



Rapport Carbotech: Comparaison écologique de la production de zinc à partir de boues d'hydroxyde d'usine de valorisation énergétique des déchets : procédé SwissZinc et procédé de tube roulant, 27 novembre 2023

SwissZinc AG
Berne, 16 Juin 2025

Bericht

Aktualisierung: Ökologischer Vergleich der Zink-Produktion aus KVA-Hydroxidschläm- men: SwissZinc-Verfahren und Wälz- rohr-Verfahren

Auftraggeber

SwissZinc AG, Wankdorffeldstrasse 102, 3014 Bern

Verfasser*in

Stefanie Conrad, Carbotech AG
Mischa Zschokke, Carbotech AG

Anzahl Seiten: 32

Zürich, 27. November 2023

Imprint

Titel

Aktualisierung:

Ökologischer Vergleich der Zink-Produktion aus KVA-Hydroxidschlämmen: SwissZinc-Verfahren und Wälzrohr-Verfahren

Auftraggeber

SwissZinc AG, Wankdorffeldstrasse 102, 3014 Bern

Auftragnehmerin

Carbotech AG, Zürich

Autor*innen

Stefanie Conrad und Mischa Zschokke

Projektleitung und Kontakt

Stefanie Conrad

+41 44 444 20 12

s.conrad@carbotech.ch

Externes Review

Dr. Fredy Dinkel

Hinweis

Für den Inhalt ist allein die Auftragnehmerin verantwortlich

Version

2.5

Datum

27. November 2023

—

Dieser Bericht wurde von der Carbotech AG mit Sorgfalt erarbeitet unter Verwendung aller uns zur Verfügung stehenden, aktuellen und angemessenen Hilfsmittel und Grundlagen, dies im Rahmen der vertraglichen Abmachung mit dem Auftraggeber unter Berücksichtigung der Vereinbarung bezüglich eingesetzter Ressourcen. Die verwendeten Daten und die Grundlagen der Bewertungsmethode, auf welcher dieser Bericht basiert, können ändern. Danach ist es möglich, dass die Schlussfolgerungen nicht mehr uneingeschränkt gültig und vom Auftraggeber nur noch auf eigene Verantwortung verwendbar sind. Aus dem Inhalt dieses Berichtes hervorgehende Veröffentlichungen, welche Resultate und Schlussfolgerungen daraus nur teilweise und nicht im Sinne des Gesamtberichtes darstellen, sind nicht erlaubt. Insbesondere dürfen solche Veröffentlichungen diesen Bericht nicht als Quelle angeben oder es darf nicht anderweitig eine Verbindung mit diesem Bericht oder der Carbotech AG hergestellt werden können. Für Forderungen ausserhalb des oben genannten Rahmens lehnen wir jegliche Verantwortung gegenüber dem Auftraggeber sowie Dritten ab.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1 Ausgangslage und Zielsetzung	7
2 Methodik und Vorgehen	8
2.1 Vorgehen bei der Ökobilanzierung	8
2.2 Ziel und Rahmenbedingungen	9
2.2.1 Zielsetzung	9
2.2.2 Funktionelle Einheit	10
2.2.3 Systemgrenzen	10
2.2.4 Zielgruppe	10
2.2.5 Betrachtete Verfahren	10
2.2.5.1 SwissZinc-Verfahren	10
2.2.5.2 Wälzrohr-Verfahren (Wälz- und Zinkverhüttungsprozess)	11
2.2.6 Grenzen der Studie	11
2.2.6.1 Inhaltliche Grenzen	11
2.2.6.2 Formale Grenzen	11
2.3 Sachbilanz	12
2.3.1 Modellierung des Systems	12
2.3.2 Vordergrunddaten und Abschätzungen	12
2.3.2.1 SwissZinc-Verfahren	12
2.3.2.2 Wälzrohr-Verfahren	12
2.3.3 Hintergrunddaten	13
2.4 Unsicherheiten und Sensitivitätsanalysen	13
2.4.1 Messungenauigkeiten	14
2.4.2 Systemische Unsicherheiten und Sensitivitäten	14
2.5 Allokation und Gutschriften	14
2.6 Wirkbilanz und Bewertung der Umweltbelastung	14
2.6.1 Die Methode der ökologischen Knappheit	15
2.6.2 Klimafussabdruck nach IPCC GWP 2021, 100a	16
3 Resultate und Diskussion	18
3.1 Umweltauswirkungen pro kg SHG Zink	18
3.2 Umweltauswirkungen pro Tonne Hydroxidschlamm	20
3.3 Sensitivitätsanalyse	22
3.3.1 Prozesse	22
3.3.2 Methoden	24
4 Fazit	25
5 Literatur	26
6 Abkürzungen	27
A1 Input Daten SwissZinc-Verfahren	6-II

A2 Input Daten Wälzrohr-Verfahren

6-IV

A3 Allokationen und Gutschriften

6-VI

Zusammenfassung

Ab dem 1. Januar 2026 gilt die Pflicht zur Metallrückgewinnung aus den anfallenden Filteraschen (FA) der Schweizer Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA). Bisher wird diese Metallrückgewinnung von vielen KVAs bereits erfolgreich umgesetzt, so dass heute bereits aus ca. 60% der Schweizer Filteraschen Metalle zurückgewonnen werden. Dabei kommt das Verfahren der sauren Flugaschenwäsche (FLUWA) beziehungsweise deren Weiterentwicklung zur direkten Metallrückgewinnung (FLUREC) zum Einsatz. Beim FLUREC-Verfahren der KEBAG wird metallisches Zink seit 2013 erfolgreich zurückgewonnen. Beim FLUWA-Verfahren werden die enthaltenen Metalle jedoch nicht direkt in der Schweiz zurückgewonnen, sondern in Form eines metallhaltigen Hydroxidschlammes im Ausland thermisch in einem Drehrohrprozess, Wälzprozess genannt, aufbereitet. Das entstehende Wälzoxid wird anschliessend der Zinkverhüttung zugeführt und dort in metallisches Zink umgewandelt.

Das FLUREC Verfahren seinerseits wurde zum SwissZinc-Verfahren weiterentwickelt. Für die Entscheidungsfindung zum allfälligen zukünftigen Einsatz des SwissZinc-Verfahrens werden in diesem Bericht die Umweltauswirkungen der Zinkrückgewinnung mit dem SwissZinc-Verfahren mit denjenigen zur Zinkrückgewinnung im Wälzverfahren in Deutschland miteinander verglichen.

Das Ziel der vergleichenden Ökobilanz war es, die gesamten Umweltwirkungen der Zinkproduktion aus dem aktuellen SwissZinc-Verfahren sowie dem Wälzverfahren mit anschliessender Zinkverhüttung zu quantifizieren und zu vergleichen. Dabei wurden die zurückgewonnenen Metalle mit entsprechenden Gutschiften berücksichtigt. Als Ergebnis wurden die gesamten Umweltauswirkungen und die Klimabelastung der Behandlung von 1 Tonne Hydroxidschlamm der beiden Verfahren berechnet und ausgewiesen.

Daraus ergaben sich die folgenden Erkenntnisse:

- Das SwissZinc-Verfahren zur Rückgewinnung von Zink aus KVA-Hydroxidschlamm ist wesentlich umweltfreundlicher und verursacht viel weniger klimarelevante Emissionen als das Wälzrohr-Verfahren mit anschliessender Zinkelektrolyse, siehe Abbildung 1.
- Da die SwissZinc Anlage direkt an die KVA der KEBAG angeschlossen sein wird und Strom und Wärme von der KEBAG beziehen wird, sind die Umweltauswirkungen des Energiebedarfs sehr gering. Die Umweltbelastung des SwissZinc-Verfahrens resultiert hauptsächlich aus dem Verbrauch von Betriebsmitteln und der Deponierung von Cadmium. Letztere sind bei beiden Verfahren gleich, da Cadmium aufgrund seiner toxischen Eigenschaften nicht wiederverwertet wird, sondern dem Stoffkreislauf durch Deponierung entzogen werden muss.
- Das Wälzrohr-Verfahren hingegen verursacht hohe Umweltbelastungen durch den Wärmeverbrauch (Trocknung Hydroxidschlamm und Betrieb Wälzrohr) und den Transport des Hydroxidschlammes.
- Die Umweltauswirkungen beider Verfahren hängen stark von der Energiequelle ab. Das SwissZinc-Verfahren hat einen hohen Umweltvorteil, solange es Strom und Wärme direkt von der KVA beziehen kann. Demgegenüber benötigt das Wälzrohr-Verfahren fossiles Koks zur Wärmeerzeugung und dieses kann nicht einfach ersetzt werden, da es zugleich als Reduktionsmittel benötigt wird.

