzen und die Umwelt haben. Es trägt zur Bildung von sogenannten "Sommer-Smog" bei, der vor allem in urbanen Gebieten auftreten kann. Das POF Potential wird zu kg NMVOC-Äquivalenten⁸ aggregiert.

Die **Landnutzung** (land use – LU) bezieht sich auf die Art und Weise, wie Menschen Landfläche transformieren und nutzen. Dies kann direkte Auswirkungen auf die Umwelt, die Biodiversität und die Ökosystemdienstleistungen haben. Landnutzung kann auf verschiedenste Aktivität zurückgehen, z.B. landwirtschaftliche Praktiken, städtische Entwicklung, Forstwirtschaft, Bergbau aber auch Naturschutz. Die Kategorie LU basiert in der EF 3.1 Methode auf dem LANCA-Modell (Laurentiis et al. 2019). Es wird in der dimensionslosen Einheit pt/(m²*a) aggregiert und berücksichtigt als Indikator den Bodenqualitätsindex⁹.

Die **Verknappung mineralischer Ressourcen** (MRS) bezieht sich auf die potenzielle Erschöpfung oder begrenzte Verfügbarkeit von Mineralien und Metallen. Umweltauswirkungen entstehen durch deren Abbau, den Verbrauch und die Erschöpfung. Die Verknappung von Mineralen und Metallen kann nicht direkt mit einem Umweltschaden in Verbindung gebracht werden. Da diese Ressourcen jedoch endlich und nicht erneuerbar sind, kann ihre Verknappung zu verstärktem Wettbewerb, höherem Energieverbrauch und damit zu einem erhöhten Risiko der Umweltzerstörung führen. Die Ressourcennutzung wird in diesem Fall in kg Antimon-Äquivalenten (Sb-Eq) gemessen.

Der **Verbrauch an energetischen Ressourcen** wird über den Kumulierten Energie-Aufwand (KEA) abgebildet. KEA ist ein Maß für den gesamten Verbrauch an energetischen Ressourcen, die für die Bereitstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung benötigt werden. Im KEA enthalten ist auch der Energiegehalt, der im Produkt selbst enthalten ist. Über den KEA können alle nicht erneuerbaren

⁷ getrennt nach Süßwasser und marinen Systemen

⁸ NMVOC=non-methane volatile organic compounds. Dies sind flüchtige organische Verbindungen exklusive Methan.

⁹ Der Bodenqualitätsindex betrachtet die biotische Produktion des Bodens, Erosionswiderstand, mechanische Filtration und Grundwasserneubildung

210 und erneuerbaren energetischen Ressourcen als Primärenergiewerte ausgewiesen werden. Zur Be-
 211 rechnung wird der untere Heizwert der verschiedenen Energieträger angesetzt. Der KEA wird in der
 212 Einheit MJ angegeben.

213 Zur besseren Einordnung der Kategorien und um die Qualität der errechneten Potentiale einschät-
 214 zen zu können, sollen den betrachteten Kategorien noch die entsprechende Robustheit nach der Pro-
 215 duct Environmental Footprint (PEF) Methode zugeordnet werden. Die Robustheit wird in drei Kate-
 216 gorien von I (hoch) bis III (niedrig) eingeteilt.

217 **Tabelle 2-1 Zusammenfassung der betrachteten Kategorien und deren Robustheit**
 218 **nach Anhängen zur PEF Methode¹⁰**

Kategorie ^a	Unterkategorie	Kürzel	Einheit	Methode	Robustheit
Erderwärmung		GWP 100	kg CO ₂ -Eq	IPCC 2021	I
Versauerung		AP	mol H ⁺ -Eq	EF 3.1	II
Eutrophierung	terrestrisch	EP, t	Mol N-Eq	EF 3.1	II
	marin	EP, m	Kg N-Eq	EF 3.1	II
	Süßwasser	EP, f	Kg P-Eq	EF 3.1	II
Feinstaubbildung		PM	Krankheitsinzidenz	EF 3.1	I
Bildung von photo-chemischem Ozon		POFP	kg NMVOC-Eq	EF 3.1	II
Landnutzung		LU	pt/m ² *a	EF 3.1	III
Ressourcennut- zung	Minerale und Metalle	RU	Sb-Eq	EF 3.1	III
Kumulierter Ener- gieaufwand	gesamt	KEA	MJ	CED (LHV)	Nicht verfü- bar

219 ^{a)} alle Kategorien sind als Potentiale zu verstehen

220 Auf die Betrachtung und Auswertung weitere Kategorien wird in dieser Studie verzichtet. Tabelle 2-2
 221 fasst die Ausschlusskriterien für weitere Wirkungskategorien zusammen.

222 **Tabelle 2-2 Ausschlusskriterien für Wirkungskategorien, die nicht innerhalb dieser**
 223 **Studie berücksichtigt wurden**

Wirkungskategorie	Ausschlusskriterium
Öko- und Humantoxizität	Die Wirkungsabschätzung der Toxizität setzt weiterhin auf lineare Zusammenhänge zwischen Emissionen und Wirkungen. Die Ergebnisse dieser Wirkungskategorien sind aus diesem Grund nicht ausreichend belastbar, weshalb fundierte Aussagen auf Basis der schlechten Datenlage bzw. Methodik nicht möglich sind.

¹⁰ https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:75e0de0f-5e6d-11ec-9c6c-01aa75ed71a1.0011.02/DOC_2&format=PDF

Wirkungskategorie	Ausschlusskriterium
Abbau der stratosphärischen Ozonschicht	Die Freisetzung ozonzersetzender Stoffströme kann keinem Prozess des Vordergrundsystems zugeordnet werden und findet im betrachteten System nicht in einer relevanten Größenordnung statt. Die Relevanz der entsprechenden Wirkungskategorie ist für diese Studie somit nicht gegeben ist daher für die Betrachtung dieser Studie nicht relevant.
Ionisierende Strahlung	Innerhalb des Vordergrundsystems wird keine relevante Menge hochenergetischer Strahlung freigesetzt. Die Relevanz der entsprechenden Wirkungskategorie ist für diese Studie somit nicht gegeben.
Wasserverbrauch	In der Kategorie Wasserverbrauch wird nicht nach Qualität des Wassers (z. B. Flusswasser, oberflächennahes Grundwasser, fossiles Wasser etc.) und Art der Nutzung (z. B. Kühlwasser, Wasserkraft, Trinkwasser etc.) differenziert. Durch die Auswertung dieser Kategorie wird kein Mehrwert generiert, vielmehr wird es zu einem Indikator, wie viel Wasserkraft innerhalb eines Systems genutzt wird. Dies ist nicht spezifisch für das betrachtete System und führt für alle betrachteten Optionen zu Ergebnissen einer ähnlichen Größenordnung. Damit ist diese Kategorie für diese Studie nicht relevant.

224 Eine Normierung mit globalen Jahresemissions- bzw. Verbrauchswerten als optionaler Bestandteil
225 der Wirkungsabschätzung wird in dieser Studie nicht durchgeführt. Ebenso werden keine Ordnungs-
226 und Gewichtungsverfahren verwendet.

227 2.2.11. Methoden der Auswertung

228 Die Auswertung wird entsprechend der in ISO 14040 und ISO 14044 geforderten Bestandteile durch-
229 geführt. Diese umfasst:

- 230 • Identifizierung der signifikanten Parameter auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz
231 und Wirkungsabschätzungsphasen der Ökobilanz;
- 232 • eine Beurteilung, die die Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen berücksich-
233 tigt;
- 234 • Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen.

235 2.2.12. Einschränkungen, Verwendung und Zielgruppen

236 Die Ökobilanz kann nur zu den beschriebenen Wirkungskategorien Aussagen treffen, jedoch nicht
237 über Naturschutzaspekte. Mit Hinblick auf die Wirkungskategorien mit einer sehr geringen Robust-
238 heit ist nochmals zu vermerken, dass die quantifizierten Ergebnisse nur eine verminderte Aussage-
239 kraft haben. Weitere Einschränkungen ergeben sich durch die Datengrundlage. Da die untersuchten
240 Systeme noch keine Marktreife erreicht haben, diese aber nach dem Ex-Ante Ansatz für den indust-
241 riellen Maßstab bilanziert werden soll, müssen Daten teilweise modelliert oder abgeschätzt werden.

242 Die Ökobilanz ist frei zugänglich. Die Zielgruppe ist aber insbesondere die Bau- und Abfallbranche,
243 die sich mit Gips als Baustoff befasst oder mit der Entsorgung von gipshaltigen Baustoffen zu tun
244 hat.

245

246 **2.2.13. Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts**

247 Die Art und der Aufbau des Berichts orientieren sich an den vier Phasen einer Ökobilanz (Zieldefi-
248 nition, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung, Auswertung). Nach Abschluss des Projekts soll dieser
249 Bericht als Ganzes publiziert werden.

250 **2.2.14. Konformität und kritische Prüfung**

251 Die vorliegende Ökobilanz wurde entsprechend den einschlägigen Vorgaben der ISO 14040 und
252 ISO 14044 durchgeführt. Für die unabhängige Überprüfung der angesetzten Methodik und der auf
253 den Ergebnissen getroffenen Bewertung und Schlussfolgerungen wurde eine kritische Prüfung
254 durch Dr. Andreas Ciroth durchgeführt. Er kann auf einschlägige und umfassende Kenntnisse und
255 Erfahrungen in den methodischen Anforderungen an Ökobilanzen und der Abfallwirtschaft, insbe-
256 sondere Recycling, verweisen. Die Prüfung erfolgte gemäß Abschnitt 6.2 der ISO 14044 begleitend
257 zur Studie. Das, die Prüfaussage enthaltende, Gutachten wird in den Anhang des Berichtes aufge-
258 nommen.

259

3. Sachbilanz

Zunächst soll in diesem Kapitel auf die Datengrundlage eingegangen werden. Anschließend wird die Modellierung von übergeordneten Datensätzen beschrieben. Darunter fällt die Modellierung von Strom und Wärme sowie die Modellierung von nicht spezifizierten Transportdistanzen. Anschließend werden die Sachbilanzdaten der verschiedenen Systeme zur Gipsbereitstellung dargelegt. Entsprechend Ziel und Untersuchungsrahmen müssen Daten für folgende Produktsystem erhoben werden:

- Gipsbereitstellung durch die Verwertung von GFP
- Gipsbereitstellung durch die Verwertung von Altbatteriesäure (Synthesegips)
- Gipsbereitstellung aus Naturgips
- Gipsbereitstellung aus REA (Synthesegips)

3.1. Datengrundlage

Um die Produktsysteme zur Verwertung von GFP und Altbatteriesäure möglichst repräsentativ bilanzieren zu können, wird prioritär auf Primärdaten aus dem operationellen Betrieb (GFP) und Labordaten (Synthesegips aus Batteriesäure) zurückgegriffen. Falls Realdaten nicht verfügbar sind, werden diese über stöchiometrische Berechnung und Literaturdaten ergänzt oder aus generischen Datensätzen der ecoinvent Datenbank abgeleitet. Falls nicht anders möglich werden qualifizierte Schätzungen oder eigene Modellierungen durchgeführt, um unbekannte Parameter zu bilanzieren. Tabelle 3-2 fasst zusammen, in welcher Priorität Daten des Vordergrundsystems erhoben werden.

Tabelle 3-1 Priorisierung der Datenquellen

Priorität	Datenquelle
1	Primärdaten aus dem industriellen Betrieb (RC-Gips aus GFP) Labordaten (Synthesegips aus Batteriesäure)
2	Stöchiometrische Berechnungen Literaturdaten / Datenbanken
3	Eigene Modellierungen Qualifizierte Schätzungen

Für die beiden Vergleichssysteme werden keine eigenen Datenerhebungen durchgeführt. Es wird hier auf bereits bekannte Sachbilanzdaten aus Datenbanken zurückgegriffen.

3.2. Modellierung von übergeordneten Prozessen

Die Energiebereitstellung ist bei Recyclingprozessen in der Regel von zentraler Bedeutung. Gleichzeitig werden aktuelle Daten zum Strom- und Wärmemix nur verzögert über die Hintergrunddatenbank (in diesem Fall der ecoinvent Datenbank) bereitgestellt. Daher werden diese Datensätze für alle Systeme spezifisch nachmodelliert.

287 3.2.1. Strommix

288 Der deutsche Strommix unterliegt ständigen und raschen Veränderung. Dies liegt nicht zuletzt an
 289 der Auswirkung der Energiewende. Der in ecoinvent hinterlegte Strommix, also die Anteile der ein-
 290 zelnen Energieträger bzw. Stromarten, entspricht trotz regelmäßiger Updates nicht dem aktuellen
 291 Stand. Daher wird der deutsche Strommix inklusive Umspannungs- und Verteilungsverlusten sowie
 292 Im- und Exporten für das Jahr 2022 nachmodelliert. Der Strommix des Jahres 2022 ist in Tabelle
 293 3-2 dargestellt. Zu beachten ist, dass die Zusatzaufwände pro bereitgestellter kWh gerechnet wer-
 294 den. Dies gilt auch für die Umspannungsverluste. Da in ecoinvent kein Umwandlungsprozess Nie-
 295 der- auf Mittelspannung vorhanden ist, wurde für die Solarenergie der gleiche Umwandlungsverlust
 296 wie für Hoch- auf Mittelspannung angenommen. Aus diesem Grund wird der Umspannungsaufwand
 297 auf alle Stromerzeugungsanlagen mit Hoch- und Niederspannung angewandt.

298 **Tabelle 3-2** **Anteile der Energieträger an der Nettostromerzeugung für das Jahr 2022**
 299 **(Fraunhofer ISE 2022) und spezifische CO₂-Emissionen (inkl. Im- und Ex-**
 300 **porte)**

Energieträger	Anteil am Strommix
Abfall	1,6%
Biogas	5,0%
Biomasse	2,5%
Braunkohle	18,4%
Erdgas	13,0%
Kernenergie	5,6%
Öl	0,9%
PV	10,1%
Steinkohle	9,9%
Wasser	2,8%
Wind, offshore	4,2%
Wind, onshore	16,6%
Importe ^a	9,5%
Summe	100,0 %
Spezifische CO ₂ -Eq	485 g CO ₂ -Eq/kWh _{el}

301 ^{a)} In Deutschland belief sich die Stromerzeugung im Jahr 2022 auf 544 TWh, davon wurden 75,8 TWh exportiert und
 302 49,3 TWh importiert. Der Stromverbrauch beläuft sich im Jahr 2022 damit auf 517,2 TWh. Die Importe beziehen sich auf
 303 den Stromverbrauch

304 3.2.2. Wärmemix des verarbeitenden Gewerbes

305 Der Wärmemix des Jahres 2022 für das verarbeitende Gewerbe wird nach den AG Energiebilanzen
 306 (2023) bzw. AG Fernwärme (2023) bilanziert. Dieser Wärmemix wird in allen Prozessschritten an-
 307 gesetzt, in denen keine anderen Angaben zum Wärmemix vorhanden sind.

308

Tabelle 3-3 Wärmemix Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden und verarbeitendes Gewerbe (AG Energiebilanzen 2023; AG Fernwärme 2023)

Energieträger	Anteil am Strommix
Steinkohle	18,5 %
Braunkohle	5,0 %
Mineralöle	4,9 %
Gase	48,7 %
Erneuerbare Energien	9,0 %
Sonstige Energieträger	4,3 %
Fernwärme	9,6 %
Steinkohle	26,2 %
Braunkohle	2,4 %
Heizöl	2,4 %
Erdgas	54,2 %
Feste Biomasse	2,6 %
Biogas/Deponiegas	2,0 %
Abfall	7,9 %
Andere	2,2 %
Summe	100,0 %
Spezifische CO ₂ -Eq	81,8 g CO ₂ -Eq/MJ _{th}

3.2.3. Transportdistanzen

Für Transportdistanzen, für die keine expliziten Zahlen vorliegen, müssen Transportdistanzen abgeschätzt werden. Die Transportentfernungen basieren auf der Entfernung einer Behandlungsanlage von einem beliebigen Punkt in Deutschland. Zu diesem Zweck wurden alle Behandlungsanlagen, die für einen bestimmten Abfallstrom relevant sind, zusammengestellt. Zweitens wurde ein äquidistantes Raster von 10 km über Deutschland gelegt. Von jedem dieser Rasterpunkte wurde die Transportentfernung (tatsächliche Entfernung, nicht lineare Entfernung) zu jeder Behandlungsanlage berechnet. Die Transportentfernung wurde über die Bing-API abgerufen. Von jedem Rasterpunkt wurde die kürzeste und zweitkürzeste Entfernung zu einer Behandlungsanlage ermittelt. Abbildung 3-1 stellt das Modell exemplarisch am Beispiel von Stahlschrott dar, welcher an Elektrostahlwerke angeliefert wird.

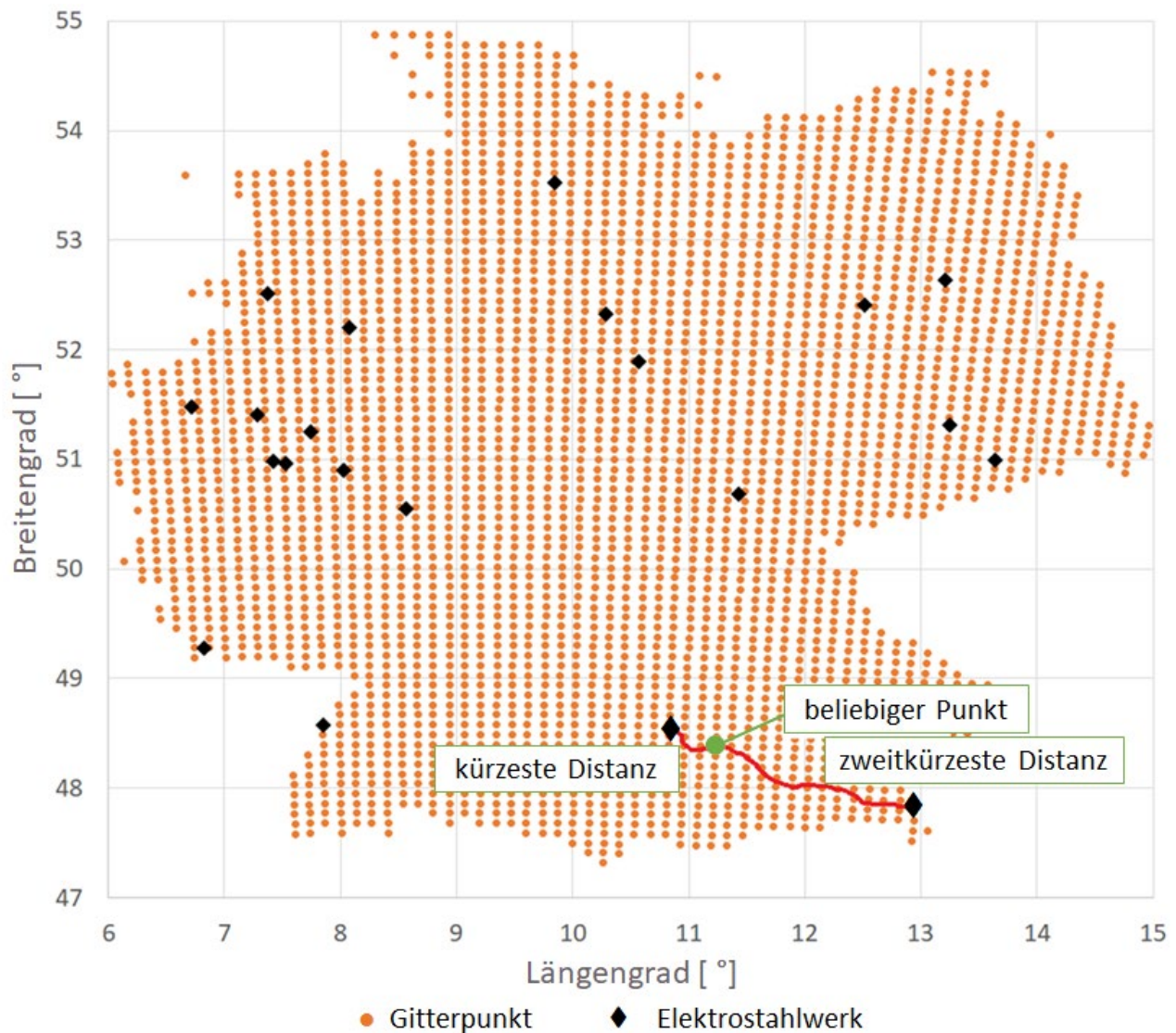


Abbildung 3-1 Rasterpunkte (10 km x 10 km) und Elektrostahlwerke in Deutschland. Veranschaulichung der kürzesten und zweitkürzesten Entfernung von einem beliebigen Rasterpunkt.

Da davon ausgegangen wurde, dass Abfälle nicht immer zur nächstgelegenen Behandlungsanlage transportiert werden, wurde im Modell die zweitkürzeste Entfernung zugrunde gelegt. Wirtschaftliche Kosten oder Einnahmen, die in der Behandlungsanlage gezahlt oder erzielt werden, veranlassen die Entsorgungsdienstleister, nicht immer die nächstgelegene Behandlungsanlage zu wählen. Die Wahl der zweithöchsten Anlage stellt einen konservativen Ansatz dar, der im Rahmen der Ökobilanz angewandt werden sollte. Die kürzesten und zweitkürzesten Entfernungen für die relevanten Behandlungsstandorte sind in Tabelle 3-4 zusammengestellt.

Tabelle 3-4 Transportdistanzen in der Modellierung

Transportdistanz zu ...	Kürzeste Distanz	Zweitkürzeste Distanz (im Modell verwendet)
...einer MVA	45 km	75 km
...einem Elektro-Stahlwerk	101 km	166 km
...einem Refiner für Aluminium	133 km	188 km
...einer Deponie (keine Daten vorhanden - Schätzung)		40 km
... andere		200 km

3.2.4. Energetische Verwertung in einer Müllverbrennungsanlage

Im Rahmen dieser Studie werden verschiedene Stoffströme über einer Müllverbrennungsanlage (MVA) verwertet. Bei der Modellierung der MVA werden lastenseitig die direkten Emissionen der Verbrennung sowie Hilfs- und Betriebsstoffe (z.B. Ammoniakwasser zur Entstickung oder Kalkmilch für die Entschwefelung des Rauchgases) bilanziert. Gutschriften werden für die bereitgestellte Energie vergeben.

Die Modellierung der energetischen Verwertung von Abfällen basiert auf der Elementarzusammensetzung der Abfallströme. Aus der Elementarzusammensetzung lassen sich Heizwert, Rauchgasvolumen und -zusammensetzung sowie die Menge an benötigten Betriebsmitteln und Sekundärabfällen (Stäube/Schlacken) berechnen. Da die Verbrennung von Abfällen in dieser Studie nur eine sehr untergeordnete Rolle einnimmt, soll auf eine ausführliche Beschreibung des Modells an dieser Stelle verzichtet werden und es wird auf Bulach et al. (2022) verwiesen.

Innerhalb einer MVA wird Strom und Wärme produziert. Für MVA werden nach Flamme et al. (2018) folgende Nettowirkungsgrade (bezogen auf den Heizwert des Abfalls) angesetzt:

- Thermisch: 33,3 %
- Elektrisch: 11,3 %

Werden Strom und Wärme nach der Substitutionsmethode gutgeschrieben, erfolgt dies gegenüber dem deutschen Strom- und Wärmemix.

3.3. Modellierung der betrachteten Systeme

Nachfolgend wird die Modellierung der untersuchten Systeme dargestellt. So weit wie möglich werden spezifische Emissionen, Stoffstromdaten und Energieverbrauchsdaten für die einzelnen Prozessschritte genannt.

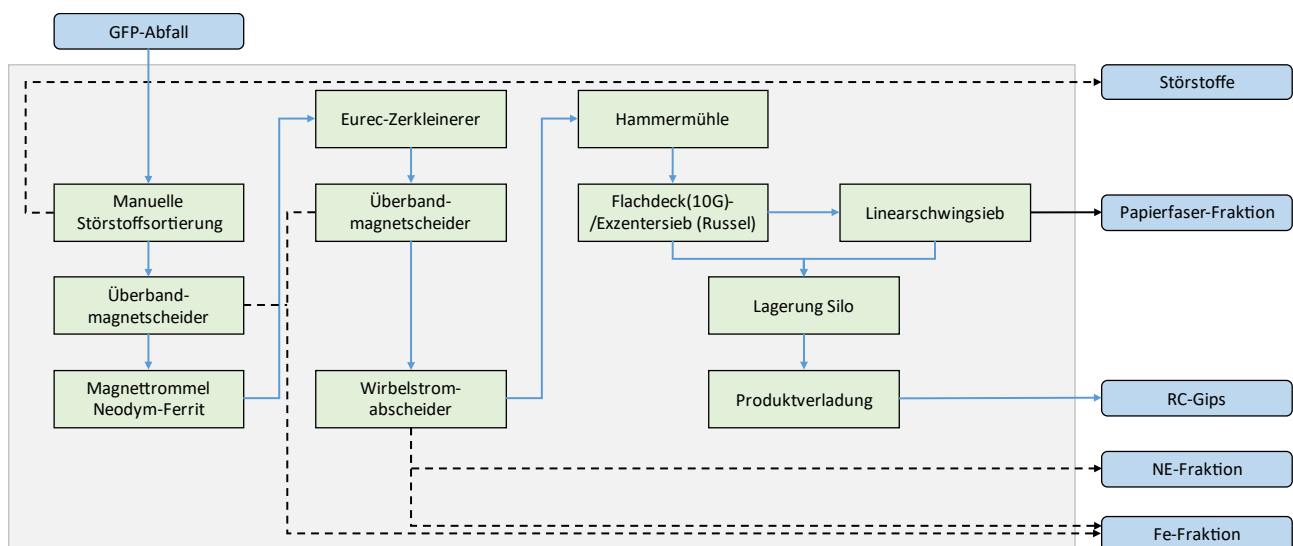
3.3.1. Gipsbereitstellung durch die Verwertung von Gipsfaserplatten

Bei dem Abfallstrom GFP handelt es sich um Gips, welcher mit Zellulosefasern (etwa 10-20 Masse-% der GFP) verstärkt wird. Da es sich in dieser Studie post-consumer Abfälle betrachtet werden, sind neben der eigentlichen GFP auch noch Fremdstoffe in diesem Stoffstrom vorhanden.

363 Diese können mineralische Stoffe sein (z.B. Fliesenanhaltungen), Metalle (z.B. Putzleisten) oder
 364 Kunststoffe (z.B. aus Steckdosen).

365 Für die Modellierung des GFP-Recyclings wird die Anlage der MUEG in Großpösna betrachtet. Hier
 366 werden GFP zunächst mittels LKW zur Gipsrecyclinganlage transportiert. Der Einzugsradius der
 367 betrachteten Gipsrecyclinganlage beträgt 200 km. Daraus lässt sich ableiten, dass die mittlere Trans-
 368 portdistanz vom Abfallentstehungsort bis zur Recyclinganlage 169 km beträgt¹¹. Angeliefertes Ma-
 369 terial durchläuft eine mehrstufige mechanische Aufbereitung mit dem Ziel Gips möglichst vollständig
 370 von Fremdmaterialien zu befreien. Bei der mechanischen Aufbereitung werden neben Eisenmetallen
 371 und Nicht-Eisen-Metallen (NE-Metalle) auch mineralische Störstoffen und Kunststoffe abgetrennt.
 372 Darüber hinaus werden die Papierfasern der Platte in einer papierfaserreichen Fraktion akkumuliert.
 373 Abbildung 3-2 zeigt einen Überblick über die Aggregate der mechanischen Aufbereitung.

374 Für die mechanische Aufbereitung wird elektrische Energie für die verschiedenen Aggregate benö-
 375 tigt. Weiterhin wird der Betrieb eines Baggers (inkl. Dieserverbrauch) bilanziert, der EoL GFP in die
 376 Anlage befördert.



377

378 **Abbildung 3-2 Schematische Darstellung der mechanischen Aufbereitung von Gipsfaser-**
 379 **platten**

380 Die separierten Störstoffe werden verschiedenen Entsorgung-/Verwertungspfaden zugeführt:

- 381 - Mineralische Störstoffe (5 Massen-% bezogen auf das Inputmaterial) werden auf einer De-
 382 ponie abgelagert. Hierzu wird der ecoinvent Prozess „treatment of inert waste, inert material
 383 landfill – CH“ herangezogen.
- 384 - Eisenmetalle (0,4 Massen-% bezogen auf das Inputmaterial) werden zu einen Elektrostahl-
 385 ofen transportiert und dort stofflich verwertet. Die Bilanzierung des Recyclingprozess lehnt
 386 sich an den Prozess „steel production, electric, low-alloyed“ an. Die Verluste bei der Aufbe-
 387 reitung wurden nach Haupt et al. (2018) mit knapp 10 % angesetzt¹².
- 388 - NE-Metalle (0,1 Massen-% bezogen auf das Inputmaterial) werden vereinfacht als Alumi-
 389 nium gewertet. In der Bilanz werden sie über einen Refiner verwertet. Der ecoinvent Prozess

¹¹ In einem Umkreis von 200 km wird von einem beliebigen Punkt die Transportdistanz berechnet (siehe zur Methodik auch 3.2.3).

¹² Nach Haupt et al. (2018) werden aus 1,105 kg Stahlschrott wird 1 kg Stahl erzeugt

- 390 „treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at refiner | aluminium,
391 cast alloy – RER“ wird für diesen Zweck herangezogen. Die Verluste bezogen auf die Input-
392 menge an Aluminium wird mit 5 Massen-% festgesetzt (Buchert et al. 2022).
- 393 - Die aussortierte Kunststofffraktion (5 Massen-% bezogen auf das Inputmaterial) besteht zu
394 90 % aus Kunststoffen, 7 % Mineralik und 3 % Wasser. Diese Fraktion wird der energeti-
395 schen Verwertung in einer MVA zugeführt.
- 396 - Die papierreiche Fraktion (18,3 Massen-% bezogen auf das Inputmaterial) besteht überwie-
397 gen aus Papier (~80%) und Gips (~20%). Auch dieser Abfallstrom wird derzeit noch energe-
398 tisch über eine MVA verwertet. Perspektivisch bietet sich hier auch ein Recycling des Ab-
399 fallstroms an. Dieser Weg wurde jedoch nicht in der Bilanz betrachtet.
- 400 Nach der mechanischen Aufbereitung steht eine Gipsfraktion zur Verfügung, die frei von Störstoffen
401 ist. Vorbehaltlich, dass die Qualitätsanforderungen für RC-Gips erfüllt sind, kann der RC-Gips an ein
402 Gipswerk (Transportdistanz=80 km) transportiert werden. Zu diesem Zeitpunkt hat der Gips noch
403 eine Restfeuchte von 3 Massen-% (Jahresmittel). Um eine Vergleichbarkeit zwischen den anderen
404 Pfaden zur Gipsbereitstellung herzustellen, wird als letzter Schritt der Prozesskette ein Trocknungs-
405 schritt bilanziert. Dieser kann als „virtuelle Trocknung“ verstanden werden, der Teil der Kalzinierung
406 ist. Für die Trocknung kann nach Heindl (2016) und Bennamoun et al. (2013) eine Trocknungsener-
407 giemenge in Höhe von 920 kWh thermisch und 60 kWh elektrisch pro Tonne verdampftem Wasser
408 angesetzt werden. Die Energiebereitstellung erfolgt nach dem Wärmemix des verarbeitenden Ge-
409 werbes bzw. dem deutschen Strommix, siehe Kapitel 3.2.
- 410 Die vollständige Prozesskette ist in Abbildung 3-3 dargestellt. In der Abbildung ist auch angegeben,
411 wo der cut-off zum nachfolgenden Produktsystem angesetzt wird.

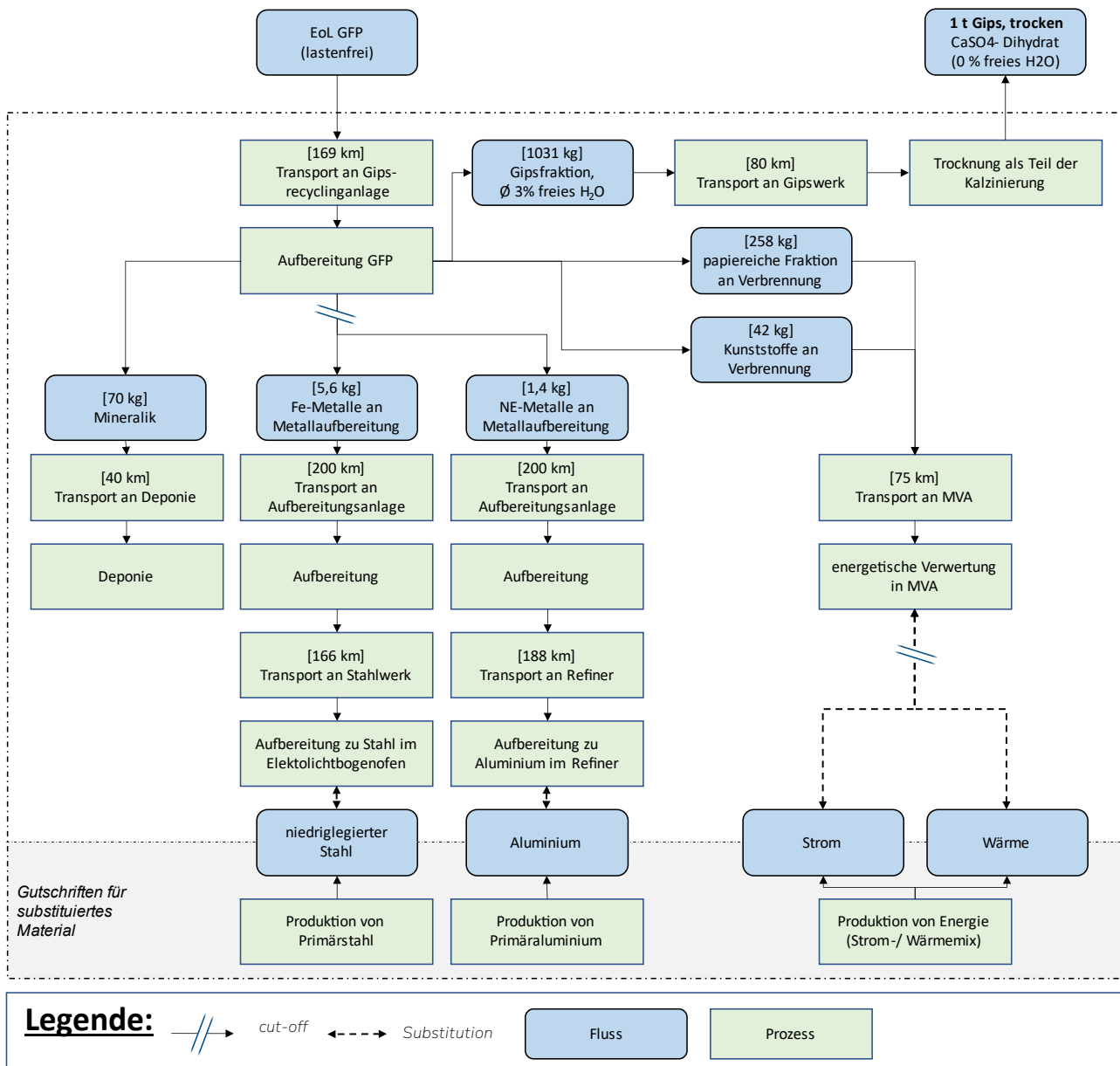


Abbildung 3-3 Prozesskette zur Aufbereitung von EoL GFP zu Gips

3.3.2. Gipsbereitstellung durch die Verwertung von Bleisäurebatterien

Bleisäurebatterien werden am Ende ihres Lebenszyklus in Deutschland einem Recycling zugeführt. Ziel des Recyclings ist es Blei zurückzugewinnen. Die enthaltene Altbatteriesäure¹³ ist dabei ein Nebenprodukt der Aufbereitungskette. Bei der Säure aus Bleisäurebatterien handelt es sich um verdünnte Schwefelsäure deren Säureanteil in Abhängigkeit vom Batterietyp unterschiedlich sein kann und in der Regel ca. 30 %-40 % beträgt. Üblicherweise ist die Entsorgung der Altbatteriesäure mit Entsorgungskosten verbunden. Ausgangspunkt dieses Systems ist es die Altbatteriesäure stofflich zu nutzen und daraus Gips zu synthetisieren. Bei Altbatteriesäure handelt es sich um einen Abfallstrom ohne Marktwert. Er geht lastenfrei in das betrachtete System ein.

¹³ Vereinfacht wird die in EoL Bleisäurebatterien enthaltene Säure in diesem Bericht als Altbatteriesäure bezeichnet.

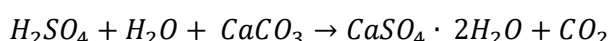
424 Ergebnisse aus Laborversuchen

425 Die Modellierung zur Synthesegipserzeugung aus Altbatteriesäure basiert größtenteils auf Labor-
426 versuchen (mit einer Altbatteriesäure mit einem Säureanteil von 19% ¹⁴) und stöchiometrischen Be-
427 rechnungen. Um die Modellierung nachvollziehen zu können, sollen zunächst die chemischen Re-
428 aktionen zur Synthesegipserzeugung dargelegt werden.

429 Um aus Schwefelsäure (H₂SO₄) Gips (CaSO₄·2H₂O) zu synthetisieren, muss der Säure ein Kalzi-
430 umhaltiges Fällungsmittel zugegeben werden. In der Modellierung werden zwei Varianten betrach-
431 tet, die Fällung mit Kalziumcarbonat (CaCO₃) und die Fällung mit Kalziumhydroxid (Ca(OH)₂). Die
432 Reaktionsgleichungen der Säure mit den genannten Fällungsmitteln ist in Gleichung 1 und Gleichung 2
433 gegeben.

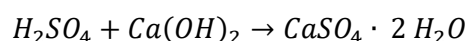
Kalziumkarbonat als Fällungsmittel

Gleichung 1



Kalziumhydroxid als Fällungsmittel

Gleichung 2



434

435 Zahlreiche Laborversuche wurden durchgeführt, um Reaktionen entsprechend der Reaktionsglei-
436 chungen möglichst vollständig und optimiert zu erwirken. Durch Versuche im Labormaßstab konnten
437 die Ergebnisse zur Gipsfällung optimiert werden. Die Versuche liefern folgende Erkenntnisse:

- 438 - Eine Rühdauer von 5 Stunden ohne zusätzliche Wärmezugabe liefert die besten Ergeb-
439 nisse.
- 440 - Die Produktreinheit von Gips verbessert sich, wenn die Schwefelsäure nicht vollständig mit
441 dem Fällungsmittel reagiert. Es zeigt sich, dass bei einer vollständigen Fällung auch Schwer-
442 metalle oder andere Unreinheiten in die Gipsphase übergehen würden. Ein Teil der Säure
443 verbleibt in der Ausgangslösung. Es wird für die verbleibende Ausgangslösung ein pH-Wert
444 von 1-2 angestrebt.
- 445 - Um die Kristallbildung zu Gipskristallen zu initiieren, müssen Impfkristalle zugegeben wer-
446 den. Pro kg Altbatteriesäure werden ca. 4 g Impfkristalle zugegeben. Es wurden Versuche
447 mit Kalziumsulfatdihydrat p.a. sowie mit REA-Gips und RC-Gips als Impfkristalle durchge-
448 führt.
- 449 - Die Gipsphase kann nach Abschluss der Reaktionszeit von der Ausgangslösung durch Filt-
450 ration getrennt werden. Bei filtriertem Gips ist mit einem Wassergehalt ähnlich wie REA-Gips
451 zu rechnen. Das heißt im industriellen Maßstab lässt sich durch Filtration ein Wassergehalt
452 von 9 % im Gips erzielen (vgl. Kapitel 3.3.3).
- 453 - Es lässt sich ein Reinheitsgrad von ca. 96 Massen-% erzielen.

454

¹⁴ Über verschiedene Phasen der Bleisäurebatterie nimmt die Schwefelsäurekonzentration ab. Dazu zählt die Nutzungsphase, die Aufbereitung der Bleisäurebatterie in der EoL-Phase sowie die Lagerung der Altbatteriesäure.

455 Bilanzierung der Gipsfällung

456 Auf Grundlage der Laborversuche und stöchiometrischen Berechnungen kann eine Stoffstrombilanz
 457 für die Synthese zu Gips aus Altbatteriesäure aufgestellt werden. Diese ist in Gleichung 3 und Gleichung 4
 458 für die beiden betrachteten Fällungsmittel dargestellt.

Kalziumkarbonat als Fällungsmittel

verd. Schwefelsäure: $587,3 \text{ kg H}_2\text{SO}_4 + 2503,6 \text{ kg H}_2\text{O} +$

Kalziumkarbonat in Wasser: $602,1 \text{ kg CaCO}_3 + 5794,1 \text{ kg H}_2\text{O} +$

Impfkristalle: $11,3 \text{ kg CaSO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow$

Gleichung 3

Gips (9% H_2O): $1000 \text{ kg CaSO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O} + 98,9 \text{ kg H}_2\text{O} +$

Abwasser: $8119,8 \text{ kg H}_2\text{O} + 24 \text{ kg H}_2\text{SO}_4 + 47,1 \text{ kg (CaSO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O})^* +$

Abgas: $255,6 \text{ kg CO}_2$

Kalziumhydroxid als Fällungsmittel

verd. Schwefelsäure: $595,6 \text{ kg H}_2\text{SO}_4 + 2539,0 \text{ kg H}_2\text{O} +$

Kalziumhydroxid in Wasser : $445,7 \text{ kg Ca(OH)}_2 + 5813,7 \text{ kg H}_2\text{O}$

Impfkristalle: $11,5 \text{ kg CaSO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow$

Gleichung 4

Gips (9% H_2O): $1000 \text{ kg CaSO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O} + 98,9 \text{ kg H}_2\text{O} +$

Abwasser: $8306,5 \text{ kg H}_2\text{O} + 32,4 \text{ kg H}_2\text{SO}_4 + 47,1 \text{ kg (CaSO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O})^*$

459 * liegt in dissoziierter Form vor

460 Die Bereitstellung des Fällungsmittels Kalziumkarbonat wird über den ecoinvent Prozess „lime pro-
 461 duction, milled, loose - Europe without Switzerland“ bilanziert. In der ecoinvent Datenbank gibt es
 462 weiterhin auch einen Prozess für die Bereitstellung von hochreinem Kalziumkarbonat¹⁵ (market for
 463 calcium carbonate, precipitated – RER). Auf Grundlage der Versuchsdaten wird davon ausgegangen
 464 werden, dass kein hochreines Kalziumkarbonat für die Fällung notwendig ist. Trotzdem soll dieser
 465 Fall als Variante gerechnet werden. Die Bereitstellung von Kalziumhydroxid erfolgt über den ecoin-
 466 vent Prozess „lime production, hydrated, loose weight – CH“.

467 Da die Reaktion in geschlossenen Reaktoren abläuft, werden keine Wasserdampfverluste bilanziert.
 468 Bei der Fällung mit Kalziumkarbonat entsteht Kohlenstoffdioxid, welches als Emission an die Luft
 469 bilanziert wird.

470 Abwasserbehandlung

471 Nach der Fällungsreaktion fällt Abwasser in hohen Mengen an. Dieses enthält noch Schwefelsäure
 472 in geringen Mengen. In der Modellierung wird angenommen das die verbleibende Schwefelsäure

¹⁵ Beschreibung des ecoinvent Prozesses: „[...] Die erste Reaktion ist das Brennen von Kalkstein oder Kesselstein zur Gewinnung von Branntkalk und Kohlendioxid: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$; Branntkalk wird dann [mit Wasser versetzt], um Kalkmilch zu erhalten: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$; In einem dritten Schritt wird die Kalkmilch mit CO_2 (Nebenprodukt von Reaktion 1) karbonisiert. Da Calciumcarbonat in Wasser unlöslich ist, fällt es aus: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 \downarrow + \text{H}_2\text{O}$ “ (Wernet et al. 2016)

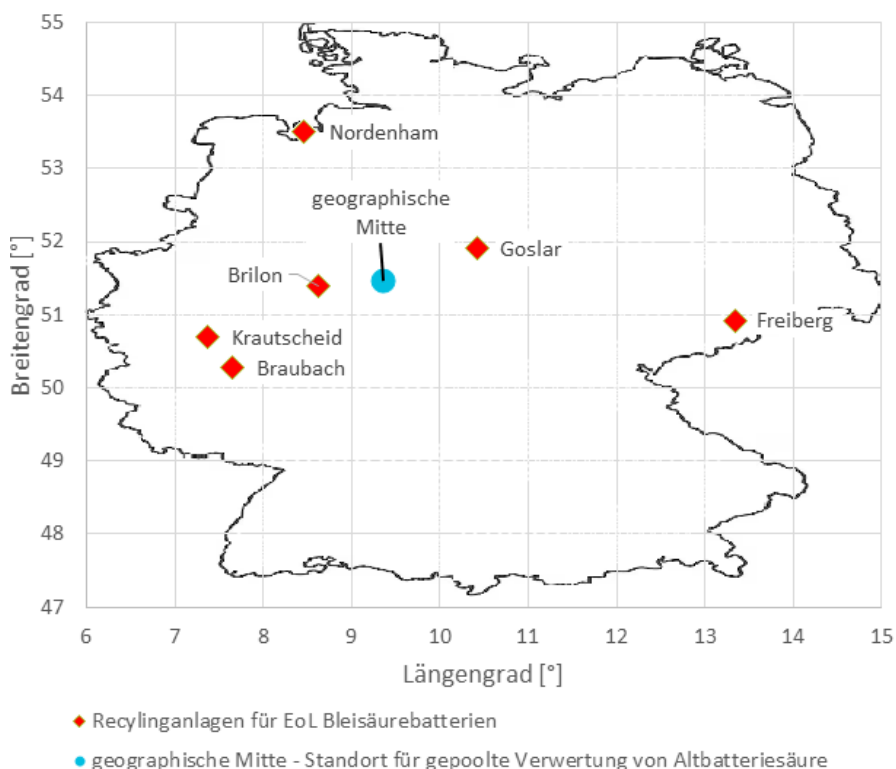
mit Natronlauge neutralisiert wird und dann als Abwasser in einer Kläranlage behandelt wird (*market for wastewater, average - Europe without Switzerland*). Den enthaltenen Schwermetallen wird keine Rechnung getragen.