Eine Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass das SwissZinc-Verfahren auch im schlechtesten Falle geringere Umweltauswirkungen hat als die Verwertung im Wälzrohr-Verfahren. In dieser Sensitivität wurde angenommen, dass die Wärme für das SwissZinc-Verfahren aus fossilen Energieträgern bereitgestellt wird und bei der Verwertung im Wälzrohr-Verfahren die Transporte und Trocknung des Schlammes soweit möglich optimiert werden.

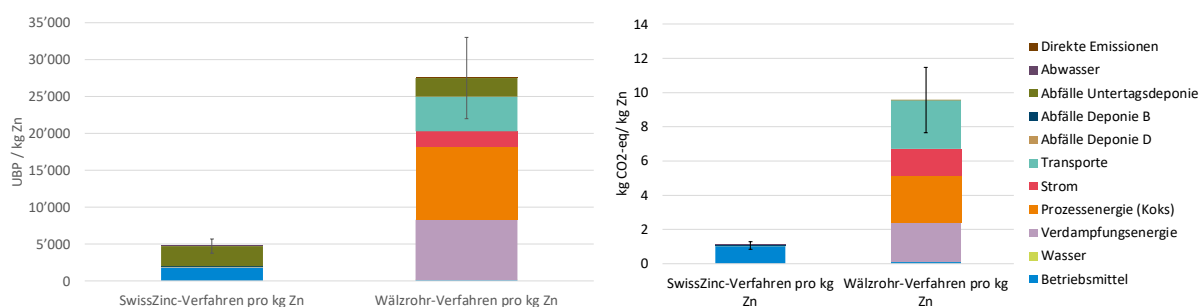


Abbildung 1: links: Gesamte Umweltauswirkungen beider Verfahren in Umweltbelastungspunkte (UBP) pro kg Zink; rechts: Klimabelastung beider Verfahren in kg CO₂ eq. Pro kg Zink

Wird 1 Tonne Hydroxidschlamm im SwissZinc-Verfahren verarbeitet, werden nebst Zink auch Kupfer, Blei und Salzsäure zurückgewonnen. Unter Berücksichtigung der Gutschriften für die Rückgewinnung der Metalle und der Salzsäure, ergibt sich insgesamt ein Umweltnutzen. Dies bedeutet: Mit dem SwissZinc-Verfahren können bei der Verarbeitung von 1 Tonne Hydroxidschlamm 6.24×10^5 UBP oder 135 kg CO₂ eq. vermieden werden. Somit ist die Rückgewinnung dieser Stoffe mit geringeren Umweltauswirkungen beziehungsweise Treibhausgasemissionen verbunden, als deren Primärproduktion.

Im Gegensatz dazu führt die Verarbeitung von 1 Tonne Hydroxidschlamm im Wälzrohr-Verfahren zu einer Umweltbelastung von 7.44×10^5 UBP oder Klimabelastung von 417 kg CO₂ eq., da die Umweltauswirkungen des Verfahrens die Gutschriften für die Rückgewinnung von Zink und Blei übersteigen. Daher verursachen die im Wälzrohr-Verfahren zurückgewonnenen Metalle eine höhere Klima- und gesamte Umweltbelastung als deren Primärherstellung.

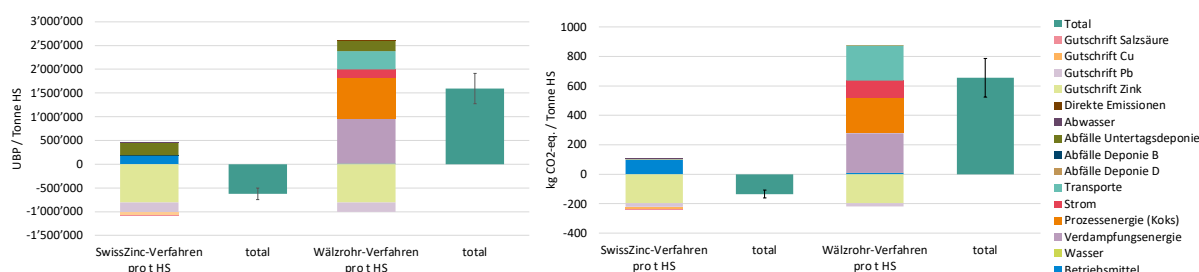


Abbildung 2: Links: Umweltbelastung in UBP pro Tonne Hydroxidschlamm; Rechts: Klimabelastung in kg CO₂-eq. pro Tonne Hydroxidschlamm.

Die Berechnungen für die Verarbeitung von Hydroxidschlamm im Wälzrohr-Verfahren basieren auf Daten zur Produktion von Wälzoxid und Wälzschlacke. Diese Daten sind unter anderem aufgrund fehlender Daten oder Angaben aus anderen Studien mit Unsicherheiten behaftet. Die Prozesse zur Zinkrückgewinnung aus dem Wälzoxid wurden angenähert. Es lagen keine Informationen zur Entsorgung der Wälzschlacke vor, daher mussten hierzu die Annahme getroffen, dass die stark mit Cadmium belasteten Abfälle wie beim SwissZinc-Verfahren in einer Untertagedeponie entsorgt werden.

Die Erstellung der Studie wurde von einem externen Review begleitet.

1 Ausgangslage und Zielsetzung

Ab dem 1. Januar 2026 gilt die Pflicht zur Metallrückgewinnung aus den anfallenden Filteraschen (FA) der Schweizer Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA). Eine Untersuchung aller Schweizer KVA-Filteraschen ergab eine jährlich rückgewinnbare Zinkfracht von $2'000 \pm 400$ Tonnen. Bisher wird diese Metallrückgewinnung von vielen KVAs bereits erfolgreich umgesetzt, so dass heute bereits aus ca. 60% der Schweizer Filteraschen Metalle zurückgewonnen werden (Haupt & Hellweg, 2018). Dabei kommt das Verfahren der sauren Flugaschenwäsche (FLUWA) beziehungsweise deren Weiterentwicklung zur direkten Metallrückgewinnung (FLUREC) zum Einsatz. Beim FLUREC-Verfahren der KEBAG wird Zink seit 2013 direkt aus den FA als Metall erfolgreich zurückgewonnen. Beim FLUWA-Verfahren werden die in den FA enthaltenen Metalle jedoch nicht direkt in der Schweiz zurückgewonnen, sondern in Form eines metallhaltigen Hydroxidschlammes im Ausland thermisch in einem Drehrohrprozess, Wälzprozess genannt, aufbereitet. Das entstehende Wälzoxid wird anschliessend der Zinkverhüttung zugeführt und dort in metallisches Zink umgewandelt.

Das FLUREC Verfahren seinerseits wurde zum SwissZinc-Verfahren weiterentwickelt: dieser Prozess ermöglicht die Rückgewinnung von metallischem Zink ab Hydroxidschlamm. Die zentrale Verarbeitung von Hydroxidschlamm und die lokale Produktion von Zink wäre eine Möglichkeit zur lokalen Kreislaufschliessung, Erhaltung der Entsorgungssicherheit und Erhöhung der Versorgungssicherheit.

Für die Entscheidungsfindung zum allfälligen zukünftigen Einsatz des SwissZinc-Verfahrens werden in diesem Bericht die Umweltauswirkungen der Zinkrückgewinnung aus dem Hydroxidschlamm mit dem SwissZinc-Verfahren mit denjenigen zur Zinkrückgewinnung im FLUWA-Verfahren mit anschliessendem Wälzverfahren in Deutschland miteinander verglichen.

Der Bericht basiert auf die Studie zum ökologischen Vergleich der Zink-Produktion aus KVA-Hydroxidschlamm: SwissZinc-Verfahren und Wälzrohr-Verfahren» von 2018 inkl. Update von 2022 (Haupt & Hellweg, 2018; Mehr & Hellweg, 2022)

Das Ziel der vergleichenden Ökobilanz ist es, die gesamten Umweltwirkungen der Zinkproduktion aus dem aktuellen SwissZinc- Verfahren sowie dem Wälzverfahren mit anschliessender Zinkverhüttung zu quantifizieren und zu vergleichen. Neu wurden die zurückgewonnenen Metalle mit entsprechenden Gutschiften berücksichtigt. Alternative ausländische Verwertungswege, die nicht Zinkmetall als Produkt ergeben, wurden hier nicht mit untersucht.

2 Methodik und Vorgehen

Aufgrund der Komplexität der Natur und des globalen Wirtschaftssystems reicht es nicht nur einzelne Problemstoffe oder lokale Auswirkungen zu betrachten. Aus dem Anspruch an eine umfassende Beurteilung ergeben sich die folgenden Anforderungen an die Methode:

- Möglichst umfassende Berücksichtigung der verschiedenen Umweltauswirkungen, wie z.B. Auswirkungen auf das Klima, die menschliche Gesundheit, Ökosysteme, Ressourcen etc.
- Berücksichtigung des gesamten Lebensweges von der Rohstoffgewinnung bis zur Verwertung oder Entsorgung.
- Quantifizierung der Umweltauswirkungen, um fundierte Aussagen zur Relevanz machen zu können.
- Soweit möglich wissenschaftlich abgestützt, um eine hohe Transparenz, Zuverlässigkeit und Akzeptanz zu erreichen.
- Bewertung der verschiedenen Auswirkungen auf der Basis von gesellschaftlichem und wissenschaftlichem Konsens, damit Entscheidungen nicht auf subjektiven Wahrnehmungen oder Interessen erfolgen.

Die Ökobilanzierung respektive Lebenszyklusanalyse („Life Cycle Assessment“, LCA) ist eine Methode, um die Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten auf die Umwelt zu erfassen, zu beurteilen und daraus Optimierungspotentiale abzuleiten. Sie ist diejenige Methode, welche heute die obigen Anforderungen am besten erfüllt. Die Ergebnisse der Ökobilanz können eingesetzt werden:

- als Entscheidungshilfen bei verschiedenen Varianten
- zur Erfassung der relevanten Auswirkungen
- zur Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren
- in der strategischen Planung zur Ermittlung von Optimierungspotentialen
- zur Beurteilung von Massnahmen
- als Grundlage für Eco-Design
- zur Ableitung von Handlungsempfehlungen

Diese Methode wird in diesem Projekt verwendet, um den Vergleich der ökologischen Auswirkungen der untersuchten Verfahren zu machen. Entsprechend wird der gesamte Lebensweg von der Ressourcengewinnung über Transporte, Herstellung bzw. Entsorgung berücksichtigt.

2.1 Vorgehen bei der Ökobilanzierung

Nachdem die Fragestellung und die zu untersuchenden Systeme definiert sind, werden die Waren-, Stoff- und Energieflüsse sowie der Ressourcenbedarf erfasst. Anschliessend werden die Auswirkungen auf die Umwelt mit Hilfe von gewählten Indikatoren, welche diese Wirkungen beschreiben, bestimmt. Mit dem Ziel, die Ergebnisse mit einer Kennzahl auszudrücken und damit die Auswertung zu ermöglichen oder zumindest zu erleichtern, kann eine Bewertung der verschiedenen Umweltauswirkungen durch eine entsprechende Gewichtung erfolgen.

Die Anforderungen an eine Ökobilanz und das Vorgehen bei deren Erstellung sind in der Norm ISO 14'040/44 (ISO, 2006a, 2006b; ISO/TC, 2006) definiert. Gemäss dieser Norm umfasst eine Ökobilanz die folgenden Schritte:

- Festlegen der Zielsetzungen und Systemgrenzen (Rahmenbedingungen)
- Erfassen der relevanten Stoff- und Energieströme sowie des Ressourcenbedarfs (Sachbilanz)
- Bestimmen der Auswirkungen auf die Umwelt (Wirkbilanz)
- Interpretation der Umweltauswirkungen aufgrund der Zielsetzungen (Bewertung)
- Erarbeiten von Massnahmen (Optimierung)

Wie Abbildung 3 zeigt, ist dies kein linearer Ablauf, sondern ein interaktiver Erkenntnis- und Optimierungsprozess.

Die vorliegende Studie richtet sich in den wesentlichen Aspekten nach der Norm ISO 14'040; in einzelnen Punkten, wie der Verwendung von gesamttaggregierenden Methoden, weicht die vorliegende Studie aus den in Kapitel 2.2.6.2 genannten Gründen von der Norm ab. Die Einhaltung der Norm würde verlangen, dass für vergleichende Ökobilanzen, welche für die Öffentlichkeit bestimmt sind, keine gesamttaggregierenden Methoden, welche die verschiedenen Umweltauswirkungen zu einer Kennzahl zusammenfassen, verwendet werden dürfen.

Auf die einzelnen Schritte bei der Erstellung der vorliegenden Ökobilanz wird im Folgenden eingegangen.

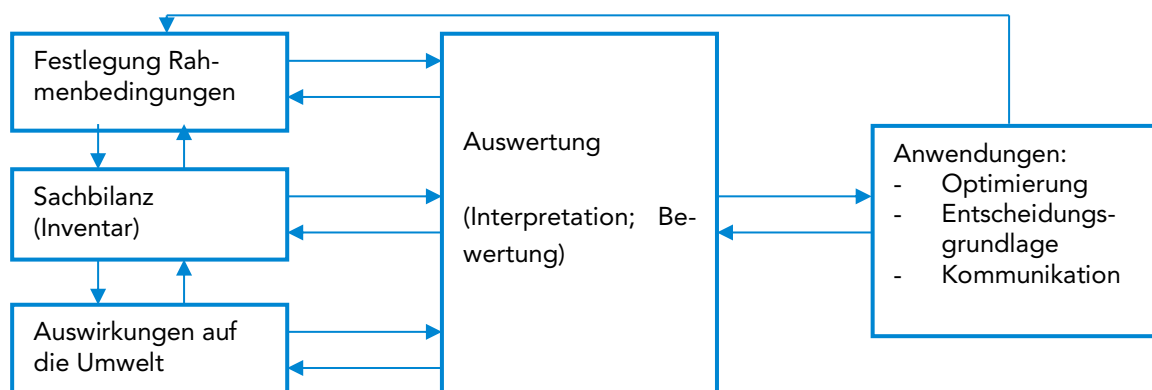


Abbildung 3: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14'040/44

2.2 Ziel und Rahmenbedingungen

Aus der Zielsetzung der Studie bzw. deren Fragestellung leitet sich die Definition der zu untersuchenden und vergleichenden Systeme ab. Daraus ergeben sich die Rahmenbedingungen und Systemgrenzen. Die Systemgrenzen definieren, welche Prozesse und vorgelagerten Prozesse berücksichtigt werden. Zudem wird etwa der zeitliche Rahmen der verwendeten Daten sowie die zu untersuchenden Umweltauswirkungen festgelegt.

2.2.1 Zielsetzung

Das Ziel der vergleichenden Ökobilanz ist es, die Umweltwirkungen der Zinkproduktion aus Hydroxidschlamm der KVA-Filterasche mit dem SwissZinc- Verfahren sowie dem Wälzverfahren mit anschliessender Zinkverhüttung zu quantifizieren und zu vergleichen. Zusätzlich soll bestimmt werden wie die beiden Verfahren bei der Verwertung von Hydroxidschlamm mit jeweiliger Metallrückgewinnung abschneiden. Alternative ausländische Verwertungswege, die nicht Zinkmetall als Produkt ergeben, wurden hier nicht untersucht.

2.2.2 Funktionelle Einheit

Um ein Produkt oder eine Dienstleistung mit entsprechenden Alternativen zu vergleichen, müssen diese denselben Nutzen erbringen bzw. dieselbe Funktion erfüllen. Die Grösse, auf welche sich der Vergleich bezieht, wird als funktionelle Einheit (FE) bezeichnet.