Energieverbräuche

Bei der Modellierung der Fällungsreaktion wurde hinsichtlich des Energieverbrauchs keine zusätzliche Wärmeenergie angesetzt. Es wird lediglich ein Strombedarf von 0,08 kWh/t Suspension für Pumpen und ein Rührwerk bilanziert¹⁶. Im Anschluss an die Reaktion wird der entstandene Gips abfiltriert. Hierbei wird wie bei REA-Gips (siehe Kapitel 3.3.3) eine Vakuumfiltration vorgeschlagen. Der Gips hat nach der Filtration eine Restfeuchte von 9 Massen-%.

Transporte

Hinsichtlich der Bilanzierung der Transporte besteht große Unsicherheit. In der Modellierung wird generisch davon ausgegangen, dass alle Verwerter von EoL Bleisäurebatterien in Deutschland die Altbatteriesäure sammeln und gepoolt zu Gips weiterverarbeiten. Derzeit gibt es in Deutschland sechs Standorte für die Verwertung von Altbatteriesäure¹⁷. Soll die Altbatteriesäure gemeinsam an einem Ort verwertet werden, eignet sich die geographische Mitte der sechs Standorte der Verwerter. Abbildung 3-4 zeigt die sechs Standorte der Verwerter von EoL Bleisäurebatterien und die geographische Mitte. Die mittlere Transportdistanz von den Verwertern von Bleisäurebatterien bis zur Aufbereitungsanlage von Altbatteriesäure beträgt in diesem Fall rund 250 km. Der Transport von der Aufbereitungsanlage zum Gipswerk wird mit 50 km abgeschätzt.



492

Abbildung 3-4 Standorte der Verwerter von EoL Bleisäurebatterien und Standortauswahl (geographische Mitte) für gemeinsame Verwertung von Altbatteriesäure

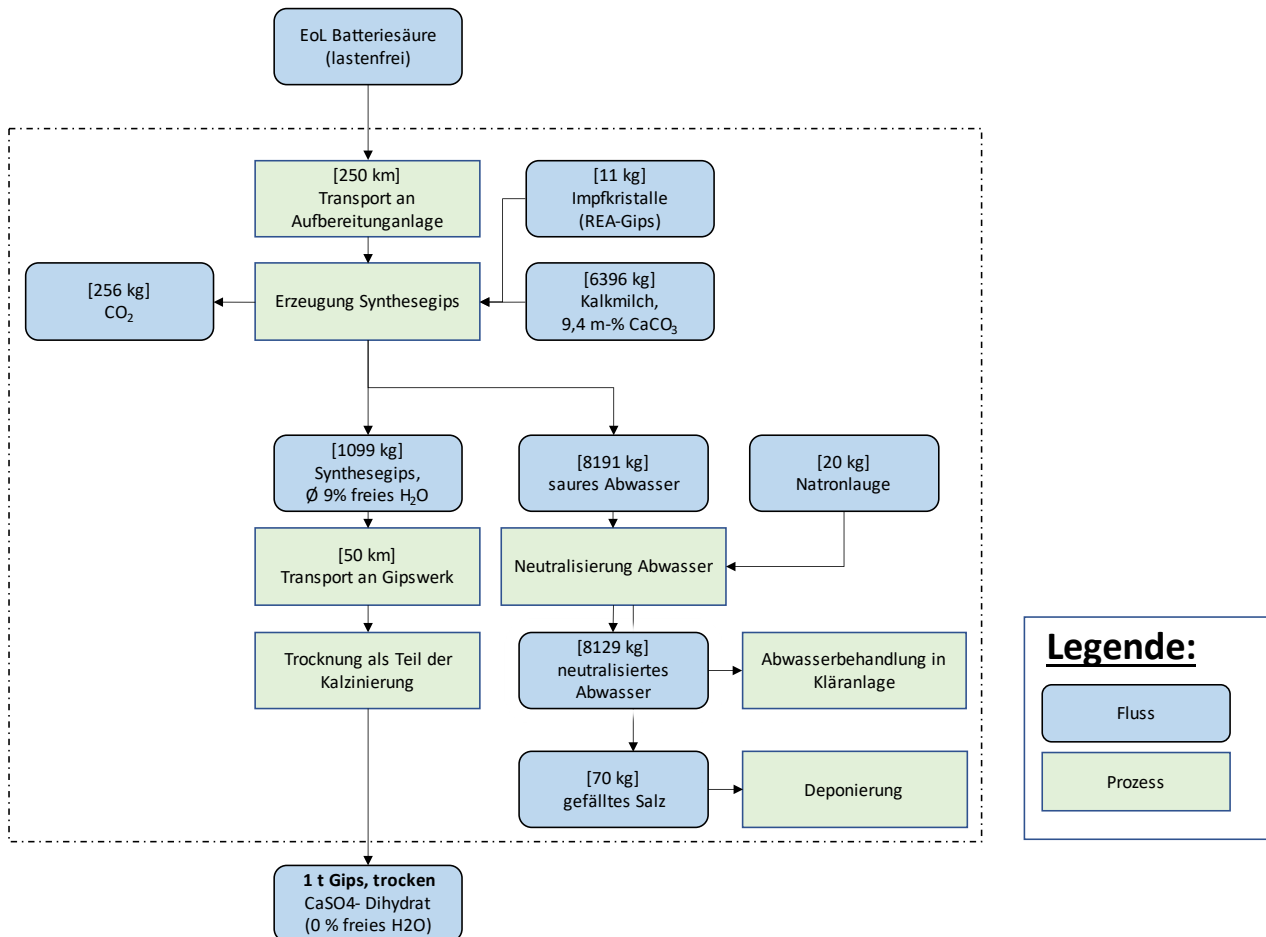
494

¹⁶ Es werden zwei Förderpumpen (eine fördert zum Reaktor, eine aus dem Reaktor) angesetzt und ein Ankerrührer.

¹⁷ Freiberg, Braubach, Goslar, Nordenham, Krautscheid und Brilon

Modellierung der gesamten Prozesskette

Zusammenfassend wird die Prozesskette nochmal in Abbildung 3-5 für die zwei Fällungsmittel dargestellt. Altbatteriesäure wird zunächst zur Aufbereitungsanlage transportiert und dort entweder mit Kalziumkarbonat oder Kalziumhydroxid gefällt. Daran schließt sich eine Vakuumfiltration an. Das leichte saure Abwasser wird mit Natronlauge neutralisiert und in ein Klärwerk eingeleitet. Der feuchte Gips wird zu einem Gipswerk transportiert und ähnlich wie im vorherigen Fall (siehe Kapitel 3.3.1) auf einen Wassergehalt von 0 Masse-% getrocknet.



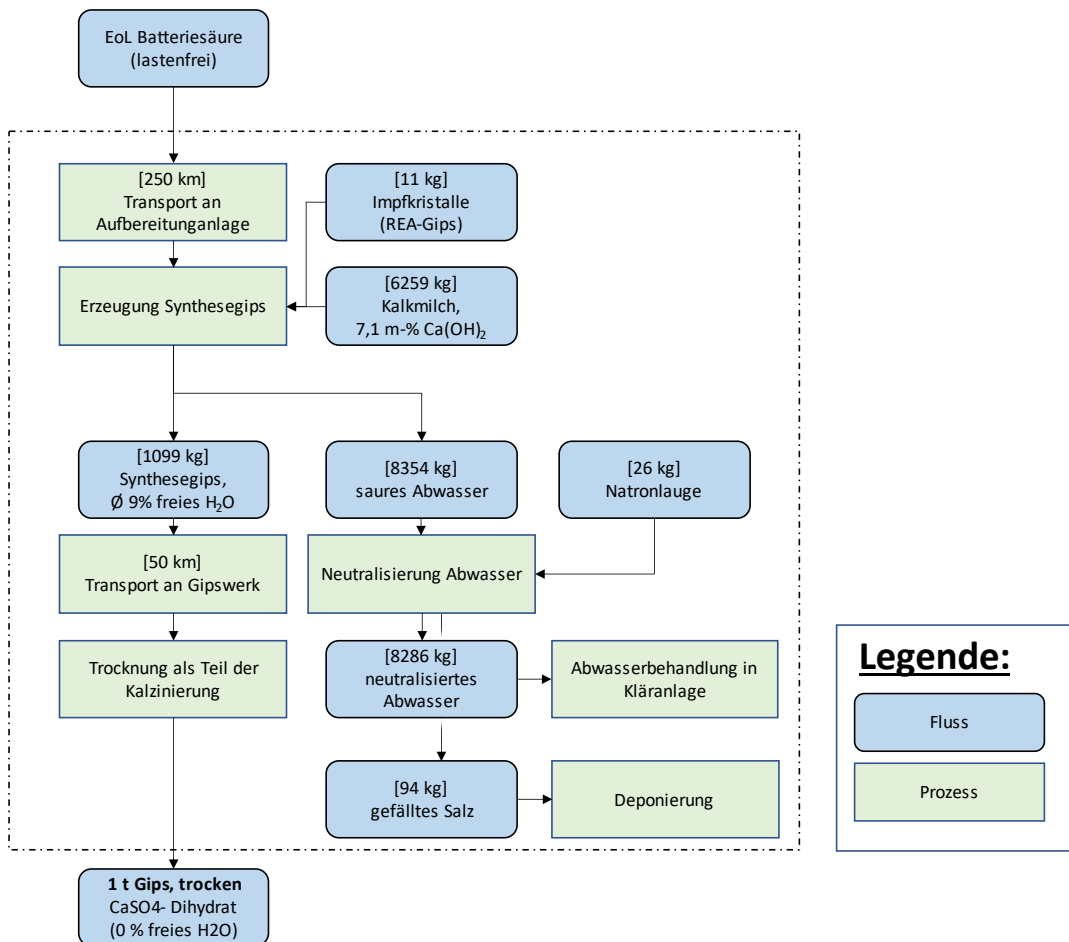
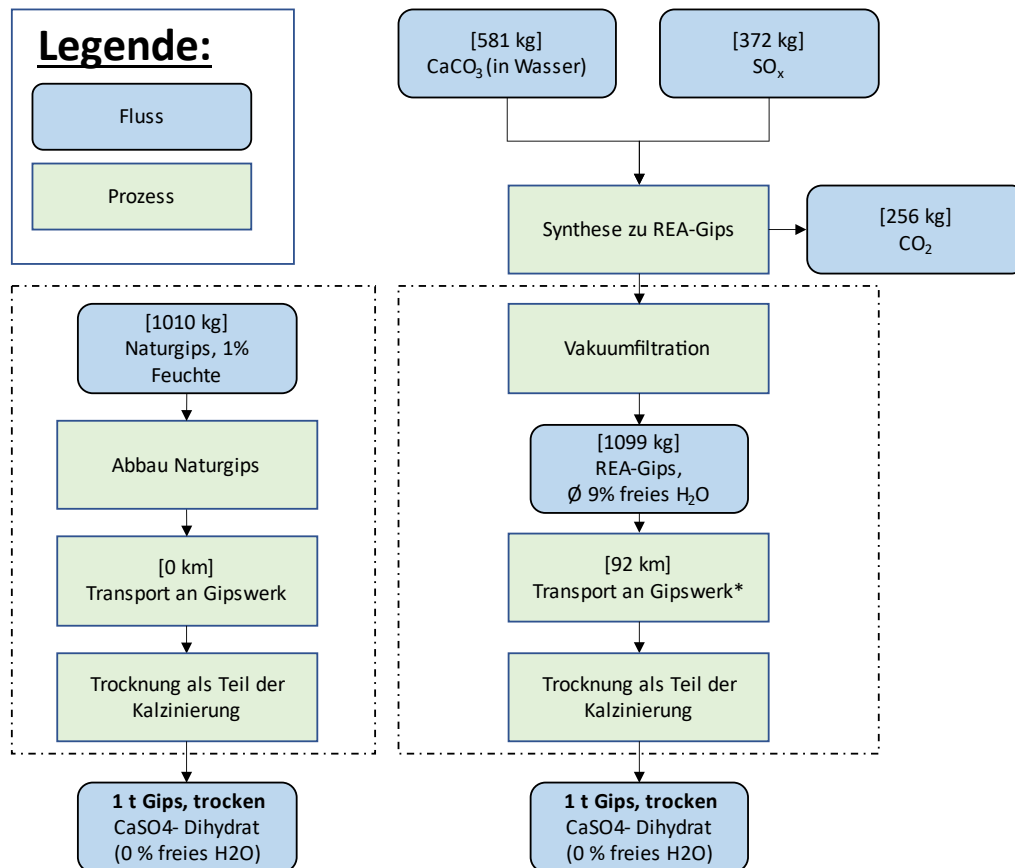


Abbildung 3-5 Prozesskette zur Aufbereitung von Altbatteriesäure zu Gips. Fällung mit CaCO_3 (oben) und Ca(OH)_2 (unten)

3.3.3. Gipsbereitstellung aus Rauchgasentschwefelungsanlagen und Naturgips

In Abbildung 3-6 sind die Prozessketten für die Gipsbereitstellung aus REA und Naturgips dargestellt. Der Abbau von **Naturgips** kann über den ecoinvent Prozess „gypsum quarry operation | gypsum, mineral – CH“ abgedeckt werden. Der Prozess wird dahingehend angepasst, dass der deutsche Strommix hinterlegt wird. Abgebauter Naturgips wird anschließend im Gipswerk weiterverarbeitet. Da Abbaustätte und Gipswerk in der Regel am selben Standort sind, wird hier kein Transport benötigt (Kreißig und Stoffregen 2007). Naturgips beträgt in etwa 1 Massen-% Restfeuchte. Daher wird auch hier eine virtuelle Trocknung (siehe Kapitel 3.3.1) inventarisiert.



*1/3 per Schiene - 275 km; 2/3 ohne Transport- Gipswerk direkt an Kohlekraftwerk

Abbildung 3-6 Prozessketten zur Erzeugung von Gips aus REA von Kohlekraftwerken und Naturgips

REA-Gips entsteht bei der Entschwefelung im Rahmen der Rauchgasreinigung von Verbrennungsanlagen. REA-Gips stammt in Deutschland mehrheitlich (84 %) aus Braunkohlekraftwerken und zu einem geringeren Anteil aus Steinkohlekraftwerken (16 %). Zum einen wird etwa doppelt so viel Braunkohle wie Steinkohle in Deutschland verstromt, zum anderen ist der Schwefelgehalt in Braunkohle deutlich höher als in Steinkohle.

Die Lasten der REA-Gips Erzeugung (In der Prozesskette „Synthese zu REA-Gips“) werden nicht dem Produkt Gips zugeordnet und befinden sich daher außerhalb der Systemgrenze. Damit wird weder der Verbrauch von Kalziumhydroxid noch die Freisetzung von CO₂ (durch die Reaktion von Kalk mit Schwefeloxiden) bilanziert. Aus Sicht der Kraftwerksbetreiber, lässt sich diese Annahme zunächst damit begründen, dass Kohlekraftwerke nicht als Gips- sondern als Stromproduzenten zu verstehen sind. Ebenso ist die Rauchgasentschwefelung nicht aus der Idee heraus entstanden Gips zu produzieren, sondern ist die Konsequenz einer dringenden Reaktion zur Reduktion der Emission von sauren Schadgasen in die Atmosphäre.

Während Betreiber von Kohlekraftwerken in der Vergangenheit mit Entsorgungskosten für REA-Gips konfrontiert waren, erzielen sie heute Erlöse im niedrigen einstelligen Eurobereich pro Tonne REA-Gips. Damit ließe sich argumentieren, dass REA-Gips nicht mehr den Status eines Abfall- bzw. Nebenproduktes einnimmt, sondern den eines Ko-Produktes. Insofern wäre es zulässig die Aufwendungen der Rauchgasentschwefelung zwischen dem Zielprodukt Kohlestrom und dem Ko-Produkt REA-Gips zu allozieren. Da eine physikalische Allokation an dieser Stelle nicht möglich ist (Koh-

lestrom wird in einer Energieeinheit, REA-Gips in einer Masseneinheit ausgedrückt) wird eine monetäre Allokation vorgeschlagen. Wie die Berechnung in Tabelle 3-5 zeigt ergäbe sich hier ein Allokationsfaktor von 0,001 für REA-Gips und ein Faktor von 0,999 für Kohlestrom. Aufgrund des vernachlässigbar kleinen Allokationsfaktors für REA-Gips, wird die Synthese zu REA-Gips in der Modellierung zu 0 gesetzt.

Tabelle 3-5 Berechnung der Allokationsfaktoren für REA-Gips und Kohlestrom

	REA-Gips	Kohlestrom
Preisstruktur	6-9 €/t REA-Gips (Erlös) ¹⁸	235 €/MWh _{el} (Börsenstrompreis 2022)
Produktionsmengen pro MWh _{el}	0,03 t REA-Gips pro MWh _{el} ¹⁹	1 MWh _{el} /MWh _{el}
Erträge pro MWh _{el}	$7,5 \frac{\text{€}}{\text{t REA-Gips}} \cdot 0,03 \frac{\text{t REA-Gips}}{\text{MWh}_{el}} = 0,22 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_{el}}$	$235 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_{el}} \cdot 1 \frac{\text{MWh}_{el}}{\text{MWh}_{el}} = 235 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_{el}}$
Allokationsfaktor	$\frac{0,22 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_{el}}}{(0,22+235) \frac{\text{€}}{\text{MWh}_{el}}} = 0,001$	$\frac{235 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_{el}}}{(0,22+235) \frac{\text{€}}{\text{MWh}_{el}}} = 0,999$

Der erste Prozessschritt, der für REA-Gips bilanziert wird, ist die Vakuumfiltration. Nach diesem Schritt besitzt Gips noch einen Feuchtegehalt von 9 % (Buchert et al. 2017). Der Stromverbrauch wird mit 22 kWh/t feuchter Gips (9 % Wassergehalt) bilanziert (Kreißig und Stoffregen 2007). Da die Vakuumfiltration direkt am Kohlekraftwerk stattfindet, wird Kohlestrom (84 % Strom aus Braunkohlekraftwerken, 16 % Strom aus Steinkohlekraftwerken) angesetzt. Feuchter Gips wird zum Gipswerk transportiert. Nach Kreißig und Stoffregen (2007) sind zwei Drittel der Kraftwerke direkt am Gipswerk. In diesem Fall wird kein Transport bilanziert. Für das verbleibende Drittel werden 275 km Transport per Schiene angesetzt. Am Gipswerk wird wiederum ein virtueller Trocknungsschritt angesetzt, um den Feuchtegehalt von Gips auf einen Wassergehalt von 0 Masse-% zu reduzieren.

3.4. Einschätzung der Datenqualität

3.4.1. Technologische Repräsentativität

Die technologische Repräsentativität variiert für die beiden zu untersuchenden Produktsysteme. Für das **Recycling von Gipsfaserplatten** wird die Behandlung in einem Prototyp einer Recyclinganlage (Technologiereifegrad (TRL) 5-6), die dem Stand der Technik entspricht, bilanziert. Dabei handelt es sich um eine Recyclinganlage der Mitteldeutschen Umwelt- und Entsorgung GmbH (MUEG) am Standort Großpösna.

Für die Erzeugung eines **Synthesegipses aus der Säure von Altbatterien** (Blei-Säure-Batterien) wird eine Ex-Ante Bilanzierung angesetzt. Stand heute ist, dass die Technologie bisher nur im Labor überprüft werden konnte (TRL 4). Die Funktionalität im industriellen Maßstab steht noch aus. Aus den Labordaten werden Parameter abgeleitet, um das Produktsystem entsprechend dem operativen Betrieb zu bilanzieren.

¹⁸ Persönliche Kommunikation Hr. Bunzel (MUEG)

¹⁹ Abgeleitet aus Alwast (2020)

566 Periphere Prozesse, wie die Behandlung von Sekundärabfällen, die Bereitstellung von Energie oder
 567 Transportmodalitäten werden für beide Produktsysteme entsprechend des Status-Quo (vgl. Kapitel
 568 2.2.7 und 2.2.8) bilanziert. Ebenfalls werden die beiden Vergleichssysteme, Gips aus Naturgips und
 569 REA-Gips, entsprechend des Status-Quo bilanziert.

570 **3.4.2. Geographische Repräsentativität**

571 Das Vordergrundsystem ist auf den gewählten Bezugsraum Deutschland zugeschnitten. Innerhalb
 572 der Prozesskette wurden eine deutsche Infrastruktur (z. B. hinsichtlich des Strommix oder der Trans-
 573 portdistanzen) sowie die deutsche Gesetzgebung hinterlegt (z. B. Emission der energetischen Ver-
 574 wertung entsprechend der deutschen Gesetzgebung). Der geographische Erfassungsbereich der
 575 Hintergrunddatenbank differiert je nach Prozess und ist der entsprechenden Dokumentation von
 576 ecoinvent zu entnehmen.

577 **3.4.3. Zeitrepräsentativität**

578 Das Vordergrundsystem ist an das Referenzjahr 2022 angepasst. Datensätze der Hintergrundda-
 579 tenbank (siehe 2.2.4) sind in der Regel älter. Sie werden im Rahmen dieser Studie aber nicht ange-
 580 passt.

581 **4. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung**

582 Die in Kapitel 3 inventarisierten Energie- und Stoffströme lassen sich mittels spezifischer Charakte-
 583 risierungsfaktoren in Umweltauswirkungen, sog. Wirkungskategorien übersetzen. Zunächst soll ein
 584 Überblick über die Ergebnisse aller betrachteten Wirkungskategorien gegeben werden und anschlie-
 585 ßend soll für ausgewählte Wirkungskategorien eine detaillierte Betrachtung vorgenommen werden.