In dieser Studie wurden die folgenden zwei FE verwendet:

1. Erstens wurde als funktionelle Einheit in dieser Studie jeweils **1 kg special high grade (SHG)-Zink** betrachtet, welches aus den zwei Verfahren zurückgewonnen wird.
Damit kann die Frage beantwortet werden, wie hoch die Umweltauswirkungen der Rückgewinnung von Zink sind.
2. Zweitens wurde als funktionelle Einheit in dieser Studie jeweils **1 Tonne Hydroxidschlamm verarbeitet** betrachtet.
Damit kann die Frage beantwortet werden, wie hoch sind die Umweltauswirkungen der Behandlung von Hydroxidschlamm.

2.2.3 Systemgrenzen

Die Systemgrenzen der Ökobilanz umfassen die Produktion von sekundärem Zink aus Hydroxidschlamm. Dabei werden alle Betriebsmittel und Energieaufwände sowie die Entsorgung aller Abfälle berücksichtigt. Ebenso sind sämtliche Hintergrundprozesse (Ressourcenverbrauch, Energie, Transport etc.) der Produktionsschritte berücksichtigt, sofern nicht anders erwähnt.

Für alle Prozesse werden die Auswirkungen durch Emissionen in Boden, Luft und Wasser sowie der Ressourcennutzung (zum Beispiel energetische Ressourcen, Wasser oder Landnutzung) berücksichtigt.

Nicht berücksichtigt ist für beide Verfahren die benötigte Infrastruktur, da sie eine vernachlässigbare Rolle spielt. Der Prozess der sauren Wäsche, bei dem der Hydroxidschlamm aus der Flugasche gewonnen wird, ist bei beiden Prozessen gleich und wird daher nicht berücksichtigt.

2.2.4 Zielgruppe

Die Studie richtet sich in erster Linie an den Auftraggeber sowie an die interessierte Öffentlichkeit.

2.2.5 Betrachtete Verfahren

Die VVEA (VVEA, 2020) verlangt in Art 32 Absatz 2 g, dass Metalle aus der KVA Filterasche zurückgewonnen werden. In der Vollzugshilfe zur VVEA zur Rückgewinnung von Metallen aus der KVA Schlacke, siehe Seite 8 in (Bunge & Kaarina, 2023) wird unterschieden zwischen der Rohstoffperspektive und der Schadstoffperspektive. Unter die Rohstoffperspektive fallen Metalle, welche zurückgewonnen und einer neuen Anwendung zugeführt werden sollen. Dazu zählen z.B. Zink, Blei und Kupfer. Dagegen sollen die Metalle Cadmium und Quecksilber aufgrund ihres hohen Schadenpotentials nicht wieder in den Kreislauf gebracht sondern entsorgt werden.

In den beiden betrachteten Verfahren, wird Zink und Blei sowie beim SwissZinc-Verfahren zusätzlich Kupfer zurückgewonnen. Aufgrund der schweizerischen Gesetzgebung, wird dagegen angenommen, dass die cadmiumhaltigen Abfälle bei beiden Verfahren in eine Untertagedeponie gelangen.

2.2.5.1 SwissZinc-Verfahren

Das SwissZinc-Verfahren basiert auf dem FLUREC-Prozess, mit dem Unterschied, dass nicht wie bisher Filteraschen als Rohstoff eingesetzt, sondern neu Hydroxidschlämme in einem analogen Prozess aufbereitet und direkt in metallische Produkte umgewandelt werden. In einer ersten Stufe wird der Hydroxidschlamm mit verdünnter Salzsäure aufgeschlossen und die darin enthaltenen Metalle gelöst. In einer Filtrationsstufe wird der Laugungsrückstand, vor allem Gips, abgetrennt und das metallhaltige Filtrat der Metallrückgewinnung

zugeführt. Die weitere Aufbereitung des metallhaltigen Filtrates erfolgt analog zum FLUREC-Prozess bei der KEBAG in einer Zementierungsstufe (Blei-, Cadmium- und Kupferrückgewinnung) und anschliessend in einem Solventextraktionskreislauf, in dem Zink als hochreine Elektrolytlösung angereichert und anschliessend in der Zinkelektrolyse als special high grade Zink (SHG-Zink) mit einer Reinheit von >99.995 % zurückgewonnen wird. Der Laugungsrückstand und der anschliessend anfallende Rückstand aus der Abwasserbehandlung kann in der Schweiz deponiert beziehungsweise bei qualitativer Eignung im Zementwerk recycelt werden.

2.2.5.2 Wälzrohr-Verfahren (Wälz- und Zinkverhüttungsprozess)

Über den Zwischenpfad Hydroxidschlamm aus der sauren Flugaschenwäsche (FLUWA) kann eine Metallrückgewinnung aus KVA-Filteraschen im Wälzprozess stattfinden. Heute verfügen 12 KVAs über eine FLUWA und drei weitere KVAs lassen ihre Filterasche von einer dieser 12 Anlagen aufbereiten. Die dabei entstehenden Hydroxidschlämme aus Schweizer KVAs werden als Sonderabfall ins Ausland exportiert und dort in einem ersten thermischen Schritt in ein Zinkkonzentrat, das sogenannte Wälzoxid überführt. Dieses Wälzoxid wird danach im primären Zinkverhüttungsprozess anteilig eingesetzt und kann dort primäre Zinkerz Konzentrate substituieren.

2.2.6 Grenzen der Studie

2.2.6.1 Inhaltliche Grenzen

Folgende Grenzen hat diese Studie:

- Es werden nur ökologische Auswirkungen der Zinkrückgewinnung der zwei in Kapitel 2.2.5 beschriebenen Verfahren betrachtet. Die sozialen und ökonomischen Auswirkungen als zusätzliche Dimensionen der Nachhaltigkeit werden nicht berücksichtigt.
- Die Studie basiert weitgehend auf Daten des Herstellers und öffentliche Daten, in spezifischen Fällen können sich ggf. andere Resultate ergeben.
- Die Studie basiert auf schweizerischen Verhältnissen zum Beispiel bezüglich der Art der Entsorgung oder der Transportdistanzen.
- Die Resultate gelten nur für die getroffenen Annahmen. Bei anderen Rahmenbedingungen können sich andere Resultate ergeben.

Bei der Interpretation der Resultate müssen diese Grenzen berücksichtigt werden.

2.2.6.2 Formale Grenzen

Das Vorgehen der Ökobilanz richtete sich bezüglich der Erstellung der Sachbilanzen und Wirkungsabschätzungen nach der Norm ISO 14'040/44 (ISO, 2006a, 2006b) Bezüglich der Verwendung von gesamtintegrierenden Bewertungsmethoden zur Bewertung und Interpretation, wie dies bspw. die Methode der ökologischen Knappheit ist, welche die verschiedenen Umweltauswirkungen gewichtet und zu einem Indikator den Umweltbelastungspunkten (UBP) zusammenfasst, steht die Studie nur so lange in Übereinstimmung mit der Norm, als sie nicht veröffentlicht wird. Die Autor*innen der Studie sind jedoch der Überzeugung, dass es für die Entscheidungsfindung wesentlich sinnvoller ist, sich auf Methoden zu stützen, deren Gewichtung auf gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Konsensprozessen beruht, als dem Leser diese Gewichtung zu überlassen. Da Letzteres in vielen Fällen dazu führt, dass die Gewichtung nach Interesse oder Wissensstand subjektiv gemacht wird oder nur einzelne Aspekte herausgegriffen werden, welche vom Leser als wichtig erachtet werden. Mit dieser Einschätzung stehen die Autor*innen nicht alleine da. Dieses Thema wurde schon an internationalen, wissenschaftlichen Kongressen diskutiert und dabei wurde die Verwendung solcher Methoden ebenfalls als sinnvoll und teilweise sogar als notwendig erachtet, siehe z.B. (Kägi u. a., 2016). Zudem unterstützt und empfiehlt das BAFU die Verwendung von gesamtintegrierenden Methoden, falls dies mit der notwendigen Sorgfalt erfolgt.

2.3 Sachbilanz

2.3.1 Modellierung des Systems

In der Sachbilanz wird ein Modell für das zu bilanzierende System entworfen und es werden die Energie- und Stoffflüsse der damit verbundenen Prozesse erfasst. Diese umfassen:

- Die Beziehungen eines Prozesses mit anderen Prozessen der Technosphäre, wie zum Beispiel Menge an benötigten Rohmaterialien, Hilfsstoffen, Energiebedarf, Transporte oder Verwertungs- beziehungsweise Entsorgungssysteme.
- Die Beziehungen eines Prozesses mit seiner natürlichen Umwelt der Ökosphäre, wie z. B. Bedarf an Ressourcen (fossile Energieträger, Landressourcen etc.) und Emissionen, wie z. B. CO₂, VOC, Methan, Stickoxide u. a.

In der Sachbilanz werden die erfassten Daten, auch Vordergrunddaten genannt, mit den allgemeinen Daten aus der Datenbank, auch als Hintergrunddaten bezeichnet, verknüpft. Die Sachbilanz wurde mit der Ökobilanz-Software SimaPro V9.5 (PRé Consultants, 2023) berechnet und als Basis für die Wirkbilanz verwendet.

2.3.2 Vordergrunddaten und Abschätzungen

2.3.2.1 SwissZinc-Verfahren

Für die Vordergrunddaten des SwissZinc-Verfahrens wurden Daten von SwissZinc verwendet. Diese wurden von SwissZinc erhoben und uns zur Verfügung gestellt (siehe Anhang A1).

2.3.2.2 Wälzrohr-Verfahren

Für die Vordergrunddaten des Wälzverfahren wurden Daten aus dem Umweltbericht 2021 von Befesa Zinc Duisburg GmbH (Befesa Zinc Duisburg GmbH, 2021) verwendet und mit Annäherungen und Abschätzungen ergänzt. Die vorliegenden Daten aus dem BEFESA Umweltbericht 2021 beziehen sich auf die gesamten angenommenen Zinkhaltigen Abfälle (70'241 t/a). Die Annahme, dass die Zinkhaltigen Abfälle zu 94% aus Abfällen der Stahl- und Eisenindustrie bestehen und der Anteil mitverarbeiteter KVA-Hydroxidschlämme bei unter 1% liegt, wurde aus der Vorgänger Studie von (Haupt & Hellweg, 2018) entnommen. Analog zur erwähnten Studie wurde angenommen, dass der Hydroxidschlamm nach Freiberg transportiert wird und dort vor Ort, d.h. im Wälzrohr, getrocknet wird. Die wesentlichen Unterschiede der KVA-Hydroxidschlämme zu den zinkhaltigen Abfällen aus der Metallindustrie sind der höhere Wassergehalt und der geringere Zinkgehalt. Dies wurde berücksichtigt, indem die Mehrenergie für das Verdampfen des Wassers berücksichtigt und der Zink-Output entsprechend angepasst wurde (siehe Anhang A2). Bei der Verdampfung des Wassers wurde angenommen, dass auch die zinkhaltigen Abfälle aus der Metallindustrie einen gewissen Wasseranteil haben und dessen Verdampfung bereits in den Daten der Befesa enthalten sind. Da wir zum Wasseranteil dieser Abfälle keine Angaben hatten, wurde angenommen, dass dieser in der Größenordnung von KVA-Schlacke von rund 20% bzw. 80% TS liegt (Morf & Kuhn, 2009) Seite 106. Damit sich für das Wälzverfahren nicht zu hohe Belastungen ergeben, wurde für den zusätzlichen Wärmebedarf im Drehrohrföfen zur Verdampfung des Wassers nur die Differenz des Wassergehaltes des Hydroxidschlammes und der zinkhaltigen Abfälle aus der Metallindustrie berücksichtigt. Weiter wurde angenommen, dass die Betriebsmittelverbräuche für alle verwerteten zinkhaltigen Abfälle bezogen auf den Input gleich sind und somit aus den publizierten Daten übernommen werden können. Im Befesa Bericht werden als Emissionen nur die CO₂ Emissionen ausgewiesen. Die anderen Emissionen, welche bei der Koksverbrennung entstehen wurden aus ecoinvent übernommen.

Die Weiterverarbeitung des Wälzoxides zum metallischen Zink erfolgt durch anteilige Mitverarbeitung in primären Zinkhütten. Wälzoxid kann dabei zu maximal 10% den primären Rohstoffen (Erz-Konzentraten)

zugemischt und der Röstanlage der Zinkhütte zugeführt werden. Für diese Röststufe wurde nur die notwendige elektrische Energie und deren Bereitstellung berücksichtigt. Die Emissionen und Betriebsmittelverbräuche dieser Röststufe wurden nicht berücksichtigt, da keine detaillierten Daten dazu vorlagen. Die Daten für die nachfolgenden Laugungs-, Reinigungs-, Zinkelektrolyse- und Abwasserbehandlungsstufe wurden aus der Vorgänger Studie zur Modellierung der spezifischen Umweltauswirkung herangezogen. Als Betriebsmittel wurden dabei lediglich Elektrizität, Schwefelsäure und Kalk berücksichtigt. Ebenfalls wurden die angenommenen Transportdistanzen aus der Vorgänger-Studie übernommen (Haupt & Hellweg, 2018).

Es lagen keine Angaben vor, wie viel Zink und Blei aus dem Hydroxidschlamm mit diesem Verfahren zurückgewonnen werden kann. Für diese Studie wurde deshalb angenommen, dass die gleichen Mengen an Zink und Blei aus dem Wälzrohr-Verfahren wie aus dem SwissZinc-Verfahren zurückgewonnen werden können.

Als Neben- beziehungsweise Abfallprodukt entsteht beim Wälzoxid-Verfahren zudem eine kupferhaltige Schlacke, welche auf einer Reststoffdeponie entsorgt werden muss. In der Studie von (Haupt & Hellweg, 2018) wurde für die Kupferemissionen ein Gewichtungsfaktor für landwirtschaftlich genutzte Böden verwendet. Das erschien uns nicht sinnvoll. Wenn Kupfer ausgewaschen wird, so gelangt dieser ins Grundwasser. Dieser wird auch in den aktuellen LCA-Modellen zur Deponie-Entsorgung so berechnet. Da es bei den verwendeten Methoden keinen Gewichtungsfaktor für Kupfer im Grundwasser gibt, sondern nur einen Faktor in Oberflächengewässern, musste bezüglich des Austausches mit den Oberflächengewässern eine Annahme getroffen werden. Als worst-case wurde angenommen, dass 50 % des Kupfers in Oberflächengewässer gelangen. Dieser Wert ist bei einer Reststoffdeponie in der Realität sehr unwahrscheinlich. Daher wurde mit einer Relevanzanalyse geprüft, ob die Kupferemissionen aus der Deponierung wesentlich zum Resultat beitragen.

2.3.3 Hintergrunddaten

Die Vordergrunddaten wurden mit den Hintergrunddaten der Ökoinventardatenbank ecoinvent 3.9.1 verknüpft. Die Verwendung der ecoinvent-Hintergrunddatenbank ist weit verbreitet, da es sich bei ecoinvent um eine der weltweit führenden Datenbanken handelt. Ein wesentliches Qualitätsmerkmal dieser Datenbank ist deren Transparenz, welche sie von anderen Datenbanken mit vergleichbarem Datenbestand unterscheidet.

2.4 Unsicherheiten und Sensitivitätsanalysen

Modellierungen von komplexen Systemen, wie dies bei der Ökobilanzierung der Fall ist, sind immer mit Unsicherheiten verbunden. Dabei sind folgende Arten von Unsicherheiten zu unterscheiden:

- Messungenauigkeit
Diese treten zum Beispiel bei der Datenerfassung auf, aufgrund von Messfehlern, älteren Daten, fehlenden Daten oder der Verwendung von Durchschnittsangaben.
- Systemische Ungenauigkeit
Bei der Modellierung müssen immer wieder Annahmen getroffen werden, z.B. bezüglich durchschnittlicher Transportdistanzen, verwendeter Verfahren etc.
- Unschärfe oder Unsicherheit
Die Berechnung der Umweltauswirkungen basiert auf Modellen, welche nur bis zu einem gewissen Grad überprüft werden können, zum Beispiel weil die Prognosen in der Zukunft liegen oder die Auswirkungen nicht direkt gemessen werden können, zum Beispiel Humantoxizität. Zudem basieren die Gewichtungen der verschiedenen Auswirkungen auf gesellschaftlichen Werten, welche sich verändern können.