586 **4.1. Überblick über die ausgewerteten Wirkungskategorien**

587 Einleitend sollen die Umweltauswirkungen vergleichend dargestellt werden, die mit der Bereitstel-
 588 lung von 1 Mg Gips entsprechend den fünf betrachteten Systemen einhergehen. Aus Gründen der
 589 besseren Darstellung werden den fünf Systemen Kurznamen zugewiesen:

- 590 - Bereitstellung von Gips über Naturgips (kurz: Naturgips)
- 591 - Bereitstellung von Gips aus der Rauchgasreinigung von Kohlekraftwerken (kurz: REA-Gips)
- 592 - Bereitstellung von Gips durch das Recycling von GFP (kurz: RC-Gips)
- 593 - Bereitstellung von Gips durch die Synthese von Altbatteriesäure mit Ca(OH)_2 oder CaCO_3
- 594 (kurz: Synthesegips (Ca(OH)_2) bzw. Synthesegips (CaCO_3))

595 Abbildung 4-1 zeigt zunächst die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die Wirkungskategorien,
 596 die im Rahmen dieser Studie betrachtet werden. Um die Ergebnisse aller Wirkungskategorien in
 597 einer Grafik auftragen zu können, werden nicht die absoluten Werte dargestellt. Stattdessen werden
 598 alle Ergebnisse innerhalb einer Wirkungskategorie auf 100 % skaliert. Das heißt das System mit den
 599 höchsten Umweltlasten erhält in der jeweiligen Wirkungskategorie 100 %. Alle anderen Systeme
 600 erhalten in Relation dazu einen entsprechend geringeren Wert. Die absoluten Zahlen befinden sich
 601 in Anhang A-1.

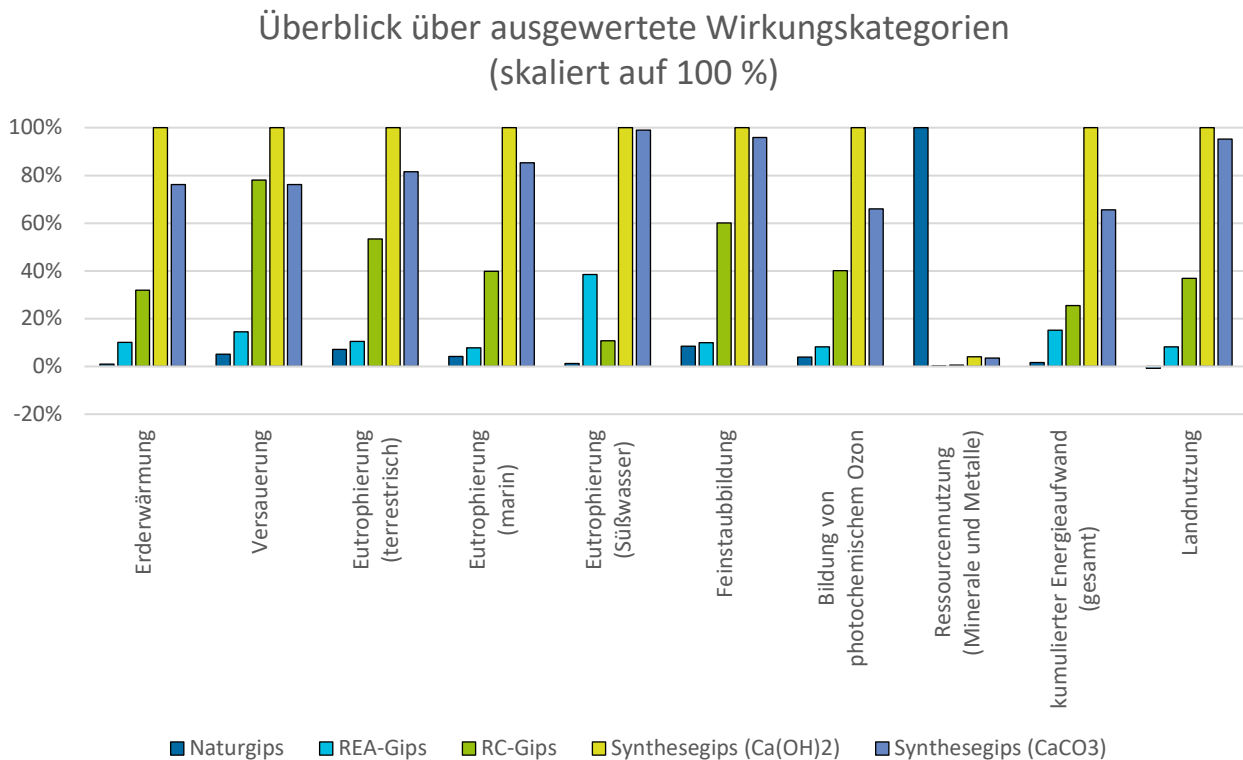


Abbildung 4-1 Überblick über ausgewertete Wirkungskategorien nach der cut-off Methodik, d.h. ohne Gutschriften nach der Substitutionsmethode (skaliert auf 100 %)

Abgesehen von der Kategorie Versauerung, Eutrophierung (Süßwasser) und Ressourcennutzung (Minerale und Metalle) stellt sich eine definierte Rangfolge über die betrachteten Systeme ein. Das System *Naturgips* weist die geringsten Lasten auf gefolgt vom System *REA-Gips*. Das System *RC-Gips* weist im Vergleich dazu i.d.R. deutlich höhere Lasten auf. Die mit Abstand höchsten Lasten ergeben sich in den zwei Systemen *Synthesegips*. Wird im System *Synthesegips* zum Füllen von Altbatteriesäure CaCO_3 verwendet fallen die Lasten geringer aus als mit dem Fällungsmittel Ca(OH)_2 .

Die Gründe, die zu dieser Rangbildung führen, werden in Kapitel 4.2 detailliert ausgeführt. Nachstehend sollen die Gründe aber in abgekürzter Form für jedes System zusammengefasst werden:

- **Naturgips:** Der Abbau von Naturgips bedarf kaum Energie oder anderer Hilfsstoffe, die Transporte entfallen (Gipswerk i. d. R. an Abbaustätte) und es gibt kaum Aufwendungen für die Trocknung aufgrund des geringen Wassergehalts von Naturgips
- **REA-Gips:** Da REA-Gips als Abfallstrom der Kohleverstromung gewertet wird (siehe auch Kapitel 3.3.3) entfallen Lasten der Vorkette. Lediglich die Filtration wird berücksichtigt. Der Transport entfällt oft für REA-Gips oder wird mit dem Zug bestritten (geringe Lasten im Vergleich zum Transport mit LKW). Aufgrund des hohen Feuchtegehalts (9 % Wassergehalt), fällt die Trocknung energieintensiv aus.
- **RC-Gips:** Der Abfallstrom EoL GFP geht zunächst lastenfrei in das System, jedoch muss die Sammlung (per LKW) bilanziert werden. Weiterhin geht die Aufbereitung der GFP mit hohen Lasten einher, die zu einem Großteil aus der Entsorgung von Sekundärabfällen herrühren. Schließlich wird noch ein zweiter Transport von der Recyclinganlage zum Gipswerk benötigt.

627 - Synthesegips: Auch hier geht der Abfallstrom Altbatteriesäure lastenfrei in das System ein.
 628 Der Transport muss aber berücksichtigt werden. Die Lasten dafür fallen sehr hoch aus, weil
 629 nur ein Teil der Altbatteriesäure zu Gips synthetisiert wird. Der verbleibende Anteil (haupt-
 630 sächlich Wasser) wird „umsonst“ zur Aufbereitungsanlage gefahren. Für die Fällung wird zu-
 631 sätzlich ein Fällungsmittel benötigt, welches aus Primärmaterial (Kalziumcarbonat oder Kal-
 632 ziumhydroxid) gewonnen wird. Schließlich müssen auch noch die Reststoffe aus der Syn-
 633 these entsorgt werden und der Synthesegips zum Gipswerk transportiert werden. Bei einer
 634 Restfeuchte von 9 % geht der Trocknungsschritt mit hohen Lasten einher.

635 Vorab sollen auch die Gründe beschrieben werden, die in den drei genannten Wirkungskategorien
 636 zu einer Abweichung von der genannten Rangfolge (Naturgips < REA-Gips < RC-Gips < Synthese-
 637 gips) führen:

- 638 - Versauerung: RC-Gips hat in der Kategorie ein überdurchschnittlich hohes Potential. Grund
 639 hierfür ist die Freisetzung von sauren Schadgasen, die bei der Verbrennung von Störstoffen
 640 (papier- und kunststoffreiche Fraktion) entstehen
- 641 - Eutrophierung (Süßwasser): Das System REA-Gips weist hier hohe Lasten auf. Grund ist
 642 der Einsatz von Kohlestrom bei der Filtration. Kohlestrom bzw. genauer die Bereitstellung
 643 von Kohle geht mit einer Freisetzung von Phosphor an aquatische Systeme einher.
- 644 - Ressourcennutzung (Minerale und Metalle): Für die Bereitstellung von Naturgips wird der
 645 Umwelt die Ressource Gips entnommen. Daher weist das System Naturgips hier ungleich
 646 höhere Umweltauswirkungen als die anderen betrachteten Systeme auf. An dieser Stelle
 647 stellt sich die Frage, weshalb nicht auch in den Systemen zu Synthesegips ein ähnlich hoher
 648 Ausschlag zu verzeichnen ist. Schließlich muss auch hier die Ressource Calciumcarbonat²⁰
 649 der Umwelt entnommen werden. Dies liegt darin begründet, dass in der betrachteten Wir-
 650 kungskategorie ein entsprechender Charakterisierungsfaktor für Kalziumcarbonat fehlt.

651 **4.2. Detaillierte Darstellung der Ergebnisse für ausgewählter Wirkungskategorien**

652 Anhand zweier Wirkungskategorien sollen die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung detailliert auf-
 653 geschlüsselt und beschrieben werden. Hierbei fällt die Wahl auf das Erderwärmungspotential und
 654 die Ressourcennutzung.

655 **4.2.1. Erderwärmungspotential**

656 In Abbildung 4-2 ist das Erderwärmungspotential (GWP) für die fünf untersuchten Systeme darge-
 657 stellt. Im Rahmen der Beitragsanalyse sind die Posten Abbau von Naturgips und Gewinnung von
 658 REA-Gips separat ausgewiesen. Ebenso finden sich in der Grafik die Transporte zur Aufbereitungs-
 659 anlage (bei RC-Gips und Synthesegips) und die Aufwendungen für die Aufbereitung selbst darin.
 660 Schließlich sind die Transporte zum Gipswerk und der „virtuelle“ Trocknungsschritt gezeigt. Bezugs-
 661 größe der Darstellung ist die fE (Bereitstellung von 1 t Gips mit 0 % freiem Wasser).

²⁰ Auch bei dem Fällungsmittel Kalziumhydroxid ist Kalziumkarbonat das Ausgangsmaterial.

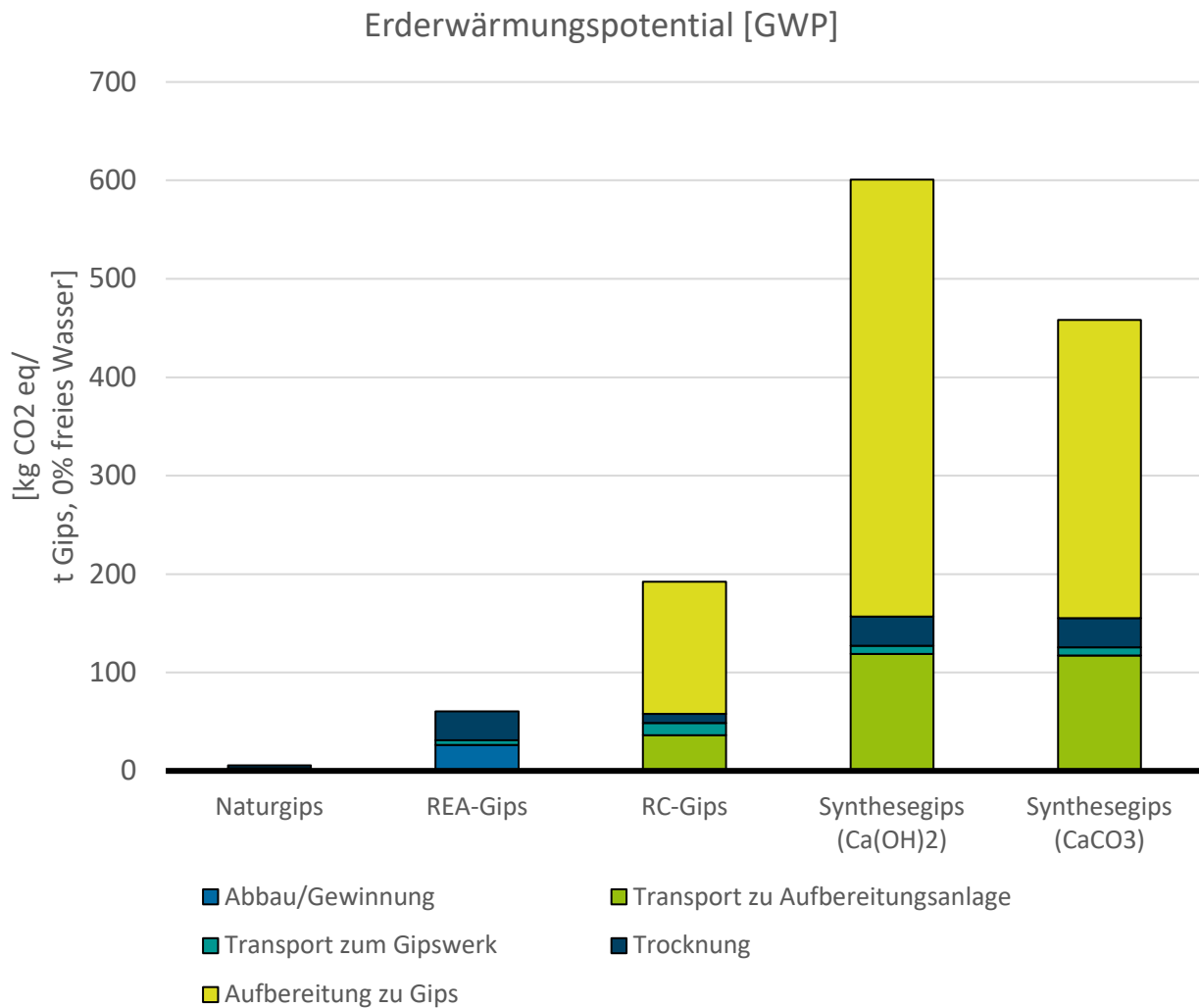


Abbildung 4-2 Erderwärmungspotential (GWP) der fünf untersuchten Systeme zur Gipsbereitstellung

Bei **Naturgips** zeigt sich, dass dessen Abbau einen vernachlässigbar kleinen Anteil am GWP hat. Der Abbau benötigt wenig Energie in Form von Strom und Diesel und auch der Einsatz an Hilfsstoffen ist gering. Im Vergleich zur Aufbereitung von EoL-Gips zu RC-Gips ist der Energieeinsatz beim Abbau von Naturgips etwa um den Faktor 1.000 geringer. Weiterhin entfällt bei Naturgips der Transport zum Gipswerk, da sich dieses am Abbaustandort befindet. Abschließend fällt bei Naturgips auch der Aufwand für dessen Trocknung auf 0 % (freies) Wasser sehr gering aus, da Naturgips ohnehin bereits eine sehr niedrige Restfeuchte aufweist. In Summe werden über die gesamte Prozesskette nur 6 kg CO₂-Eq pro fE freigesetzt.

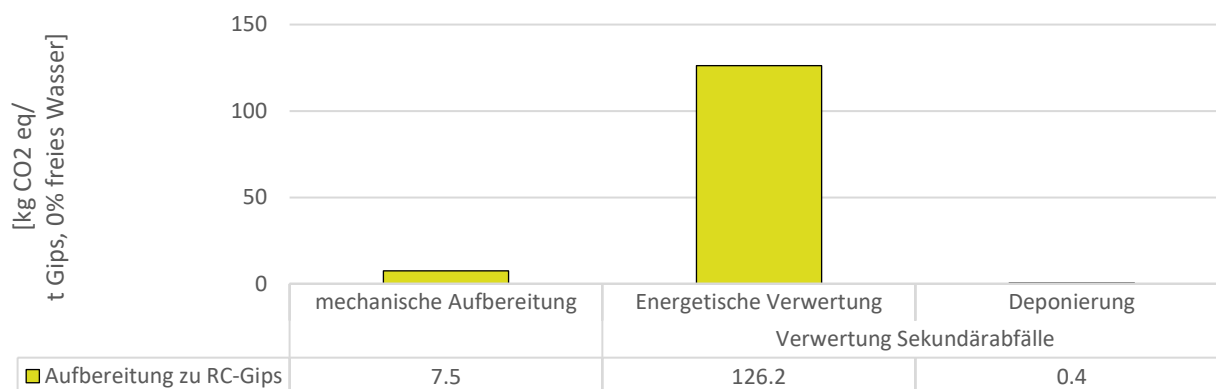
Bei **REA-Gips** fallen die Aufwendungen im Vergleich zu Naturgips deutlich höher aus. Die Bereitstellung von REA-Gips ist zwar zunächst lastenfrei, da es sich um ein Abfallprodukt der Kohleverstromung handelt²¹. Die Entwässerung des REA-Gips muss aber dem betrachteten System zugewiesen werden. Die Entwässerung (Vakuumfiltration) ist mit 22 kWh/t energieaufwändig und die Energie dafür wird zudem über Kohlestrom bereitgestellt, welcher im Vergleich zu anderen Energieträgern mit hohen CO₂-Eq Emission einhergeht. Für diesen ersten Prozessschritt ergeben sich in Summe 26 kg CO₂-Eq pro fE. Der Transport von REA-Gips zum Gipswerk fällt vernachlässigbar

²¹ Würde die Bereitstellung der Betriebsmittel sowie die Reaktion von SO_x mit dem Fällungsmittel zu REA-Gips ebenfalls betrachtet werden, würden zusätzliche Lasten von ~250 kg CO₂-Eq entstehen.

gering aus, da REA-Gips entweder nicht zum Gipswerk transportiert werden muss oder per Schiene transportiert wird. Der Wassergehalt von REA-Gips ist etwa 10-mal so hoch wie der von Naturgips, weshalb hier auch die Trocknung stärker zu Buche schlägt. In der Summe ergeben sich für REA-Gips Lasten in Höhe von 61 kg CO₂-Eq.

Bei **RC-Gips** fällt zunächst ein Transportschritt per LKW von ~170 km an. Dies liegt an der derzeit noch geringen Anzahl von Aufbereitungsanlagen und den entsprechend großen Einzugsradien der Anlagen. Hieraus ergeben sich Lasten in Höhe von 36 kg CO₂-Eq. Die Aufbereitung zu RC-Gips ist mit einer zusätzlichen Last von 134 kg CO₂-Eq Emissionen verbunden. Die mechanische Aufbereitung selbst benötigt zwar Energie in Form von Strom und Diesel, sowie Kapitalgüter (z.B. Bagger, Halle etc.) ist jedoch nicht entscheidend für den hohen Beitrag, wie Abbildung 4-3 zeigt. Vielmehr geht die Entsorgung der Sekundärabfälle und insbesondere die Verbrennung der kunststoffreichen Fraktion mit einem hohem GWP einher. Die kunststoffreiche Fraktion setzt sich zu ~70 % aus Kohlenstoff zusammen. Dieser Kohlenstoff ist fast ausschließlich fossilstämmig und wird bei der Verbrennung als CO₂ freigesetzt wird.

Aufschlüsselung GWP - Lasten mechanische Aufbereitung zu RC-Gips (aus Eol GFP)



694

Abbildung 4-3 Aufschlüsselung des GWP hinsichtlich der Lasten bei dem Prozessschritt „Aufbereitung zu Gips“ im System RC-Gips

Aufbereiteter Gips wird schließlich zum Gipswerk transportiert. Für die Strecke von ~80 km werden wiederum LKW eingesetzt und es ergibt sich ein GWP von 13 CO₂-Eq. Am Gipswerk findet abschließend die Trocknung von RC-Gips statt. Bei einem ursprünglichen Wassergehalt von 3 % ergeben sich weitere Lasten in Höhe von 9 kg CO₂-Eq statt, so dass sich in Summe für die Bereitstellung der fE über diese Route ein GWP von 192 kg CO₂-Eq ergibt.

Im System **Synthesegips** ergeben sich bereits durch den Transport der Altbatteriesäure zur Aufbereitungsanlage Lasten in Höhe von 120 kg CO₂-Eq Emissionen pro fE. Die Strecke von 250 km wird einerseits per LKW zurückgelegt, andererseits werden auch pro fE 3 t Altbatteriesäure transportiert. Dabei ist anzumerken, dass 80 % der Altbatteriesäure Wasser sind, die quasi „umsonst“ transportiert werden.²²

An den Transport schließt sich die Aufbereitung der Altbatteriesäure zu Synthesegips an. Dies ist der gewichtigste Schritt im System Synthesegips. Die Lasten fallen bei der Fällung mit Kalziumkarbonat (~300 kg CO₂-Eq/fE) etwas geringer aus als bei der Fällung mit Kalziumhydroxid (~440 kg

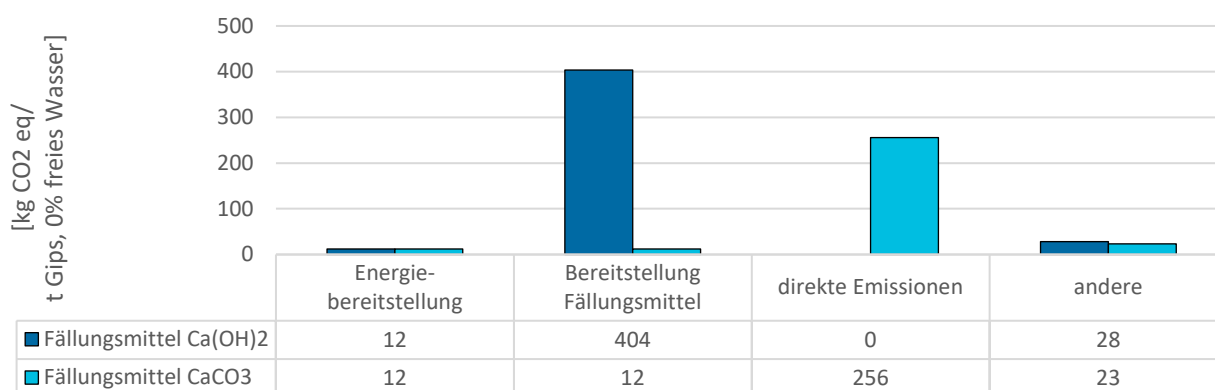
²² Um Transportkosten (monetärer oder ökologischer Art) einzusparen, kann man darüber nachdenken die Schwefelsäure in der Altbatteriesäure, z.B. durch Vakuumfiltration, aufzukonzentrieren.

710 CO₂-Eq/fE). Abbildung 4-4 zeigt die Aufschlüsselung für die Aufbereitung zu Synthesegips mit den
711 zwei betrachteten Fällungsmitteln.