Wie mit den beiden Ungenauigkeiten umgegangen wurde, wird im Folgenden beschrieben. Um das Ausmass der Auswirkungen auf die Unschärfe und Unsicherheit abzuschätzen, wurde neben der Methode der

ökologischen Knappheit ergänzend die EF 3.1-Methode (European Commission. Joint Research Centre., 2023) angewandt.

2.4.1 Messungengenauigkeiten

Für das SwissZinc-Verfahren haben wir aktuelle Messdaten jedoch ohne Fehlerangaben erhalten und daher angenommen, dass deren Fehler gering sind. Für die Verteilung wurde eine Log-Normal-Verteilung angenommen. Die Unsicherheiten der Hintergrunddaten wurden ausecoinvent übernommen. Zur Bestimmung der Gesamtunsicherheit wurden für die beiden untersuchten Verwertungsverfahren jeweils Monte-Carlo-Analysen mit je 1'000 Durchläufen durchgeführt. Bei beiden Verfahren ergaben sich daraus Unsicherheiten im Bereich von 18 – 21 %, welche entsprechend in den Grafiken ausgewiesen werden.

Zudem können bei der Verknüpfung der Vordergrunddaten mit den Hintergrunddaten Unsicherheiten auftreten, z.B. wenn die Hintergrunddaten sich nicht auf dasselbe geographische Gebiet beziehen oder schon älteren Datums sind.

2.4.2 Systemische Unsicherheiten und Sensitivitäten

Zudem treten in Ökobilanzen Unsicherheiten aufgrund der gewählten Rahmenbedingungen auf. Diese Art der Unsicherheit wird berücksichtigt, indem die Aussagekraft der Ergebnisse mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen überprüft wird. Zur Bestimmung von sinnvollen Sensitivitätsanalysen werden die Resultate bezüglich ihrer relevanten Einflussgrößen analysiert und für diese Sensitivitäten durchgeführt.

2.5 Allokation und Gutschriften

Da bei den Verfahren zur Behandlung von Hydroxidschlamm neben Zink noch andere Produkte mit Wert entstehen, ist eine Allokation der verschiedenen Outputs notwendig.

Zusätzlich zur Aktualisierung der Ökobilanz der zwei Verfahren werden auch Gutschriften für die Metall-Rückgewinnung berücksichtigt.

Bei der Verwendung der 1. Funktionellen Einheit «1 kg SHG-Zink», siehe Kapitel 2.2.2, erfolgte die Allokation mittels Aufteilung. Das heisst, die Umweltauswirkungen der Verfahren wurde auf die verschiedenen Produkte aufgeteilt. Die Aufteilung wurden dabei entsprechend dem ökonomischen Wert der Produkte vorgenommen. Neben dem Hauptprodukt Zink entstehen dabei noch Bleizementat, Kupferzementat sowie 20 % Salzsäure. Genaue Angaben zu den Gutschriften werden im Anhang A1 abgebildet.

Bei der Verwendung der 2. Funktionellen Einheit «1 Tonne Hydroxidschlamm», siehe Kapitel 2.2.2, erfolgte die Allokation durch Substitution. Für die Substitution der entstehenden Blei- und Kupferzementate wurde deren ökonomischer Wert berücksichtigt.

2.6 Wirkbilanz und Bewertung der Umweltbelastung

In diesem Schritt wird die Sachbilanz bezüglich der Auswirkungen auf die Umwelt bewertet. Die Berechnung der Wirkbilanz beinhaltet die folgenden zwei Teilschritte:

- Klassifizierung (Einteilung der Stoffe und Ressourcennutzungen aus der Sachbilanz bezüglich ihrer Auswirkungen)
- Charakterisierung (Berechnung der Auswirkungen auf die Umwelt)

Dabei werden die verschiedenen Substanzen oder Ressourcennutzungen entsprechend ihres Schädigungspotenzials relativ zu einander gewichtet. Daraus ergeben sich die Schädigungspotenziale bezüglich einer

bestimmten Umweltauswirkung. So wird zum Beispiel beim Treibhauspotential CO₂ als Leitsubstanz verwendet und Beiträge von weiteren Treibhausgasen wie Methan und Lachgas in CO₂-Äquivalenten (CO₂ eq.) umgerechnet, welche die Auswirkungen auf das Klima charakterisieren.

Beim Resultat der Wirkbilanz handelt es sich um eine Zusammenstellung von verschiedenen Indikatoren, welche jeweils einen Aspekt der Umweltauswirkungen beschreiben. Um eine fundierte Entscheidungsbasis zu erhalten, können die verschiedenen Auswirkungen gewichtet und zu einer Kennzahl zusammengefasst werden. Die Gewichtung verschiedener Umweltauswirkungen ist ein Prozess, in welchen Werthaltungen einfließen und welcher deshalb für eine hohe Akzeptanz möglichst breit abgestützt sein muss.

2.6.1 Die Methode der ökologischen Knappheit

Im Rahmen dieser Studie wurde die Methode der ökologischen Knappheit 2021 (Frischknecht u. a., 2021) verwendet. Die Bewertung mittels der Methode der ökologischen Knappheit wurde unter Mitarbeit des Bundesamts für Umwelt entwickelt und ist in der Schweiz etabliert. Diese Methode wurde gewählt, weil sie für die Bewertung sowohl die Umweltsituation wie auch die Umweltziele der Schweiz berücksichtigt (vgl. Abbildung 4) und somit bezüglich Werthaltung breit abgestützt ist. Die Abbildung zeigt zudem, dass mit der Methode neben den Auswirkungen auf das Klima noch weitere Effekte auf die Umwelt erfasst werden. Betreffend der Verwendung gesamttaggregierender Methoden richtet sich die vorliegende Studie nicht nach der ISO Norm 14'040, sondern geht über diese hinaus¹.

Obwohl diese Methode die Werthaltung der schweizerischen Umweltpolitik widerspiegelt, hat sie auch international eine hohe Akzeptanz. Die Resultate werden in Umweltbelastungspunkten (UBP) ausgedrückt.

¹ Da die Bewertung der verschiedenen Umweltauswirkungen von Wertmassstäben abhängig ist, werden diese gesamttaggregierenden Methoden teilweise abgelehnt, z. B. auch von der ISO-Norm 14'044. Dabei ist zu beachten, dass auch eine Auswahl der Umweltauswirkungen subjektiv ist. Falls nur ein Teil der Auswirkungen, z. B. nur der CO₂-Fussabdruck betrachtet wird, kommt dies einer Gewichtung der anderen Auswirkungen mit Null gleich. Die Betrachtung der einzelnen Wirkkategorien kann durchaus hilfreich sein, z. B. zur Ermittlung der Ursachen von spezifischen Auswirkungen und Erarbeitung von möglichen Optimierungspotentialen. Als Entscheidungsgrundlage oder für die Betrachtung der gesamten Umweltauswirkungen dürfen jedoch nicht einzelne Umweltaspekte ausgeklammert werden. Dafür sind gesamt aggregierende Bewertungsmethoden nicht nur hilfreich sondern notwendig (Kägi u. a., 2016) und die Aussagekraft der Resultate abzusichern.