712 Bei der Fällung mit Kalziumkarbonat (CaCO₃) stammen die Lasten hauptsächlich aus der Freiset-
713 zung von CO₂, welches bei der Reaktion des Fällungsmittels mit Schwefelsäure entsteht. Die Be-
714 reitstellung des Fällungsmittels selbst ist kaum relevant. Ebenso zeigt sich, dass der Energiebedarf
715 bei der Fällung²³ von untergeordneter Relevanz ist. Unter dem Beitrag „andere“ verbirgt sich unter
716 anderem die Abwasserentsorgung. Hier fällt insbesondere die Neutralisation des Abwassers ins Ge-
717 wicht.²⁴

718 Bei der Fällung mit Kalziumhydroxid (Ca(OH)₂) treten keine direkten Emissionen bei der Aufberei-
719 tung auf. Jedoch fallen bei der Bereitstellung von Kalziumhydroxid hohe Lasten an. Um die hohen
720 Lasten nachvollziehen zu können soll der Herstellungsprozess von Kalziumhydroxid beleuchtet wer-
721 den. Kalziumhydroxid wird aus Kalziumkarbonat gewonnen. Kalziumhydroxid hat bereits die ent-
722 sprechende Menge an CO₂ bei der Kalzinierung von Kalziumkarbonat abgegeben²⁵. Die direkten
723 Emissionen wurden somit also bereits in einem früheren Prozessschritt freigesetzt und der Posten
724 „Bereitstellung Fällungsmittel“ enthält die freigesetzten CO₂-Eq Emissionen. In Summe fällt das
725 GWP bei der Fällung mit Kalziumhydroxid deutlich höher aus im Vergleich zu einer Fällung mit Kal-
726 ziumkarbonat, weil, die Kalzinierung (bei ca. 900°C) des Fällungsmittels mit einem hohen zusätzli-
727 chen Energiebedarf einhergeht.

Aufschlüsselung GWP - Lasten der Bereitstellung von Synthesegips
(aus Altbatteriesäure)



728

729 **Abbildung 4-4 Aufschlüsselung des GWP hinsichtlich der Lasten bei dem Prozessschritt**
730 **„Aufbereitung zu Gips“ im System Synthesegips**

731 Nach der Aufbereitung wird der Synthesegips zum Gipswerk transportiert (8 kg CO₂-Eq/fE). Der
732 Synthesegips wurde nach der Fällung von der wässrigen Lösung abfiltriert und besitzt noch einen
733 Wassergehalt von 9 Masse-%. Im letzten Schritt wird der Synthesegips daher noch auf einen Was-
734 sergehalt von 0 Masse-% getrocknet (29 kg CO₂-Eq/fE).

735

²³ Darunter ist der Energiebedarf für Pumpen, das Rührwerk und die anschließende Filtration subsumiert.

²⁴ Das Abwasser ist nach dem Fällungsschritt immer noch leicht sauer (pH-Wert=~-1-2) und wird daher mit Natronlauge vor einer Einleitung in das Abwassernetz neutralisiert.

²⁵ Um Kalziumhydroxid aus Kalziumkarbonat zu gewinnen, wird CaCO₃ auf ca. 900°C erhitzt. Dabei läuft folgende Reaktion ab: CaCO₃ --> CaO + CO₂. Anschließend wird Kalziumoxid mit Wasser „abgelöscht“ (CaO + H₂O --> Ca(OH)₂)

Ausweisung der Gutschriften nach der Substitutionsmethode

In Anlehnung an Modul D in Umweltproduktdeklarationen werden vermiedene Auswirkungen durch Stromerzeugung und Wärme sowie der Bereitstellung des substituierten Primärmaterials gesondert ausgewiesen. Dies erfolgt durch negative Lasten (Gutschriften) nach der Substitutionsmethode. Dieser Aspekt ist ausschließlich für das System RC-Gips relevant (siehe Abbildung 3-3). In diesem System fallen bei der Aufbereitung (nützliche) Koppelprodukte bei der Verwertung von Sekundärabfällen an. Einerseits werden durch die Verbrennung der papier- und kunststoffreichen Fraktion Strom und Wärme innerhalb der MVA bereitgestellt, andererseits werden durch die stoffliche Verwertung von Fe-Metallen und NE-Metallen Sekundärrohstoffe bereitgestellt. Wie Abbildung 4-5 zeigt, fallen im System RC-Gips die Gutschriften für zurückgewonnene Sekundärrohstoffe und Energie (-208 kg CO₂-Eq/fE) etwas höher aus, wie die Summe der Lasten (192 kg CO₂-Eq/fE). Damit ergibt sich eine Netto-Gutschrift für das System von -16 kg CO₂-Eq/fE.

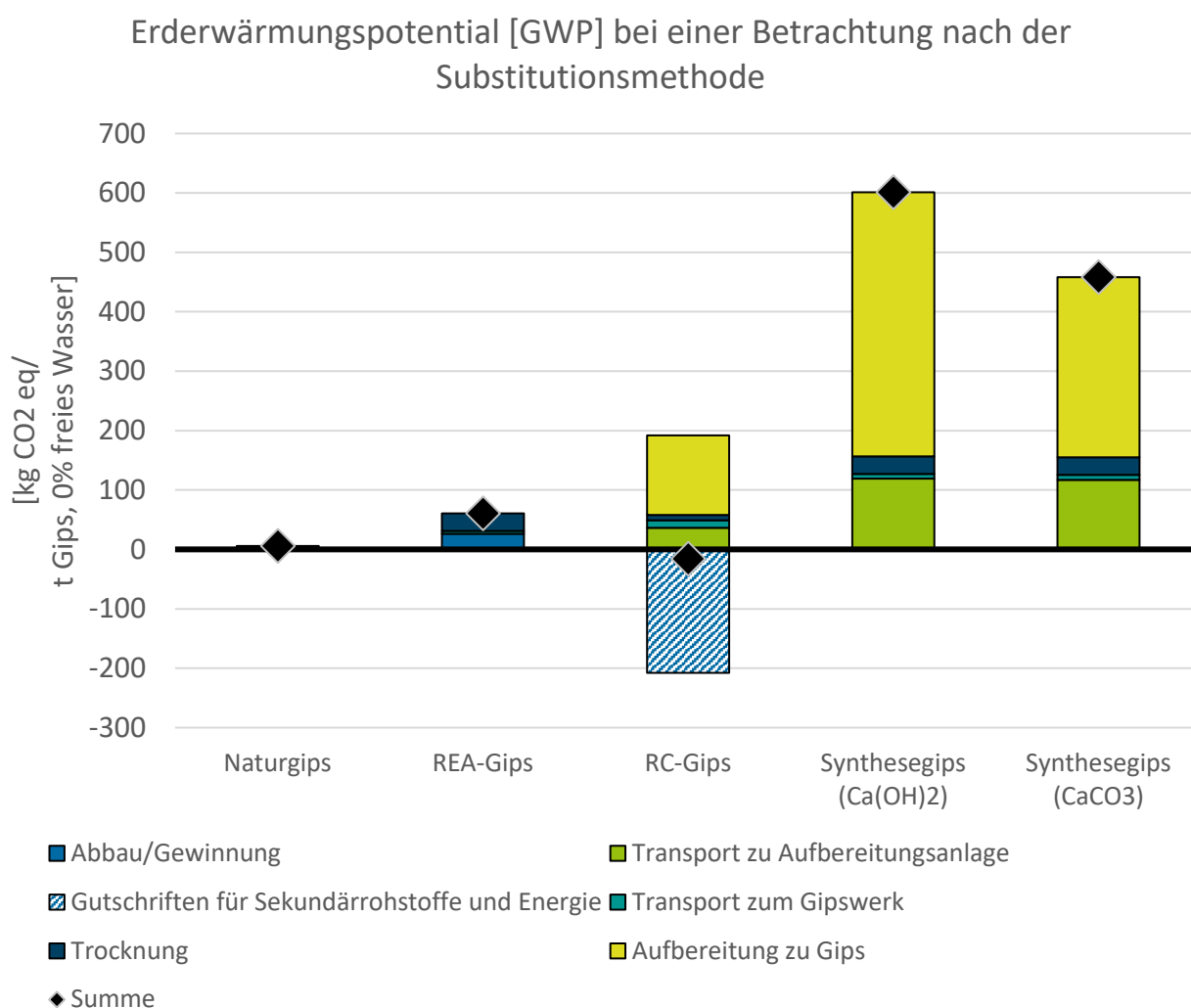


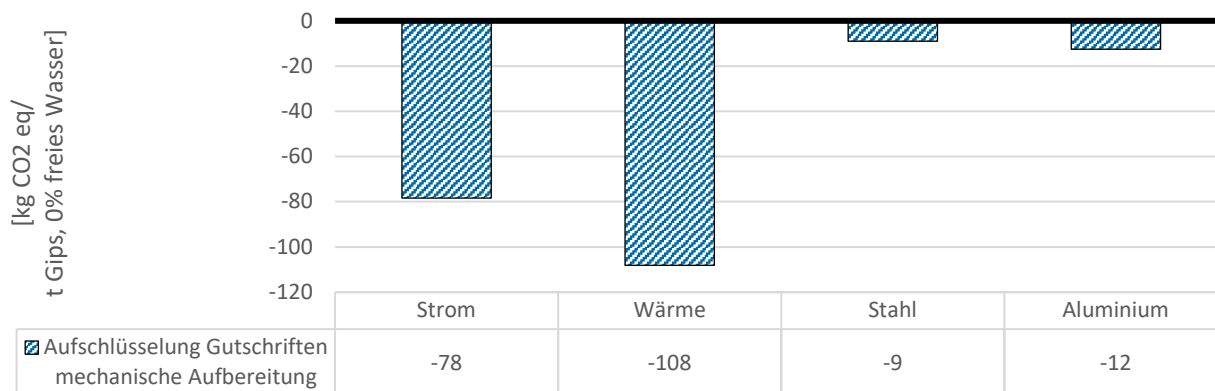
Abbildung 4-5 GWP bei einer Betrachtung der fünf untersuchten Systeme nach der Substitutionsmethode

Wie Abbildung 4-6 zeigt, stammen die Gutschriften zu ~90 % aus der Bereitstellung von Strom und Wärme bei der Verbrennung der papier- und kunststoffreichen Fraktion. Die Gutschrift erfolgt gegenüber dem deutschen Strom- und Wärmemix. Die verbleibenden 10 % stammen aus der Verwertung der Metalle. Die Verwertung der Metalle beinhaltet Lasten für Transport und Aufbereitung sowie

755 Recycling der Metalle sowie die Gutschriften gegenüber der Primärroute der entsprechenden Me-
756 talle.

757

Aufschlüsselung der Gutschriften für Recyclate und Energie



758

759 **Abbildung 4-6 Darstellung der Gutschriften, die durch die Verwertung der Sekundärab-**
760 **fälle nach der Substitutionsmethode erteilt werden könnten.**

761 4.2.2. Verknappung mineralischer Ressourcen

762 Die Ergebnisse für die Wirkungskategorie Verknappung mineralischer Ressourcen (MRS) ist in Ab-
763 bildung 4-7 dargestellt. Die Gutschriften, die im System RC-Gips nach der Substitutionsmethode
764 erteilt werden können, sind separat ausgewiesen. Das Ergebnis zeigt hier deutlich, dass das System
765 Naturgips Lasten aufweist, die um mehrere Größenordnungen größer sind als in den anderen un-
766 tersuchten Systemen. Der Grund dafür ist, dass durch den Abbau von Gips, ein Potential für eine
767 Ressourcenverknappung ausgelöst wird. Das Ergebnis kann allerdings nur als Tendenz verstanden
768 werden. Die gewählte Wirkungsabschätzungsmethode enthält nur einen gemittelten globalen Cha-
769 rakterisierungsfaktor für Gips. Somit ist das Verknappungspotential nicht auf den Standort Deutsch-
770 land zugeschnitten.

771 Relevante Lasten in der Kategorie MRS treten nur noch in den Systemen Synthesegips im Zusam-
772 menhang mit dem Prozessschritt zur „Aufbereitung zu Gips“ auf. Die Lasten stammen allerdings
773 nicht (wie man erwarten könnte) aus der Bereitstellung des Fällungsmittels, sondern aus der Bereit-
774 stellung der Lauge, die für die Neutralisation des sauren Abwassers benötigt wird. Genauer gesagt
775 handelt es sich um die Ressourcenentnahme von Natriumchlorid.

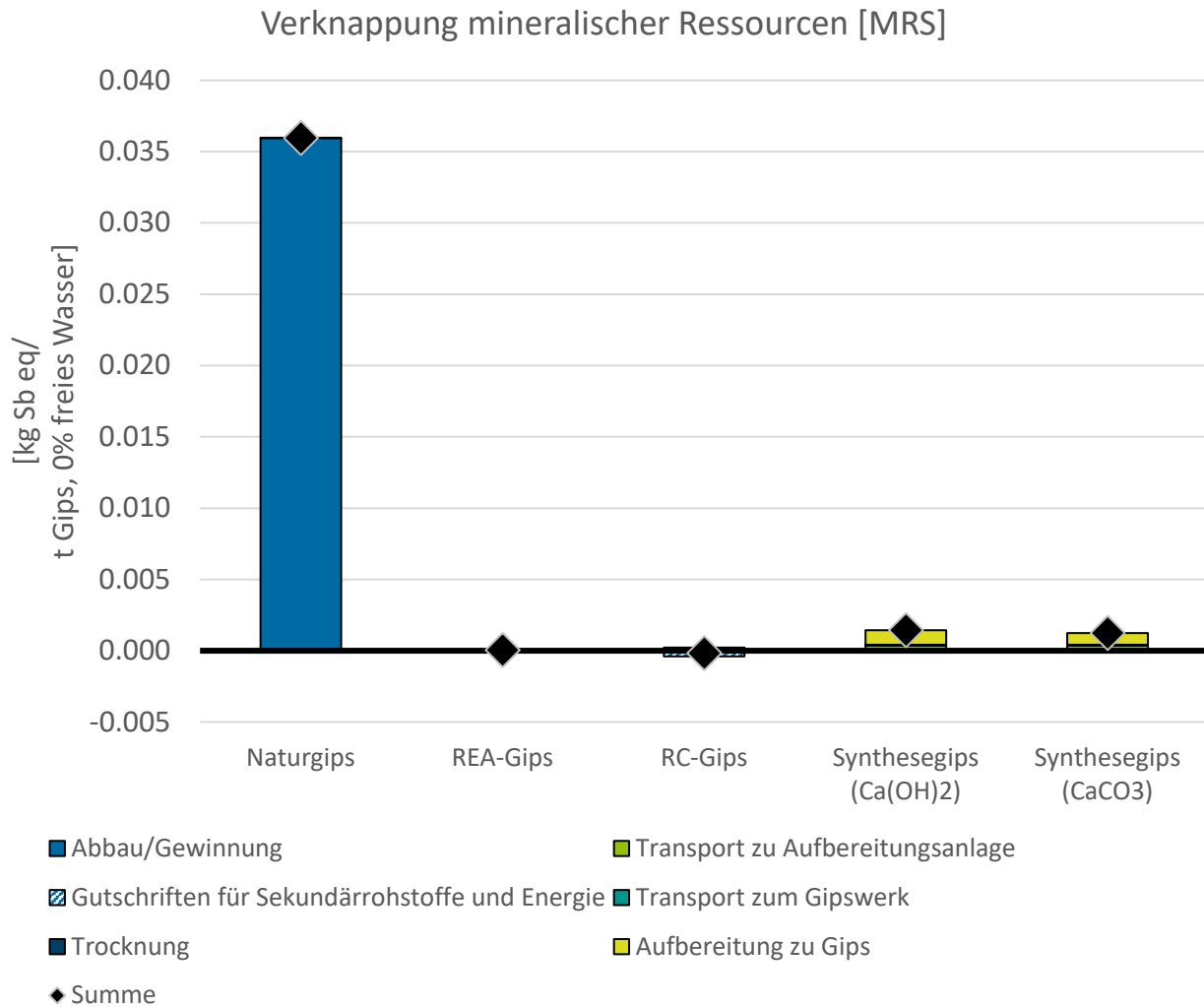


Abbildung 4-7 Verknappungspotential mineralischer Ressourcen (MRS) der fünf untersuchten Systeme zur Gipsbereitstellung. Die Gutschriften im System RC-Gips sind nach der Substitutionsmethode gesondert ausgewiesen.

5. Auswertung der Ökobilanz

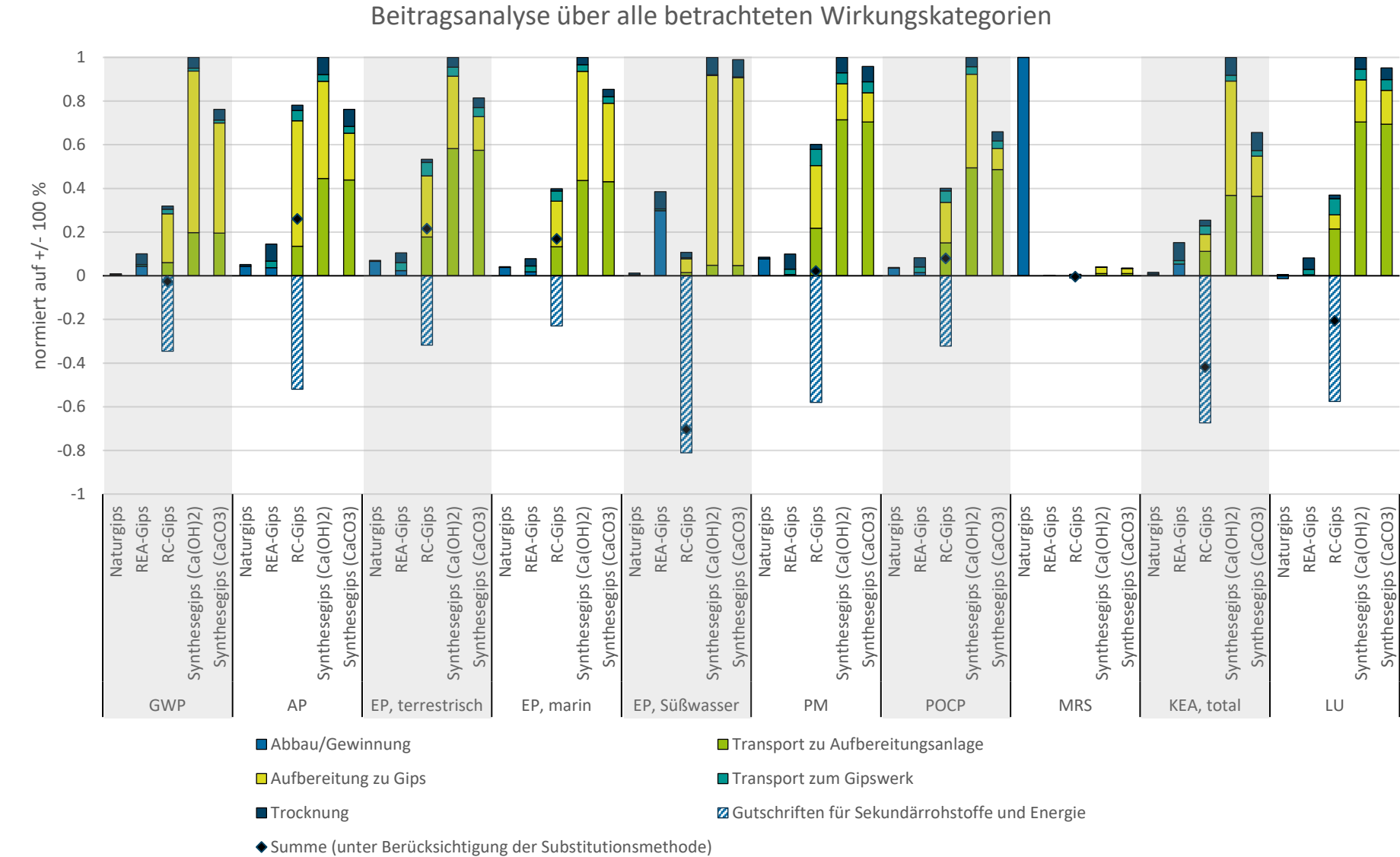
Das folgende Kapitel wertet die in Kapitel 4 dargestellten Ergebnisse aus. Hierzu werden zunächst Parameter, die die Ergebnisse der Ökobilanz wesentlich beeinflussen, herausgearbeitet und diskutiert (Kapitel 5.1). Davon ausgehend wird die Relevanz der Aussagen der Ökobilanz beurteilt. Hierfür erfolgt zunächst die Prüfung der Vollständigkeit (Kapitel 5.2.1), darauffolgend die Analyse der Beeinflussung des Ergebnisses durch variierte Einflussgrößen (Sensitivitätsanalysen, Kapitel 5.2.3) und eine Erörterung der Konsistenz der Ergebnisse (Kapitel 5.2.2). Abschließend geht Kapitel 5.3 zusammenfassend auf Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen ein, die sich aus der Ökobilanz ergeben.

5.1. Identifizierung der signifikanten Parameter

In Kapitel 4.2 wurde bereits anhand des Erderwärmungspotentials und des Verknappungspotentials mineralischer Rohstoffe angerissen, wie die unterschiedlichen Prozessschritte Einfluss auf das Gesamtergebnis nehmen können. In Abbildung 5-1 ist nun eine Beitragsanalyse für alle betrachteten

- 793 Wirkungskategorien zusammengestellt. Nachfolgenden sollen die einzelnen Beiträge hinsichtlich ih-
794 res Beitrages zum Gesamtergebnis bewertet werden, um so signifikante Parameter abzuleiten:
- 795 - **Abbau von Naturgips:** Der Abbau von Naturgips spielt wie in Kapitel 4.2.2 dargestellt eine
796 entscheidende Rolle in der Kategorie MRS. In allen anderen Kategorien ist dieser Prozess-
797 schritt von untergeordneter Bedeutung. Interessanterweise ist der Beitrag in der Kategorie
798 LU sogar negativ. Dies ist aber als eine Folge einer zu unspezifischen Modellierung zu wer-
799 ten²⁶. Für die Rekultivierung der Abbaustätte werden höhere Gutschriften erteilt, als Lasten
800 beim Abbau Gips angesetzt werden.
 - 801 - **Gewinnung von REA-Gips:** In der Kategorie EP, Süßwasser kommt dieser Prozessschritt
802 stark zu tragen. Dies liegt am Einsatz von Kohlestrom bzw. an der Bereitstellung der Kohle.
803 Im entsprechenden ecoinvent Prozess werden Phosphate bei der Behandlung von Abraum
804 aus dem Kohlebergbau freigesetzt.
 - 805 - **Transport zur Aufbereitungsanlage:** Der Transport zur Aufbereitungsanlage ist für die Sys-
806 teme RC-Gips und Synthesegips relevant. Dieser Transport ist für fast alle Wirkungskatego-
807 rien (Ausnahmen: EP, Süßwasser und MRS) von hoher Relevanz. Beim Synthesegips sind
808 die Aufwendungen besonders hoch, da hier einerseits eine hohe Transportdistanz zurück-
809 gelegt werden muss und andererseits eine hohe Menge an Altbatteriesäure pro fE bewegt
810 werden muss (siehe auch 4.2.1 – Abschnitt Synthesegips)
 - 811 - **Aufbereitung zu Gips:** Dieser Prozessschritt ist für die Systeme RC-Gips und Synthesegips
812 relevant. Beim System RC-Gips ist die Verwertung der Sekundärabfälle (insbesondere pa-
813 pier- und kunststoffreiche Fraktion) für die hohen Lasten verantwortlich. Die Verwertung
814 selbst, also die mechanische Aufbereitung ist von untergeordneter Natur. Beim System Syn-
815 thesegips ist einerseits die Bereitstellung des Fällungsmittels von hohen Lasten begleitet
816 andererseits auch die Bereitstellung der Neutralisationslauge, um das verbleibende saure
817 Abwasser zu neutralisieren. Da die Bereitstellung von Kalziumhydroxid deutlich energieauf-
818 wändiger ist als die Bereitstellung von Kalziumkarbonat, ist der Prozessschritt „Aufbereitung
819 zu Gips“ bei der Fällung mit Kalziumhydroxid über alle Wirkungskategorien von höheren Las-
820 ten begleitet.
 - 821 - **Transport zum Gipswerk:** Der Transport zum Gipswerk fällt im Vergleich zum Transport zur
822 Aufbereitungsanlage deutlich geringer aus. Grund dafür sind geringere Transportdistanzen
823 und dass der aufbereitete Gips bereits von Störstoffen befreit wurde (bei RC-Gips) und größ-
824 tenteils wasserfrei ist (bei Synthesegips).
 - 825 - **Trocknung:** Die Trocknung ist selbst bei höheren Wassergehalten des angelieferten Gipses
826 kein relevanter Parameter.
 - 827 - **Gutschriften für Sekundärrohstoffe und Energie:** Werden im Rahmen der Substitutions-
828 methode auch Gutschriften angerechnet, so zeigt dieses einen erheblichen Einfluss auf das
829 System RC-Gips. Insbesondere Gutschriften für Strom und Wärme, die in einer MVA produ-
830 ziert und ausgekoppelt werden tragen über alle Wirkungskategorien zu 80-100 % zu den
831 Gutschriften bei.

²⁶ Im Prozess „gypsum quarry operation“ erfolgt zunächst eine Transformation “from unspecified to mineral extraction site“. Bei der Rekultivierung (modelliert über „recultivation, limestone mine“) erfolgt eine Transformation “from mineral extraction site to forest“. Zweitere resultiert in höheren Gutschriften als Lasten bei der ersten entstehen.



832

833

834

Abbildung 5-1 Beitragsanalyse für die fünf untersuchten Systeme und für alle betrachteten Wirkungskategorien. Gutschriften nach der Substitutionsmethode sind separat ausgewiesen.

Die Ergebnisse der Auswertung werden in Tabelle 5-1 zusammengefasst. Für Naturgips und REA-Gips wurde jeweils nur ein Parameter identifiziert (Abbau von Naturgips und Vakuumfiltration von REA-Gips), welcher auch jeweils nur in einer Wirkungskategorie relevant ist. Für das System RC-Gips wurden zwei Parameter identifiziert, die in allen Wirkungskategorien zu tragen kommen. Diese sind der Transport zur Aufbereitungsanlage sowie die Verwertung der Sekundärabfälle, die bei der mechanischen Aufbereitung von GFP anfallen. Beim System Synthesegips ist ebenfalls der Transport zur Aufbereitungsanlage von erhöhter Relevanz in allen Wirkungskategorien. Weiterhin ist die Bereitstellung des Fällungsmittels und der Neutralisationslauge bei der Aufbereitung in allen Wirkungskategorien ein signifikanter Parameter.

Tabelle 5-1 Signifikante Parameter in den betrachteten Systemen

System	Signifikanter Parameter	Prozessschritt	Betroffene Wirkungskategorie(n)
Naturgips	Entnahme von Naturgips	Abbau Naturgips	MRS
REA-Gips	Energiebereitstellung für die Vakuumfiltration	Gewinnung REA-Gips	EP, Süßwasser
RC-Gips	LKW-Transport	Transport zur Aufbereitungsanlage	alle
	Verwertung von Sekundärabfällen (insb. papier- und kunststoffreiche Fraktion) ²⁷	Aufbereitung	alle
Synthesegips	LKW-Transport	Transport zur Aufbereitungsanlage	alle
	Bereitstellung des Fällungsmittels	Aufbereitung	alle
	Bereitstellung der Neutralisationslauge	Aufbereitung	alle

5.2. Beurteilung

Um die Ergebnisse der Ökobilanz besser beurteilen zu können, wird die Ökobilanz auf Vollständigkeit und Konsistenz geprüft. Durch eine Sensitivitätsprüfung soll die Robustheit der Ergebnisse erhöht werden.

5.2.1. Vollständigkeitsprüfung

Innerhalb der Systembetrachtung wurden alle Prozessschritte von der Rohstoffgewinnung bzw. vom Abfallanfall über die Aufbereitung bis hin zur Bereitstellung von trockenem Gips berücksichtigt. Die Behandlung aller Nebenprodukte (beispielsweise energetische Verwertung von papier- und kunst-

²⁷ Dies betrifft nicht nur die Lasten, sondern auch Gutschriften, sofern diese nach der Substitutionsmethode erteilt werden.

854 stoffreicher Fraktion) wurde ebenfalls bilanziert. Innerhalb der definierten Systemgrenzen wur-
855 den somit alle Prozesse vollständig abgedeckt. Innerhalb der Prozesse wurden alle bekannten In-
856 puts und Outputs inventarisiert.

857 5.2.2. Konsistenzprüfung

858 Das Vordergrundssystem wurde für alle betrachteten Systeme auf den gewählten zeitlichen und
859 geographischen Bezugsraum angepasst (Deutschland 2022). Die Systeme, die verglichen wurden,
860 weisen (Stand heute) einen unterschiedlichen Technologie-Reifegrad (TRL) auf, weshalb auf den
861 Ex-Ante-Ansatz zurückgegriffen wurde, um eine Konsistenz bei der Bilanzierung der Systeme zu
862 erreichen. Dies betrifft insbesondere das System Synthesegips, wofür derzeit ausschließlich labor-
863 technische Untersuchungen vorliegen. Da bei der Inventarisierung teilweise auf Realdaten und teil-
864 weise auf berechnete bzw. modellierte Daten zurückgegriffen wurde, ist hier eine Inkonsistenz zu
865 vermerken.

866 Alle Systeme wurden einheitlich nach der cut-off-Methode bilanziert. Alternativ wurden einheitlich
867 nach der Substitutionsmethode die Gutschriften zurückgewonnene Energie und Sekundärrohstoffe
868 ausgewiesen. Die Bilanzierung erfolgt einheitlich innerhalb einer Software (openLCA) und mit einer
869 Datenbank (ecoinvent v. 3.10). Die verwendeten generischen Datensätze führen teilweise aufgrund
870 unterschiedlicher geographischer und zeitlicher Bezüge zu Inkonsistenzen. Die Charakterisierungsfaktoren
871 für die beschriebenen Wirkungskategorien entstammen mit Ausnahme des "KEA, gesamt"
872 einer einheitlichen Quelle (GreenDelta 2024b).

873 5.2.3. Sensitivitätsprüfung

874 Im Folgenden wird die Sensitivität der Ergebnisse der Ökobilanz gegenüber einer Variation von in
875 Kapitel 5.1 ausgewählten, ergebnisrelevanten Einflussgrößen diskutiert. Für eine Sensitivität werden
876 Parameter ausgewählt, die einerseits unsicher sind (z.B. auch mit Hinblick auf zukünftige Entwick-
877 lungen) und andererseits einen signifikanten Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Folgende Pa-
878 rameter werden für eine Sensitivitätsprüfung ausgewählt:

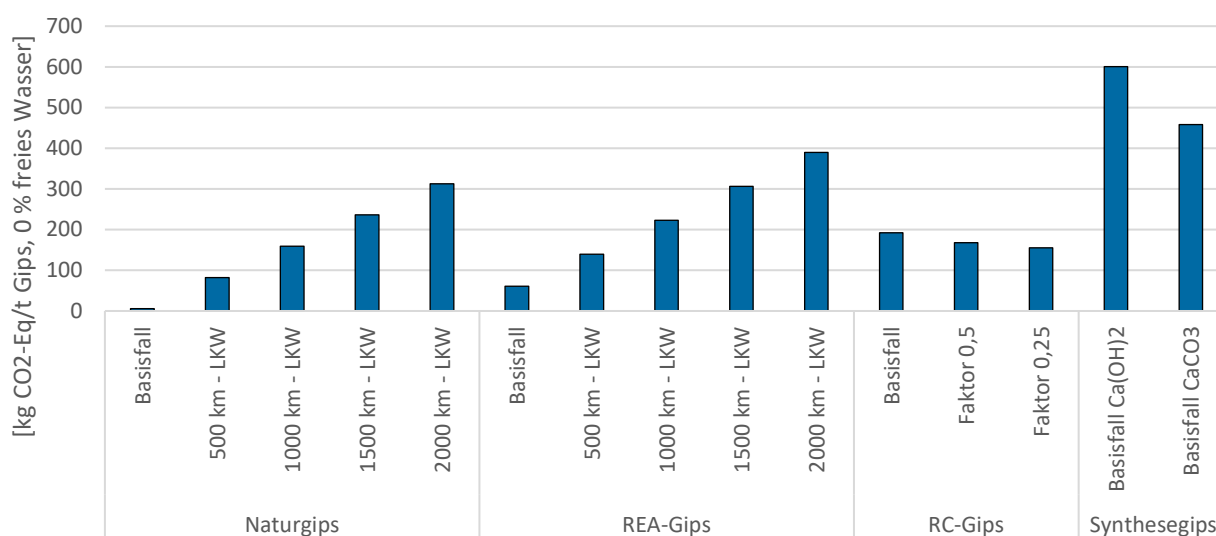
- 879 - **Transportdistanzen:** Transportdistanzen für REA-Gips und Naturgips fallen Stand heute
880 kaum ins Gewicht, können aber zukünftig aufgrund einer nationalen Verknappung stark an-
881 steigen. Gleichzeitig können sich die Transportdistanzen bei RC-Gips aufgrund einer Aus-
882 weitung des Anlagenbestandes reduzieren.
- 883 - **Optimierung des Systems Synthesegips:** Relevante und unsichere Parameter im System
884 Synthesegips sind Transportlasten und die Behandlung des sauren Abwassers. Hinsichtlich
885 der Transportlasten kann erwogen werden, die Altbatteriesäure vor einem Transport zur Auf-
886 bereitungsanlage aufzukonzentrieren. Hinsichtlich der Behandlung des sauren Abwassers
887 kann über Alternativen zum Einsatz von Natronlauge zur Neutralisierung nachgedacht wer-
888 den.
- 889 - **Erweiterung der funktionellen Einheit:** Nach dem Prinzip des Nutzenkorbs soll der Sekun-
890 därnutzen in den Systemen RC-Gips und Synthesegips quantifiziert werden. In der bisheri-
891 gen Modellierung wird den Systemen nicht Rechnung getragen, dass diese auch für die Ent-
892 sorgung eines Abfallstroms (EoL GFP bzw. Altbatteriesäure) aufkommen, welcher ansonsten
893 anderweitig entsorgt werden müsste.

894 Die Sensitivitätsanalysen werden primär anhand der Wirkungskategorie GWP durchgeführt und nur
895 nach dem cut-off-Ansatz berechnet.

Variierung der Transportdistanzen

Perspektivisch könnte die Bereitstellung von Naturgips bzw. REA-Gips unattraktiver werden, da beide Gipsarten perspektivisch einer Verknappung entgegensehen. Die Naturgipsförderung gerät seitens Naturschutzverbänden unter Druck, weil durch deren Abbau artenreiche Karstlandschaften zerstört werden und insbesondere beim Untertagebau in den Wasserhaushalt eingegriffen wird. Mit dem Ausstieg aus dem Kohleverstromung²⁸ fällt in Deutschland ab spätestens 2038 der REA-Gips aus Kohlekraftwerken weg. Es erscheint also plausibel, dass Gips in den nächsten Jahrzehnten aus dem Ausland importiert werden könnte. Bereits heute zeigen sich bei REA-Gips, die Auswirkungen des Kohleausstiegs. Da mehr und mehr Kohlekraftwerke abgeschaltet werden, werden die verbleibenden REA-Gipsmengen über weitere Strecken verteilt, damit die Gipswerke weiter produzieren können.²⁹ Um die Auswirkungen dieses Szenarios quantitativ auf die vorliegende Ökobilanz zu projizieren, wurden die Transportdistanzen für REA-Gips und Naturgips vom Basisfall auf 500, 1000, 1500 und 2000 km hochgesetzt. Als Transportmittel wurde ein LKW angesetzt. Weiterhin ist es möglich, dass sich die Transporte im System RC-Gips in den nächsten Jahren verringern. Stehen künftig mehr Aufbereitungsanlagen für GFP zur Verfügung, reduziert sich auch der Einzugsradius der entsprechenden Anlagen und die Transportdistanzen fallen kürzer aus. Die Transportdistanz im System RC-Gips wird zu diesem Zweck halbiert (Faktor 0,5) und geviertelt (Faktor 0,25). Abbildung 5-2 zeigt die Auswirkungen der genannten Variationen anhand der Wirkungskategorie GWP.

Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 1: Variierung der Transportdistanz
Wirkungskategorie: GWP



914

Abbildung 5-2 Auswirkungen der Erhöhung von Transportdistanzen für Naturgips und REA-Gips und eine Verringerung der Transportdistanzen für RC-Gips.

Ab einer Transportdistanz von 1000 km per LKW zeigt das System REA-Gips höhere Lasten als RC-Gips. Bei Naturgips ist dieser Punkt bei einer Transportdistanz von 1500 km erreicht. Im System RC-Gips dagegen zeigt sich, dass sich durch eine Verringerung der Transportdistanzen kaum Verringerungen einstellen. Selbst bei einer Reduktion der Transportdistanzen um den Faktor 0,25 stellt sich

920

²⁸ In 2020 hat der Bundestag dem Kohleausstiegsgesetz zugestimmt, wonach bis spätestens 2038 kein Kohlestrom mehr in Deutschland erzeugt werden soll.

²⁹ Dies schlägt sich auch in der Preisstruktur nieder. Während für die Entsorgung von REA-Gips in der Vergangenheit Geld bezahlt werden musste, ist die Entsorgung heute mit Erlösen verbunden.

921 nur eine Verringerung der Gesamtlasten um 20 % in der Kategorie GWP ein. Für das System Syn-
922 thesegips gilt in allen Varianten, dass dieses am schlechtesten abschneidet. Die Wirkungsabschät-
923 zung für alle weiteren betrachteten Wirkungskategorien befindet sich in Anhang A-2 und soll an
924 dieser Stelle nicht diskutiert werden.

925 **Optimierung des Systems Synthesegips**

926 Die Verwertung von Altbatteriesäure zu Synthesegips kann gegebenenfalls aus ökologischer Sicht
927 optimiert werden. Einerseits kann darüber nachgedacht werden, die Schwefelsäure in der Altbatte-
928 riesäure vor dem Transport aufzukonzentrieren, um insgesamt weniger Masse zur Aufbereitungs-
929 anlage zu transportieren. Die Aufkonzentrierung wird durch eine Vakuumfiltration modelliert³⁰. An-
930 dererseits kann für die Neutralisierung des Abwassers ähnlich wie bei einer chemisch-physikali-
931 schen Anlage die eingesetzte Lauge auch ein Abfallprodukt sein. Diese würde dann zu null bilanziert
932 werden. Unter Berücksichtigung dieser beiden Optimierungen soll gezeigt werden, wie sich die Las-
933 ten im System Synthesegips verringern lassen.

934 Die Ergebnisse werden am Beispiel des GWP dargestellt. Es zeigt sich, dass durch die Aufkonzent-
935 rierung zwar die Transportaufwendungen stark reduziert werden. Dieser Vorteil wird aber durch den
936 Stromverbrauch des Vakuumverdampfers wieder zunichte gemacht. Es stellt sich also durch diese
937 Optimierung keine Verbesserung des Systems ein. Die Neutralisierung des Abwassers durch eine
938 abfallstämmige Lauge kann das GWP nur um etwa 5 % verringern. Somit werden durch beide Opti-
939 mierungsansätze keine nennenswerten Verbesserungen in der Kategorie GWP erwirkt und es stellt
940 sich keine Veränderung der Rangbildung ein. In diesem Zusammenhang muss ergänzt werden, dass
941 das optimierte System nur überschlägig modelliert wurde. Beispielsweise müsste für die Verwertung
942 des sauren Abwassers in einer chemisch-physikalischen Anlage auch ein zusätzlicher Transport
943 berücksichtigt werden.

³⁰ Der Stromverbrauch wird überschlägig mit 60 kWh/t verdampftem Wasser angesetzt. (Vergleiche H2O GmbH)

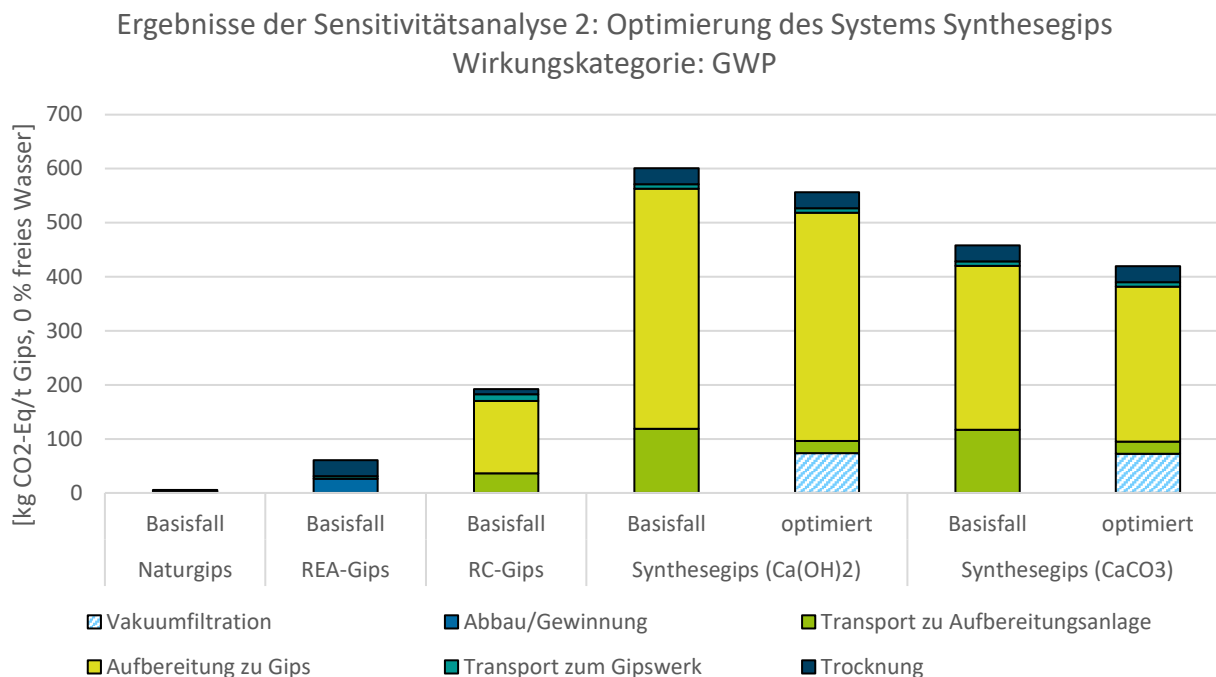


Abbildung 5-3 Auswirkungen einer Optimierung bei der Aufbereitung von Altbatteriesäure zu Synthesegips

Bei der Auswertung weiterer Wirkungskategorien zeigt sich, dass die Optimierung bei einigen wenigen Wirkungskategorien (AP, EP (terrestrisch), PM und POCP) zu einer deutlichen Verringerung der Lasten führt und so das System Synthesegips in etwa dieselben Lasten aufweist wie das System RC-Gips. Die Ergebnisse über alle Wirkungskategorien sind in Anhang A-3 dargestellt.

Erweiterung der funktionellen Einheit

Die Aufbereitung von GFP und Altbatteriesäure zu Gips wurde bisher lediglich vor dem Gesichtspunkt der Gipsbereitstellung betrachtet, da dies der eingangs definierten fE (vergleiche 2.2.2) entspricht. Bei der so festgelegten fE wird nicht beachtet, dass die Bereitstellung von Gips aus abfallstämmigen Materialien auch noch einen Sekundärnutzen mit sich bringt, nämlich die Entsorgung der Abfälle. Diese zweite Funktion kann in den betrachteten Systemen nach der Nutzenkorbmethode integriert werden. In dieser Sensitivitätsanalyse wird gezeigt, wie sich die Bilanzen verändern, wenn neben der Produktion von 1 Mg Gips auch noch die Entsorgung einer gewissen Menge an EoL GFP bzw. Altbatteriesäure betrachtet wird.

Im ersten Fall, bei der Verwertung von GFP, müssten die Vergleichssysteme Naturgips und REA-Gips neben der Bereitstellung von 1 t Gips auch die Entsorgung von 1,41 t EoL GFP leisten³¹. Diese Menge muss in den Vergleichssystemen entsprechend der sonst herkömmliche Entsorgungsart bilanziert werden. Abbildung 5-4 zeigt schematisch, wie sich die Erweiterung der funktionellen Einheit auf die zu bilanzierenden Systeme auswirkt.

³¹ Nach der Deponieverordnung ist eine Ablagerung der GFP eigentlich aufgrund des zu hohen Glühverlustes bzw. TOC nicht möglich. Der Glühverlust muss <5 % und der TOC <3 % bei Abfällen betragen. Beide Werte sind bei GFP überschritten. In der Praxis werden GFP trotzdem abgelagert, da sie zusammen mit mineralischen Bauabfällen entsorgt werden (Vermischung). In Summe sind dann die Werte nicht überschritten.