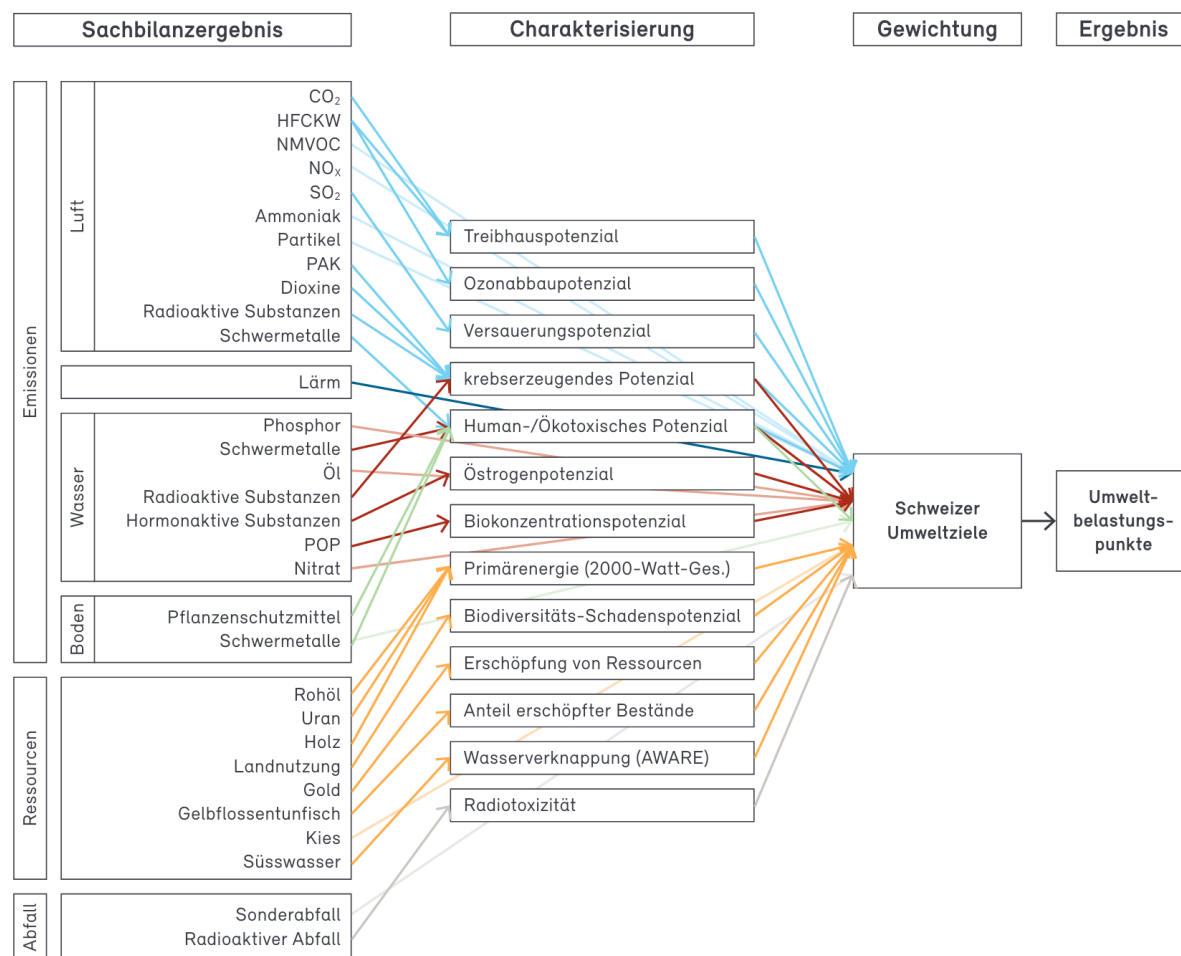


Abbildung 4: Grundschemata der Methode der ökologischen Knappheit 2021 (Frischknecht et al., 2021)

Bei der Methode der ökologischen Knappheit (Mök) (Frischknecht u. a., 2021) basiert die Bewertung der verschiedenen Umweltauswirkungen auf der Abweichung zwischen der heutigen Situation (Aktueller Fluss) und gesetzlichen Zielen, wie Grenzwerten, beziehungsweise politischen Verpflichtungen, wie zum Beispiel das Paris Abkommen bezüglich dem Klima (Kritischer Fluss). Der Anteil der Effekte auf das Klima weist auch innerhalb dieser Methode häufig einen signifikanten Beitrag zum Gesamtergebnis auf.

Die Charakterisierung wird benötigt, um die Schädlichkeit verschiedener Substanzen oder Ressourcennutzungen, welche eine bestimmte Umweltauswirkung verursachen, relativ zueinander zu charakterisieren. Weitere Details zu den Hintergründen der Methode sind in der entsprechenden Originalliteratur zu finden (Frischknecht u. a., 2021).

2.6.2 Klimafussabdruck nach IPCC GWP 2021, 100a

Das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ist ein internationales Gremium der Vereinten Nationen. Das Gremium veröffentlicht regelmässig Bewertungsberichte (Assessment Reports, ARs), die Charakterisierungsfaktoren für das globale Erwärmungspotenzial (GWP) enthalten. Die GWP-Werte werden für verschiedene Treibhausgase berechnet, einschliesslich Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und Fluorkohlenwasserstoffe (FKW). Für verschiedene Zeithorizonte (20, 100 oder 500 Jahre) wird dann die potenzielle Wirkung eines Kilogramms eines Treibhausgases im Vergleich zu einem Kilogramm CO₂ bestimmt. Somit können

atmosphärische Emissionen in äquivalente Emissionsmengen CO₂ umgerechnet werden. In dieser Studie wird der Klimafussabdruck für den Zeithorizont 100 Jahre verwendet, wie dies üblich ist. Die IPCC GWP 2021 Methode basiert auf den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen und wird regelmässig aktualisiert, um die Genauigkeit der Berechnungen zu verbessern. (IPCC, 2021).

3 Resultate und Diskussion

In Kapitel 3 wird eine Übersicht über die Umweltauswirkungen des SwissZinc-Verfahrens im Vergleich zum Wälzrohr-Verfahren dargestellt.

3.1 Umweltauswirkungen pro kg SHG Zink

In Abbildung 5 sind die gesamten Umweltauswirkungen in Umweltbelastungspunkte (UBP) der beiden Verfahren pro kg Zink dargestellt. Die Umweltauswirkungen für die Rückgewinnung von einem 1 kg SHG-Zink mit dem SwissZinc-Verfahren betragen rund 4'800 UBP. Mehr als die Hälfte (57%) der Umweltauswirkungen stammt aus der Deponierung von cadmiumhaltige Abfälle in der Untertags-Deponie. Cadmium fällt als Nebenprodukt bei der Zinkrückgewinnung an. Da Cadmium ein toxischer Schadstoff ist, sollte es so weit wie möglich aus dem Wirtschaftskreislauf ausgeschleust und in sichere Senken überführt werden. Ein Recycling ist daher nicht erwünscht. Des Weiteren machen die Betriebsmittel, vor allem Natriumcarbonat, Schwefelsäure und Kalziumoxid, knapp 40% der gesamten Umweltbelastung aus. Da das SwissZinc-Verfahren an der Kebag angegliedert ist, werden Strom und Wärme direkt von der Kebag bezogen. Entsprechend sind die Umweltauswirkungen des Energiebedarfs im SwissZinc-Verfahren sehr klein, da es sich dabei um ein Nebenprodukt der Abfallentsorgung handelt und daher die wesentliche Belastung der Abfallentsorgung angelastet wird. Die gesamten Umweltauswirkungen für die Rückgewinnung von 1 kg SHG-Zink mit dem Wälzrohr-Verfahren und anschliessender Zink-Elektrolyse betragen rund 28'000 UBP. Es wurde angenommen, dass der Hydroxidschlamm nach Freiberg transportiert und im Wälzrohr getrocknet wird. Rund 37 % der gesamten Umweltbelastung stammt aus dem Wärmeverbrauch, dies vor allem, weil die Nutzung von Koks als Energieträger im Vergleich zu anderen Energieträgern mit sehr hohen Umweltbelastungen verbunden ist. Da im Wälzrohrprozess Koks auch als Reduktionsmittel benötigt wird, kann dieser Energieträger nicht einfach ersetzt werden. Denkbar wäre ein Ersatz durch Wasserstoff, da dieser auch als Reduktionmittel dienen kann. Doch ist eine solche Umstellung nicht in absehbarer Zukunft zu erwarten. Der Energieaufwand um den Hydroxidschlamm zu trocknen macht rund 30 % der gesamten Umweltbelastungen aus. Die Transporte machen rund 17 % der gesamten Umweltbelastungen aus. Rund 8 % der gesamten Umweltbelastungen stammen vom Stromverbrauch, relevant ist hier vor allem der Stromverbrauch für die Zink-Elektrolyse. Die Deponierung des Ofenausbruches aus dem Wälzrohr trägt mit 9 % zur gesamten Umweltbelastung bei. Dies unter der Annahme, dass der Ofenausbruch wegen des hohen Gehaltes an Schwermetallen, wie zum Beispiel Cadmium, wie beim SwissZinc-Verfahren in einer Untertags Deponie entsorgt wird.