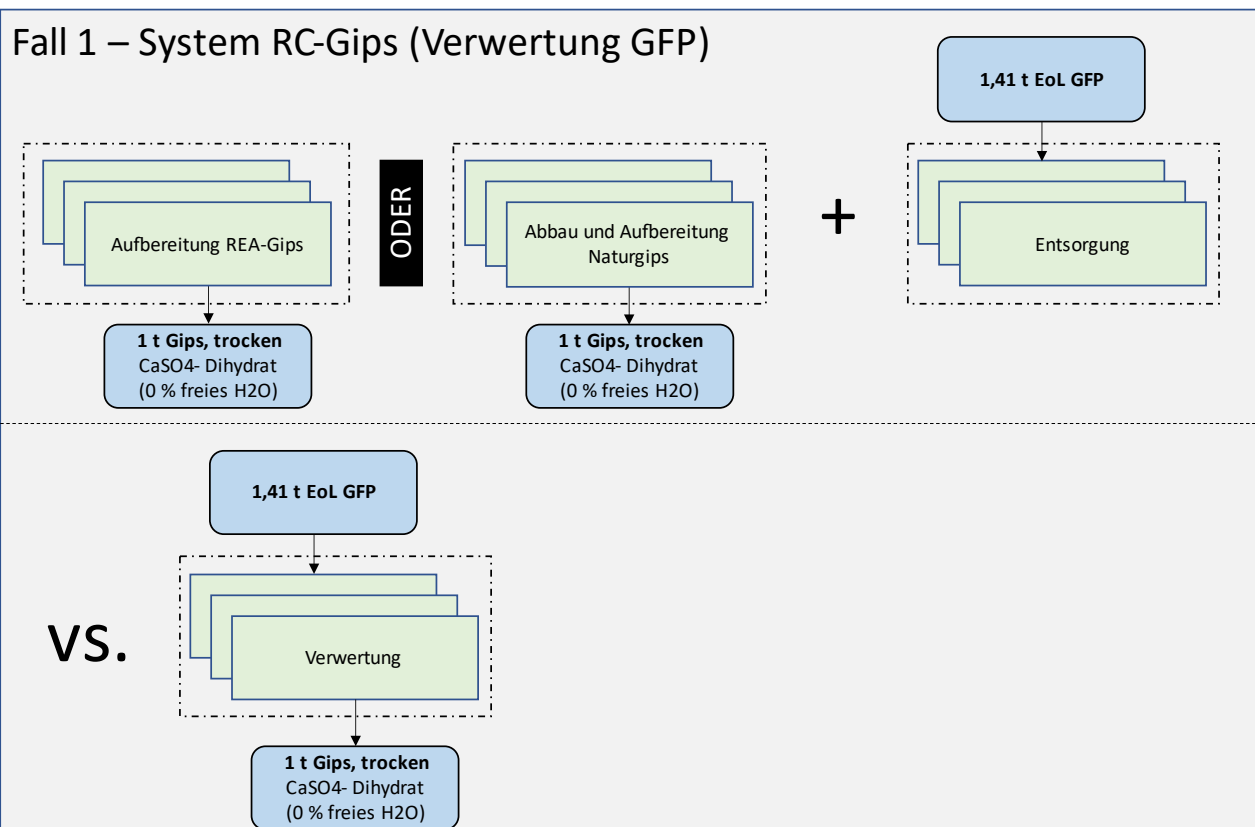


Abbildung 5-4 Erweiterung der funktionellen Einheit um den Sekundärnutzen der Abfallentsorgung. Fall 1 – Verwertung der GFP

Stand heute erfolgt die Entsorgung als Deponierung. Für die Deponierung der EoL GFP wird ein Transport zur Deponie von 40 km veranschlagt (Schätzung). Ausgehend von der Zusammensetzung der EoL GFP wird deren Deponierung anhand generischer ecoinvent Daten bilanziert, wie Tabelle 5-2 zeigt.

Tabelle 5-2 Inputs und Outputs bei der Bilanzierung der Entsorgung einer EoL GFP. Referenzfluss ist 1 t EoL GFP.

Inputs/ Outputs	Fluss	Menge	Einheit	Prozess
Inputs	EoL GFP	1	t	(lastenfrei)
	transport, freight, lorry, unspecified	40	t*km	market for transport, freight, lorry, unspecified - RER
Outputs	inert waste	0.055	t	treatment of inert waste, sanitary landfill - RoW
	waste gypsum	0.732	t	treatment of waste gypsum, sanitary landfill - Europe without Switzerland
	waste paperboard	0.183	t	treatment of waste paperboard, sanitary landfill - CH
	waste plastic, mixture	0.03	t	treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill - CH

Im zweiten Fall, bei der Verwertung von Altbatteriesäure müssen die Vergleichssysteme für die Entsorgung von etwa 3 Tonnen Altbatteriesäure aufkommen. Abbildung 5-5 zeigt die Erweiterung der funktionellen Einheit für diesen Fall.

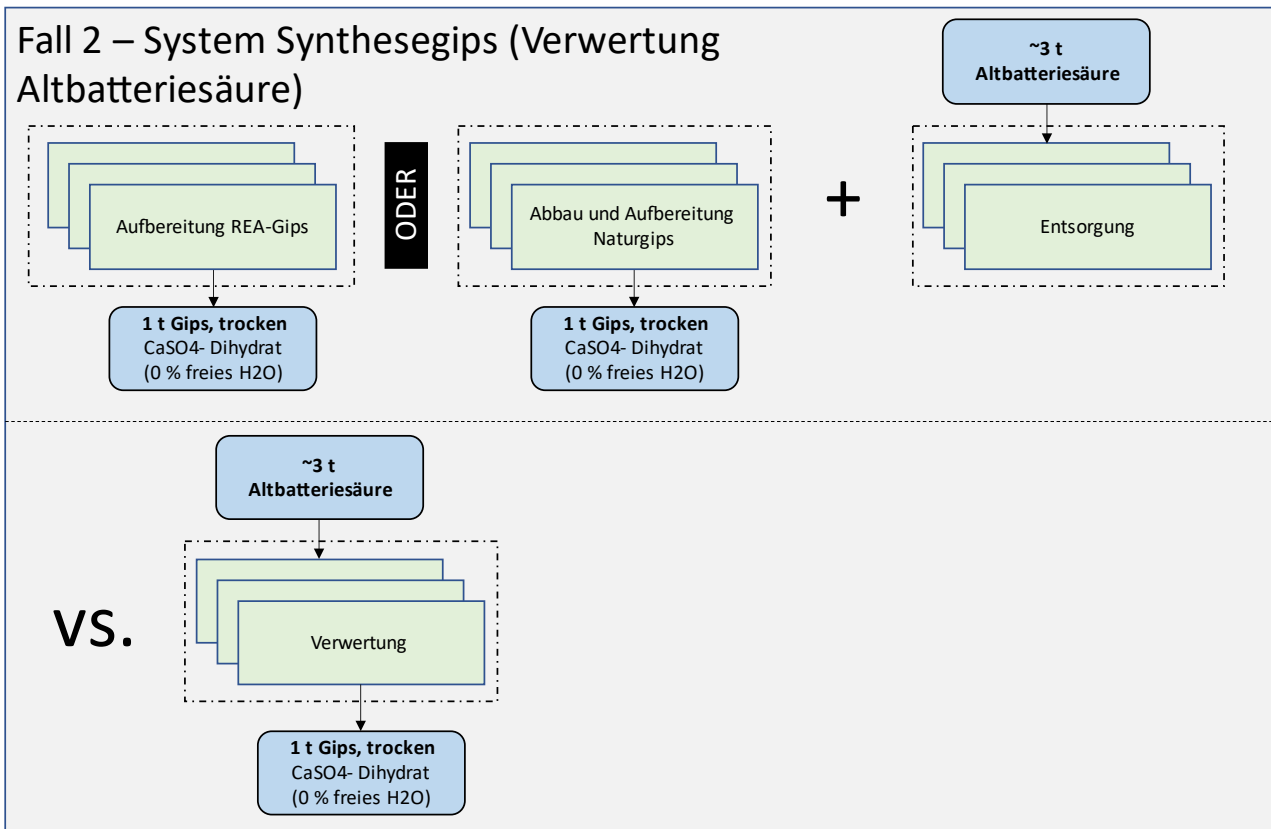


Abbildung 5-5 Erweiterung der funktionellen Einheit um den Sekundärnutzen der Abfallentsorgung. Fall 1 – Verwertung der GFP

Die Altbatteriesäure wird heute über eine chemisch-physikalischen Aufbereitungsanlagen verwertet. Die Transportdistanz wurde von Altbatterieverwertern im Schnitt mit 310 km angegeben. Wird vereinfacht davon ausgegangen, dass es sich um Natronlauge handelt, kann angesetzt werden, dass pro Mol Schwefelsäure 2 Mol Natronlauge benötigt werden ($\text{H}_2\text{SO}_4 + 2 \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$). Das heißt pro Tonne Altbatteriesäure (~20 % H_2SO_4) werden ~155 kg NaOH benötigt. Idealerweise ist die Menge an EoL Lauge und Säure ausgeglichen. Für den Fall, dass in der Aufbereitungsanlage ein Überschuss an Säure anfällt, muss aber Lauge zudosiert werden. Diese muss dann über die Primärroute bereitgestellt werden. Die zusätzlich benötigte Lauge kann über den ecoinvent Prozess „market for neutralising agent, sodium hydroxide-equivalent – RER“ modelliert werden.

Bei der Neutralisierung der Altbatteriesäure wird zunächst davon ausgegangen, dass die verwendeten Laugen abfallstämmig sind und somit lastenfrei ins System gehen. Abweichend wird auch noch geprüft, wie sich die Ergebnisse verändern, wenn 20 % der Lauge über die Primärroute bereitgestellt wird.

Der Energiebedarf bei der chemisch-physikalischen Aufbereitungsanlage wird als vernachlässigbar gering eingeschätzt. Output der Anlage ist ein Abwasserstrom, der über den ecoinvent-Prozess „market for wastewater, average - Europe without Switzerland“ bilanziert wurde. Gefällte Salze (z.B. Natriumsulfat) sind vermutlich stark verunreinigt und es wird daher eine Deponierung angesetzt (ecoinvent Prozess: „process-specific burdens, residual material landfill - Europe without Switzerland“).

Um die Systeme untereinander besser vergleichen zu können, werden die zusätzlichen Lasten, die für die Erfüllung der funktionellen Einheit in den Vergleichssystemen angesetzt werden, nicht dem Vergleichssystem angelastet, sondern alternativ von den Systemen RC-Gips und Synthesegips abgezogen. Abbildung 5-6 zeigt schematisch, wie sich die betrachteten Systeme nun gestalten.

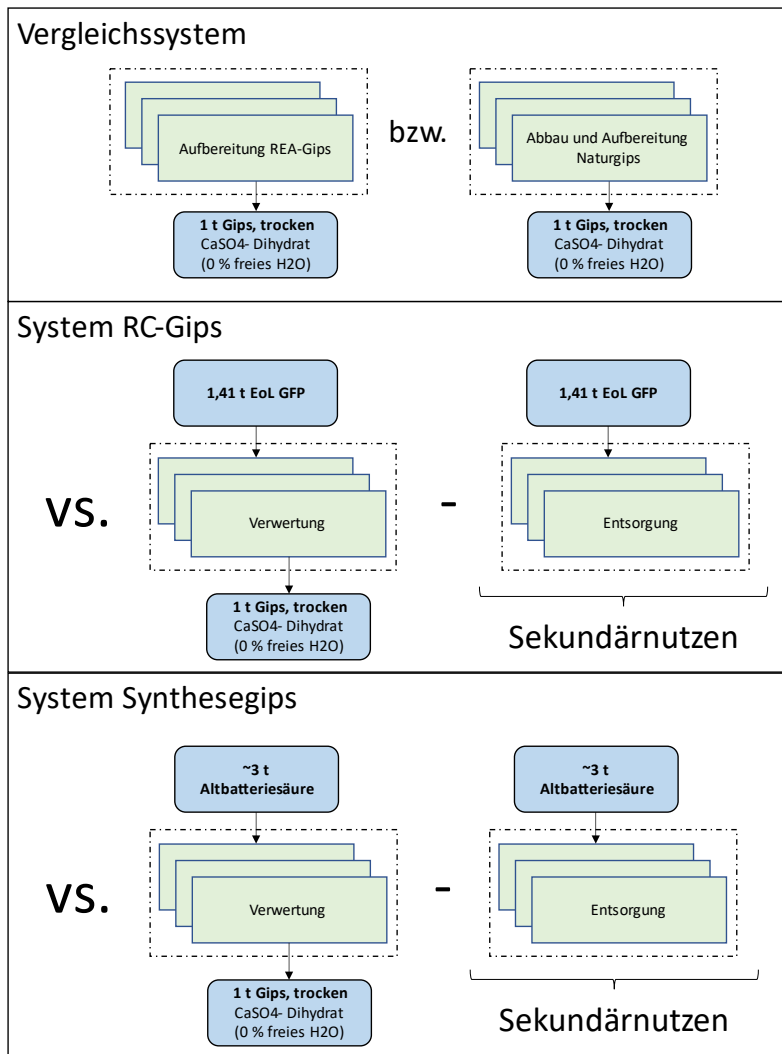
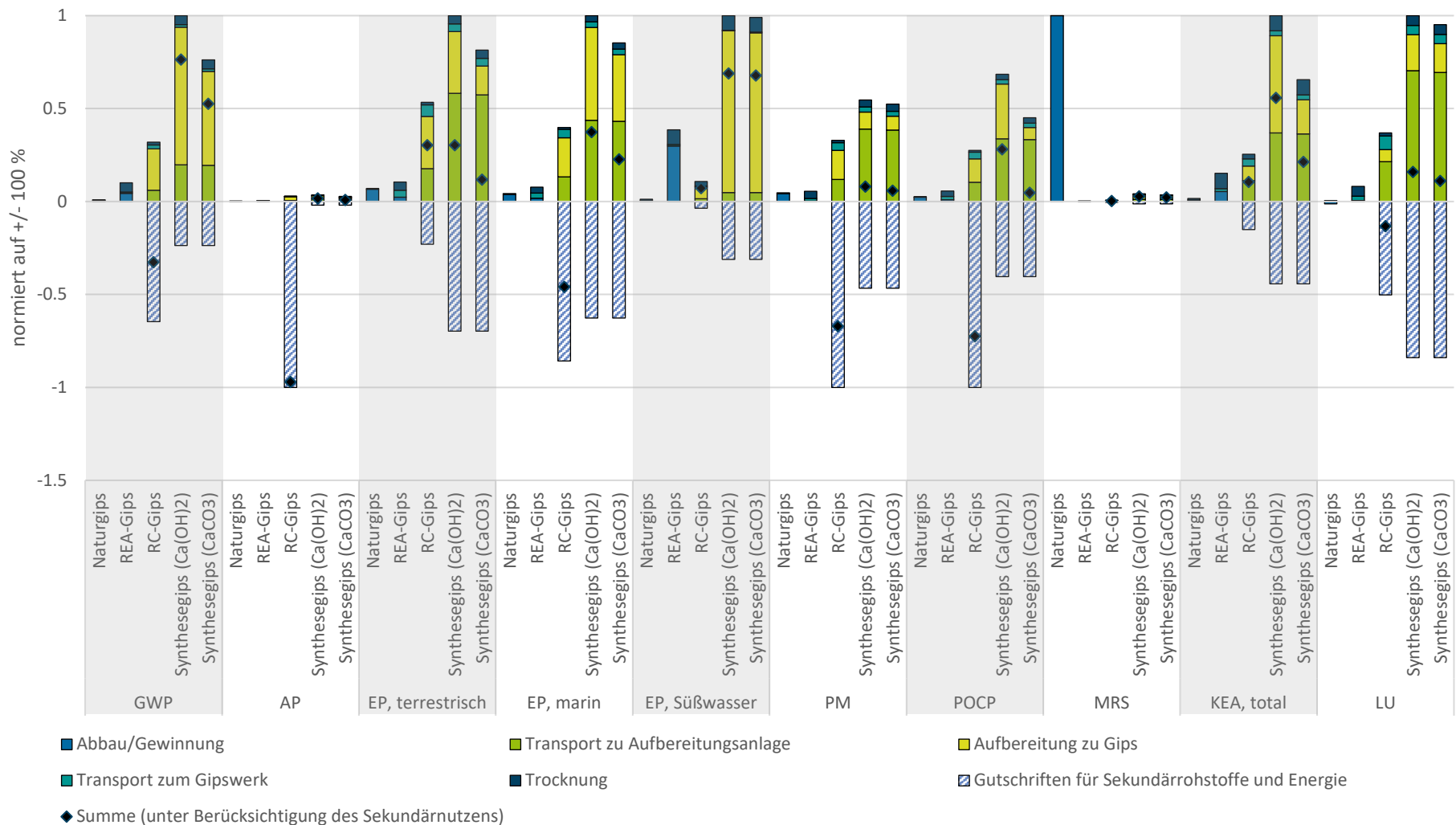


Abbildung 5-6 Systembetrachtung unter Berücksichtigung des Sekundärnutzens der stofflichen Verwertung

Da die Erweiterung der funktionellen Einheit weitgehende Veränderungen in allen Wirkungskategorien hervorruft, wird eine Auswertung für alle betrachteten Wirkungskategorien vorgenommen. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung befinden sich in Abbildung 5-7. Wird der Sekundärnutzen berücksichtigt so zeigt sich für fast alle Wirkungskategorien, dass das System RC-Gips gleich oder besser wie die Vergleichssysteme Naturgips und REA-Gips abschneiden. Eine Ausnahme bildet die Kategorie EP, terrestrisch. Auch für das System Synthesegips stellt sich unter der Berücksichtigung des Sekundärnutzens eine deutliche Verringerung der Lasten ein. Aufgrund des hohen Ausgangswertes stellen sich die Gesamtlasten aber nur in seltenen Fällen gleich oder geringer dar, als in den Vergleichssystemen (Kategorien, AP, PM und teilweise LU und EP, terrestrisch). In einer weiteren Variante wurde geprüft, wie sich die Ergebnisse verändern, wenn bei der Entsorgung von Altbatteriesäure innerhalb der chemisch-physikalischen Aufbereitungsanlage 20 % der Lauge über die Primärroute bereitgestellt wird. Es zeigt sich, dass sich dies nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse hat und sich die Aussage nicht ändert. Die Ergebnisse befinden sich in Anhang A-4.

Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 3: Erweiterung der funktionellen Einheit



1021

1022

1023

Abbildung 5-7 Auswirkungen der Erweiterung der funktionellen Einheit, um den Sekundärnutzen der Abfallentsorgung in den Systemen RC-Gips und Synthesegips zu berücksichtigen.

1024 5.3. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

1025 Diese Ökobilanz quantifiziert die Umweltauswirkungen für die Bereitstellung von Gips aus zwei ab-
1026 fallstämmigen Ausgangsstoffen, respektive EoL GFP und Altbatteriesäure. Diese werden ins Ver-
1027 hältnis zu den Umweltauswirkungen der zwei Routen gesetzt, über die Gips heute zum großen Teil
1028 gewonnen wird, die REA-Gips Route und die Naturgips Route (Vergleichssysteme).

1029 Für das System Synthesegipse fallen die Ergebnisse (mit Ausnahme MRS) schlechter aus als für
1030 die Vergleichssysteme. Für das System RC-Gips fällt die Bilanz in der Modellierung nach cut-off
1031 zunächst schlechter aus als für die Vergleichssysteme. Grund dafür sind Transporte und die Ver-
1032 wertung von Sekundärabfällen (insbesondere die energetische Verwertung der papier- und kunst-
1033 stoffreichen Fraktion). Werden nach der Substitutionsmethode jedoch auch Gutschriften für die Kop-
1034 pelprodukte bei der Verwertung der Sekundärabfälle erteilt, stellt sich das Ergebnis für das System
1035 RC-Gips in den meisten Kategorien (außer AP und EP) besser dar als in den Vergleichssystemen.

1036 5.3.1. Sensitivitätsanalysen

1037 Um die Robustheit der Ergebnisse zu erhöhen, wurden drei Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Hier-
1038 bei wurde der Fokus auf das GWP gelegt.

1039 **Transport:** Da in den Vergleichssystemen zukünftig deutlich höhere Transportlasten zu erwarten
1040 sind, wurden diese für die Systeme Naturgips zwischen 500 und 2000 km variiert. Ab Transportdis-
1041 tanzen zwischen 1000-1500 km schneidet das System RC-Gips in der Kategorie GWP besser ab.
1042 Die Lasten im System Synthesegips fallen auch bei Transportdistanzen von 2000 km höher aus als
1043 in den Vergleichssystemen.

1044 **Optimierung des Systems Synthesegips:** Das System Synthesegips weist im Basisfall augen-
1045 scheinlich Optimierungsbedarf auf. Durch zwei Anpassungen (Reduzierung der Transportlast durch
1046 Vakuumfiltration, Verwendung von abfallstämmiger Lauge zur Neutralisation des sauren Abwassers)
1047 konnte jedoch keine maßgebliche Verbesserung des Systems in der Kategorie GWP erwirkt werden.

1048 **Erweiterung der funktionellen Einheit:** Wird dem System RC-Gips der Sekundärnutzen (die Ent-
1049 sorgung von GFP) angerechnet, stellt sich das System auch hier über fast alle Wirkungskategorien
1050 (außer EP, KEA (total)) besser dar als die Vergleichssysteme. Bei Synthesegips, bewirkt die Be-
1051 rücksichtigung des Sekundärnutzens zwar eine Verringerung der Lasten, jedoch schneiden die Ver-
1052 gleichssysteme trotzdem bei fast allen Wirkungskategorien besser ab.

1053 5.3.2. Einschränkungen

1054 Die Einschränkungen der Bilanzen fallen Größtenteils in die Kategorie Grenzen der Ökobilanz.
1055 Durch die Methodik Ökobilanz kann immer nur ein Teil der ökologischen Wirkungen abgedeckt wer-
1056 den. Für einen Teil der ökologischen Wirkungen sind die entwickelten Wirkungskategorien (z.B.
1057 Wasserverbrauch, Toxizität) noch nicht ausgereift und wenig robust. Andere ökologische Wirkungen
1058 können gar nicht durch die Bilanz abgedeckt werden.

1059 Vor allem beim Untertageabbau von Naturgips sind Eingriffe in den Wasserhaushalt, wie beispiels-
1060 weise eine Absenkung des Grundwasserspiegels zu nennen. Weiterhin werden beim Abbau von
1061 Naturgips einzigartigen und artenreichen Karstlandschaften oder auch Höhlen zerstört. Die Katego-
1062 rie Landnutzung kann diesen Aspekt nicht abdecken, bzw. führt in der Bilanzierung sogar zu einem
1063 negativen und damit augenscheinlich fehlerhaften Ergebnis.

Ein weiterer Punkt ist die Kritikalität der eingesetzten Rohstoffe, die nicht ausreichend gut durch einen Ökobilanz abgebildet werden kann. Die Kategorie Ressourcenverknappung zeigt zwar für Gips genau den erwarteten Ausschlag, gleichzeitig fehlt aber bei anderen Ressourcen (wie beispielsweise Kalkstein) ein entsprechender Charakterisierungsfaktor, was die Vergleichbarkeit erschwert. Noch dazu liegen keine regionalisierten Charakterisierungsfaktoren vor, sondern nur globale Mittel. Dies erschwert die korrekte Beurteilung dieser Kategorie.

5.4. Fazit und Empfehlungen

Ungeachtet einer ökologischen Betrachtung gilt zunächst, dass die Erschließung alternativer Gipsquellen aus Sicht einer drohenden Verknappung von Gips in Deutschland unbedingt notwendig ist. Zweitens ist die stoffliche Verwertung von abfallstämmigen „Rohprodukten“ hin zu Gips aus Sicht einer Kreislaufwirtschaft ein verwertungstechnischer Imperativ. Daraus darf abgeleitet werden, dass die ökobilanziellen Ergebnisse zu den alternativen Gipsrouten gar nicht zwingend besser ausfallen müssen als die Vergleichsfälle, sondern auch ein schlechteres ökobilanzielles Ergebnis für die alternativen Gipsrouten gegenüber den Vergleichssystemen in Kauf genommen werden kann.

Bei dem Recycling von GFP (Systeme RC-Gips) zeigt die Ökobilanz sogar, dass das Ergebnis notwendigerweise gar nicht schlechter ausfällt als das der Vergleichssysteme. Insbesondere wenn Gutschriften für die Verwertung von Sekundärabfällen berücksichtigt werden und/oder der Sekundärnutzen der Entsorgung berücksichtigt wird, stellt sich das System deutlich besser als das Vergleichssystem dar. Ob die genannten Gutschriften in der Ökobilanz berücksichtigt werden oder nicht, ist zunächst eine methodische Wahl, bei der es nach ISO 14040 bzw. 14044 kein Richtig oder Falsch gibt. Es stellt auch keinesfalls ein „Schönrechnen“ der Ergebnisse dar, sondern zeigt auf wie sich die Ergebnisse bei unterschiedlichen Narrativen darstellen können.

Als Resümee wird für GFP unbedingt empfohlen deren Recycling voranzutreiben. Der alternative Entsorgungsweg stellt heute die Deponierung dar. Nach der Abfallhierarchie stellt die Deponierung die schlechteste Alternative dar, die zu einem Ressourcenverlust führt und sich aus Sicht einer Kreislaufwirtschaft nicht mehr verargumentieren lässt. Da die Abfallwirtschaft einerseits regelgetrieben und andererseits stark durch Wirtschaftlichkeit bestimmt ist können über eine Veränderung der Gesetzeslage und sinkende Recyclingkosten höhere stoffliche Verwertungsquoten für GFP erwirkt werden. In diesem Kontext sind zwei Aspekte zu nennen:

- Durch die Novellierung der Deponieverordnung im Jahr 2024 nach der "Abfälle, die zur Vorbereitung zur Wiederverwendung oder zum Recycling getrennt gesammelt werden [...] nicht [...] einer Deponie [...] zur Ablagerung zugeführt werden [dürfen]" (§7(3) DepV) wurde bereits ein wichtiger Akzent gesetzt.
- Zur Einordnung der Wirtschaftlichkeit des Recyclings von GFP kann auf einen vergleichbaren Abfallstrom geblickt werden – die Gipskartonplatte. Aufgrund der steigenden Annahmepreise von Bauabfällen an Deponien, ist das Recycling von Gipskartonplatten mittlerweile kostengünstiger als die Deponierung.

Für das System Synthesegips zeigen die ökobilanziellen Ergebnisse höhere Lasten als die Vergleichssysteme. Selbst bei einer Berücksichtigung des Sekundärnutzens fällt das Ergebnis in vielen Wirkungskategorien weiterhin schlechter aus als im Vergleichssystem. Aus oben genannten Gründen ist dieser Pfad trotzdem zu empfehlen, allerdings können die ökobilanziellen Ergebnisse nur bedingt als Argumentationsgrundlage dafür dienen. Als Ergebnis der Wirkungsabschätzung ist festzuhalten, dass die Fällung mit Kalziumkarbonat zu präferieren ist, da dabei durchwegs niedrigere Lasten auftreten als mit der Fällung mit Kalziumhydroxid.

Literaturverzeichnis

- AG Energiebilanzen (2023): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 bis 2022. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/>.
- AG Fernwärme (2023): Hauptbericht 2022. Frankfurt. Online verfügbar unter <https://www.agfw.de/zahlen-und-statistiken/agfw-hauptbericht>.
- Alwast, Holger (2020): Gutachten: "Umweltverträgliche Alternativen zum Abbau von Naturgips". Hg. v. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. - BUND. Alwast Consulting. Berlin.
- Bennamoun, Lyes; Arlabosse, Patricia; Léonard, Angélique (2013): Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28, S. 29–43. DOI: 10.1016/j.rser.2013.07.043.
- Buchert, Matthias; Bleher, Daniel; Bulach, Winfried; Knappe, Florian; Muchow, Nadine; Reinhardt, Joachim; Meinshausen, Ingo (2022): Kartierung des anthropogenen Lagers III (KartAL III). Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (47/2022). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kartierung-des-anthropogenen-lagers-iii-kartal-iii>.
- Buchert, Matthias; Sutter, Jürgen; Alwast, Holger; Schütz, Nadja; Weimann, Karin (2017): Ökobilanzielle Betrachtung des Recyclings von Gipskartonplatten. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (33/2017). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekobilanzielle-betrachtung-des-recyclings-von>.
- Bulach, Winfried; Dehoust, Günter; Mayer, Felix; Möck, Alexandra (2022): Ökobilanz zu den Leistungen der dualen Systeme im Bereich des Verpackungsrecyclings. Öko-Institut. Darmstadt/Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/oekobilanz-zu-den-leistungen-der-dualen-systeme-im-bereich-des-verpackungsrecyclings>.
- ISO 14067: DIN EN ISO 14067:2019-02, Treibhausgase_ - Carbon Footprint von Produkten_ - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (ISO_14067:2018); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO_14067:2018.
- Flamme, Sabine; Hanewinkel, Jörg; Quicker, Peter; Weber, Kathrin (2018): Energieerzeugung aus Abfällen: Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (51/2018).
- Fraunhofer ISE (2022): Energy-Charts. Nettostromerzeugung in Deutschland. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme. Freiburg. Online verfügbar unter https://energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE.
- GreenDelta (2024a): openLCA. Version 2.1.0.
- GreenDelta (2024b): openLCA LCIA methods. Version v.2.3.2. Berlin.
- H2O GmbH: Energierecycling im Vakuumverdampfer sorgt für Kosteneffizienz. Online verfügbar unter <https://www.h2o-de.com/de/consulting-engineering/vacudest-vakuumverdampfer-mit-energierecycling>, zuletzt geprüft am 03.07.2024.
- Haupt, M.; Kägi, T.; Hellweg, S. (2018): Modular life cycle assessment of municipal solid waste management. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 79, S. 815–827. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.03.035.
- Heindl, Albert (2016): Praxisbuch Bandtrocknung. Grundlagen, Anwendung, Berechnung. 1. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Klöpffer, Walter (2009): Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH. Online verfügbar unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527627158>.

- Kreißig, Johannes; Stoffregen, Alexander (2007): Datenprojekt Grunddatensätze Gips und Gipsprodukte im Netzwerk Lebenszyklusdaten. Projektbericht. Hg. v. Forschungszentrum Karlsruhe - Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse. PE International GmbH. Leinfelden-Echterdingen.
- Laurentiis, Valeria de; Secchi, Michela; Bos, Ulrike; Horn, Rafael; Laurent, Alexis; Sala, Serenella (2019): Soil quality index: Exploring options for a comprehensive assessment of land use impacts in LCA. In: *Journal of Cleaner Production* 215, S. 63–74. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.238.
- ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd_2:2020.
- ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020).
- Wernet, Gregor; Bauer, Christian; Steubing, Bernhard; Reinhard, Jürgen; Moreno-Ruiz, Emilia; Weidema, Bo (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *Int J Life Cycle Assess* 21 (9), S. 1218–1230. DOI: 10.1007/s11367-016-1087-8.

Anhang

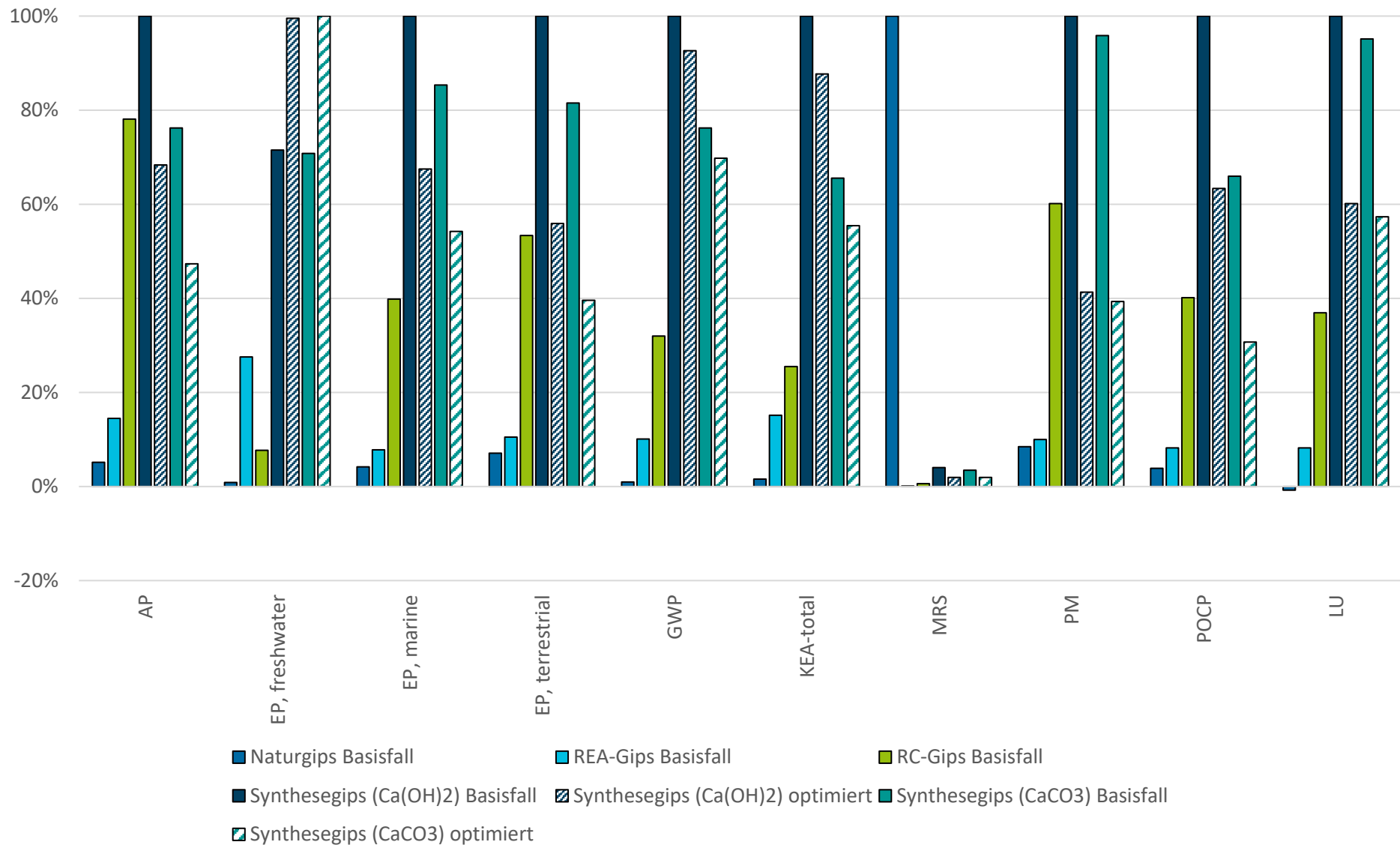
A-1. Absolute Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für alle betrachteten Wirkungskategorien. Nach der cut-off Methodik ohne Gutschriften nach der Substitutionsmethodik.

Wirkungskategorie	Naturgips	REA-Gips	RC-Gips	Synthesegips (CaOH ₂)	Synthesegips (CaCO ₃)	Einheit
Erderwärmung	5.7	60.5	192.0	600.9	458.1	kg CO ₂ eq
Versauerung	0.06	0.17	0.94	1.21	0.92	mol H ⁺ eq
Eutrophierung (terrestrisch)	0.28	0.42	2.11	3.95	3.22	mol N eq
Eutrophierung (marin)	0.02	0.04	0.19	0.48	0.41	kg N eq
Eutrophierung (Süßwasser)	0.0002	0.008	0.002	0.020	0.019	kg P eq
Feinstaubbildung	1.4E-06	1.6E-06	9.7E-06	1.6E-05	1.6E-05	disease incidence
Photochemisches Oxidationsbildungspotential	0.06	0.14	0.67	1.67	1.10	kg NMVOC eq
Ressourcennutzung (Minerale und Metalle)	3.6E-02	4.3E-05	2.2E-04	1.4E-03	1.2E-03	kg Sb eq
kumulierter Energieaufwand (gesamt)	74	709	1193	4681	3069	MJ
Landnutzung	-14	149	672	1819	1731	dimensionless (pt)

A-2. Sensitivitätsanalyse 1: Variierung der Transportdistanzen. Ergebnisdarstellung für alle betrachteten Wirkungskategorien. Ergebnisse sind auf 100 % normiert.

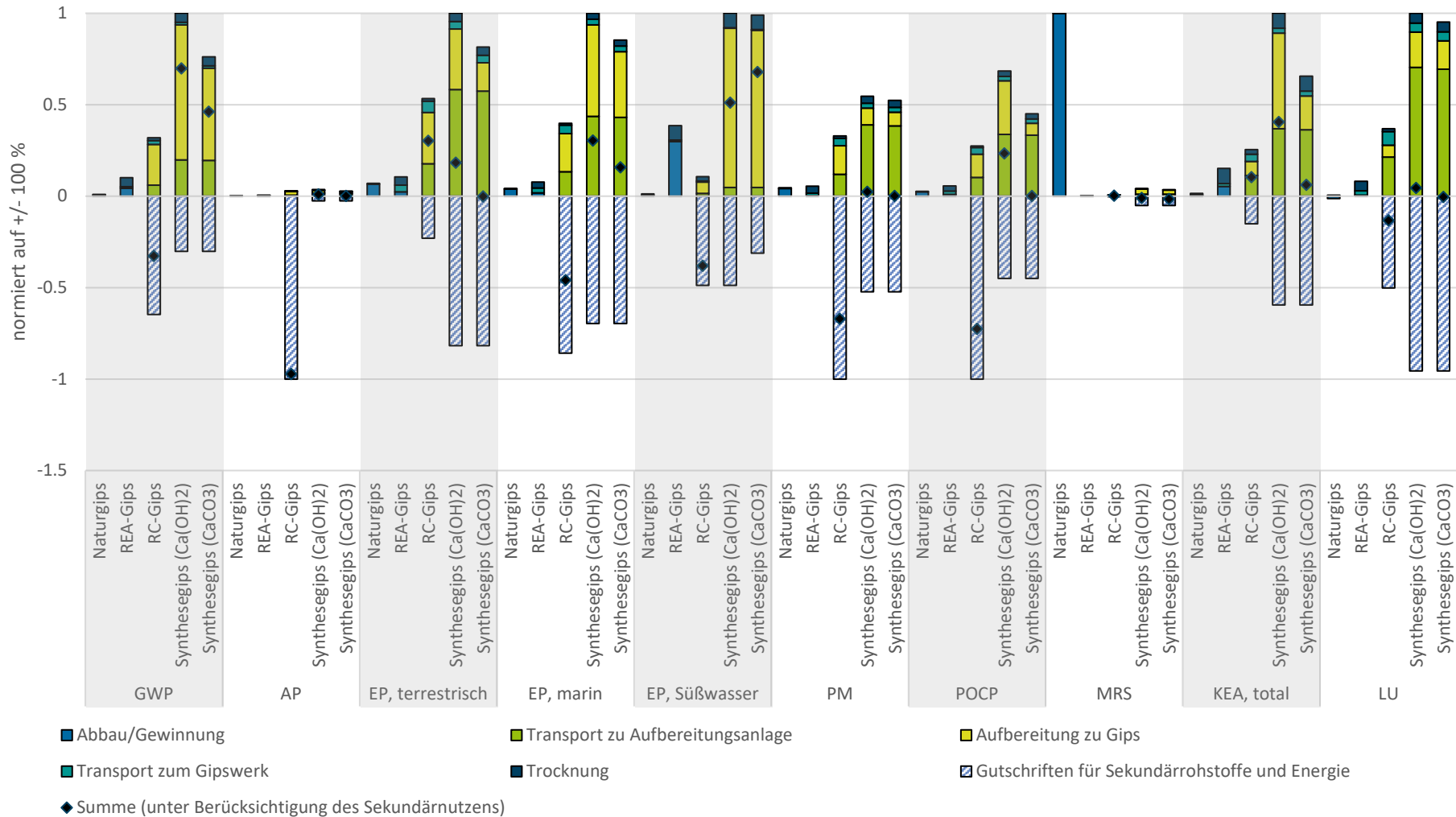
System		AP	EP, freshwater	EP, marine	EP, terrestrial	GWP	KEA-total	MRS	PM	POCP	LU
Naturgips	Basisfall	4%	1%	3%	4%	1%	1%	97%	4%	3%	0%
	500 km - LKW	25%	4%	25%	26%	14%	22%	98%	26%	25%	22%
	1000 km - LKW	46%	7%	47%	48%	26%	42%	99%	48%	47%	44%
	1500 km - LKW	67%	11%	69%	70%	39%	62%	99%	70%	69%	67%
	2000 km - LKW	88%	14%	92%	92%	52%	83%	100%	93%	91%	89%
REA-Gips	Basisfall	11%	39%	6%	6%	10%	13%	0%	5%	6%	4%
	500 km - LKW	31%	41%	28%	28%	23%	34%	1%	28%	28%	27%
	1000 km - LKW	54%	44%	52%	52%	37%	56%	2%	52%	52%	51%
	1500 km - LKW	77%	48%	76%	76%	51%	78%	2%	76%	76%	76%
	2000 km - LKW	100%	51%	100%	100%	65%	100%	3%	100%	100%	100%
RC-Gips	Basisfall	57%	11%	31%	31%	32%	22%	1%	29%	28%	18%
	Faktor 0,5	50%	10%	24%	24%	28%	15%	0%	22%	21%	11%
	Faktor 0,25	47%	9%	21%	21%	26%	12%	0%	18%	17%	8%
Synthesegips	Basisfall Ca(OH) ₂	73%	100%	78%	59%	100%	85%	4%	48%	69%	49%
	Basisfall CaCO ₃	56%	99%	67%	48%	76%	56%	3%	46%	46%	47%

A-3. Sensitivitätsanalyse 2: Optimierung des Systems Synthesegips. Ergebnisdarstellung für alle betrachteten Wirkungskategorien. Ergebnisse sind auf 100 % normiert.



A-4. Sensitivitätsanalyse 3: Erweiterung der funktionellen Einheit. Abweichend vom Basisfall werden bei der Entsorgung von Altbatteriesäure innerhalb der chemisch-physikalischen Aufbereitungsanlage 20 % der Lauge über die Primärroute bereitgestellt wird. Ergebnisse sind auf 100 % normiert.

Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 3: Erweiterung der funktionellen Einheit



Externes kritisches Gutachten

Critical Review, Bericht

Dr. Andreas Ciroth

19. August 2024

1 Hintergrund

Der vorliegende Bericht fasst das Ergebnis eines Critical Reviews zusammen, das in Anlehnung an ISO 14040 und 14044 für eine Ökobilanzstudie durchgeführt wurde. Details zur Studie und zum Review sind wie folgt:

- Die Studie wurde durchgeführt im Rahmen des Projekts Gipsrecycling 2.0 – Technische Vorbereitung der Verfügbarmachung von Gipsfaserplatten und Synthesegipsen zur Herstellung von RC-Gips – GipsRec2.0, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Förderrichtlinie „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)
- Durchführende Organisation: Öko-Institut e.V.
- Berichtsversion auf der das Critical Review beruht: Version vom 16. August 2024
- Art des Reviews: Review durch eine einzelne Person
- Durchführende Person: Dr. Andreas Ciroth

2 Vorgehensweise

Das Review wurde im Nachgang der Studie durchgeführt. Es umfasste unter anderem die kritische Prüfung der Vorgehensweise, der Modellerstellung, der Datensätze des Vordergrundsystems, der Ergebnisse sowie der Interpretation. Das komplette LCI Modell wurde nicht geprüft. Ziel und Untersuchungsrahmen der Studie wurde vorab zur Verfügung gestellt, Feedback zu Ziel und Untersuchungsrahmen wurde in der weiteren Studie berücksichtigt.

Der dann vorliegende Endbericht der Studie wurde in einer Iterationsstufe geringfügig überarbeitet.

3 Ergebnis der kritischen Prüfung

Die jetzt vorliegende Studie ist eine solide und sorgfältig durchgeführte Ökobilanz. Im Rahmen der Ökobilanz getroffene Entscheidungen erscheinen sachgerecht. Potenzielle Umweltwirkungen der verglichenen Varianten der Gipsproduktion werden klar herausgearbeitet, nachvollziehbar beschrieben und begründet. Die Ergebnisse erscheinen plausibel. Verschiedene Variantenrechnungen unterstützen das Verständnis der Zusammenhänge und geben Antworten auf die Sensitivität der Ergebnisse bei Änderung einzelner Annahmen und Modellwerte, beispielsweise zu Transportentfernungen und Entsorgungsvarianten. Schlussfolgerungen und Empfehlungen der Studie werden von den erstellten Modellen und den durchgeführten Modellrechnungen unterstützt.

Einzelne Ergebnisse der Studie sind auf den ersten Blick überraschend. Insbesondere die sehr niedrigen Umweltauswirkungen der Produktion von Naturgips aus Untertagebau, auch in der Kategorie Land Use, sind unerwartet. Gleichfalls trägt der Verbrauch von Kalkstein nicht zum mineralischen Ressourcenverbrauch bei. Die Studie spricht in der Ergebnisdiskussion beide Punkte an. Beide sind dem Stand der Ökobilanzmethodik geschuldet. Negative Umweltwirkungen hinsichtlich Abbau und Veränderung von Untertagesystemen, Beiträge zur Biodiversität, umfassendere Berücksichtigung des Verbrauchs von mineralischen Ressourcen auch im Hinblick auf regionale Verfügbarkeiten sind derzeit noch nicht als methodische Vorschläge existent und / oder nicht Stand der Technik in der Ökobilanzierung.

Insgesamt liefert die Studie daher eine korrekte, umfassende und sachgerechte Modellierung der Umweltauswirkungen verschiedener Produktionsverfahren für Gips in Deutschland, Bestehende Beschränkungen der Studie resultieren aus methodischen Beschränkungen der Ökobilanz.



Dr. Andreas Ciroth