Abbildung 6 zeigt die Klimabelastung der beiden Verfahren in kg CO₂ eq. pro kg Zink. Da diese Methode lediglich die Treibhausgasemissionen berücksichtigt, hat die Deponierung von Schwermetallen aus beiden Verfahren keine relevanten Auswirkungen auf die Klimabelastung. Demnach wird die Klimabelastung von 1.10 kg CO₂eq. für die Rückgewinnung von 1 kg SHG-Zink aus dem SwissZinc-Verfahren von den Betriebsmitteln dominiert (Kalziumoxid, Natriumcarbonat und Schwefelsäure). Da, wie oben beschrieben, die Energie für das Verfahren direkt von der Kebag bezogen wird, ergibt sich keine relevante Klimabelastung durch den Energiebedarf.

Die Zink Rückgewinnung mit dem Wälzrohr-Verfahren zeigt eine deutlich höhere Klimabelastung von 9.6 kg CO₂ eq. für 1 kg Zink. Die Klimabelastung stammt vor allem aus dem Wärmeverbrauch, den Transporten und dem Stromverbrauch.

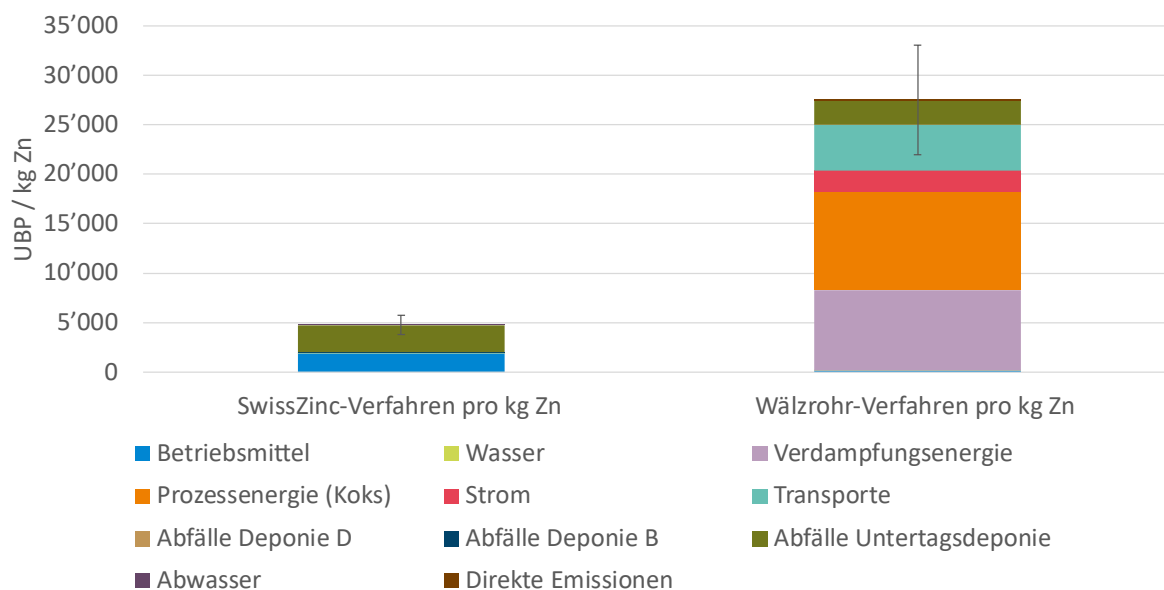


Abbildung 5: Gesamtumweltbelastung in UBP für das SwissZinc-Verfahren im Vergleich zum Wälzrohr-Verfahren für die Rückgewinnung von 1 kg SHG-Zink

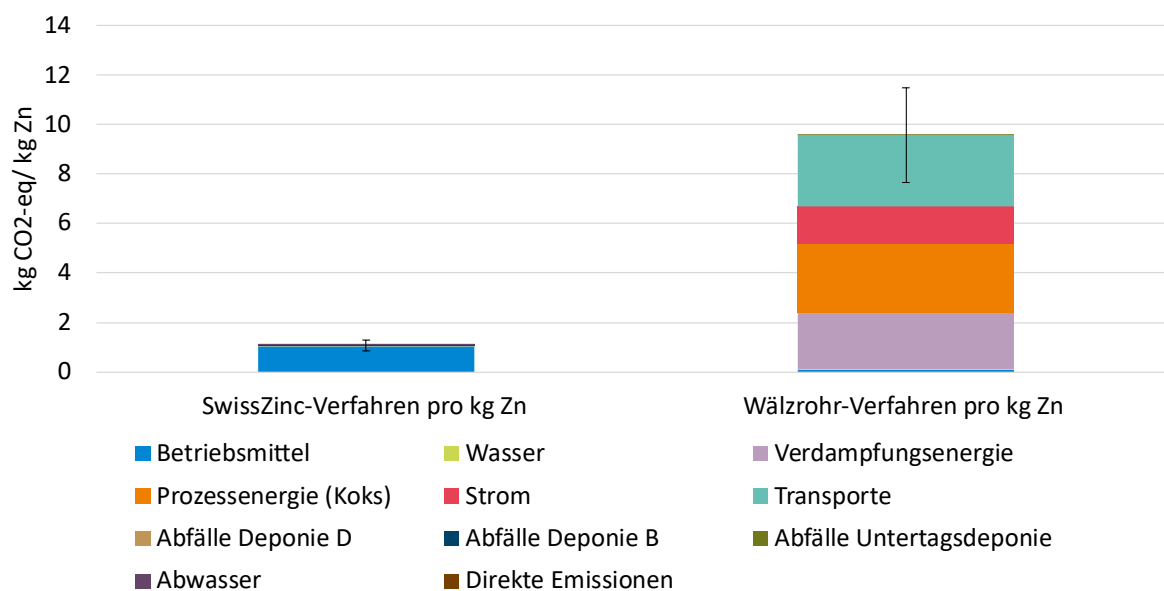


Abbildung 6: Klimabelastung in kg CO₂-eq. für das SwissZinc-Verfahren im Vergleich zum Wälzrohr-Verfahren für die Rückgewinnung von 1 kg SHG-Zink

3.2 Umweltauswirkungen pro Tonne Hydroxidschlamm

Abbildung 7 zeigt die gesamten Umweltauswirkungen in Umweltbelastungspunkte (UBP) pro verarbeitete Tonne Hydroxidschlamm mit dem SwissZinc-Verfahren und mit dem Wälzrohr-Verfahren und anschliessender Zink-Elektrolyse. In diesem Vergleich werden die Gutschriften für die Rückgewinnung von Zink und Blei, sowie zusätzlich Kupfer und Salzsäure aus dem SwissZinc-Verfahren, dargestellt. Uns lagen keine Angaben vor, wie viel Zink und Blei aus dem Wälzrohr-Verfahren zurückgewonnen wird. Für diese Studie wurde deshalb angenommen, dass die Ausbeute an Zink und Blei aus dem Wälzrohr-Verfahren gleich hoch ist wie beim SwissZinc-Verfahren. Demnach sind die Gutschriften für das zurückgewonnene Zink und Blei bei beiden Verfahren gleich.

Die gesamten Umweltauswirkungen für die Verarbeitung von 1 Tonne HS im SwissZinc-Verfahren liegen bei 4.6×10^5 UBP und die Gutschriften bei -1.09×10^6 . Damit ergibt sich insgesamt einen Umweltnutzen von -6.24×10^5 UBP. Im Vergleich zur Primärproduktion von Metallen schneidet dieses Verfahren damit besser ab. Die gesamten Umweltauswirkungen für die Verarbeitung von 1 Tonne HS im Wälzrohr-Verfahren mit anschliessender Zink-Elektrolyse liegen bei 2.6×10^6 UBP und die Gutschriften bei -1.01×10^6 UBP. Damit ergibt sich insgesamt für die Verarbeitung von HS mit dem Wälzrohr-Verfahren keinen Umweltnutzen, sondern eine Umweltbelastung von 1.6×10^6 UBP. Dies bedeutet, dass die Primärproduktion der Metalle mit geringeren Umweltauswirkungen verbunden ist, als die Rückgewinnung der Metalle aus dem Hydroxidschlamm mit dem Wälzrohr-Verfahren.

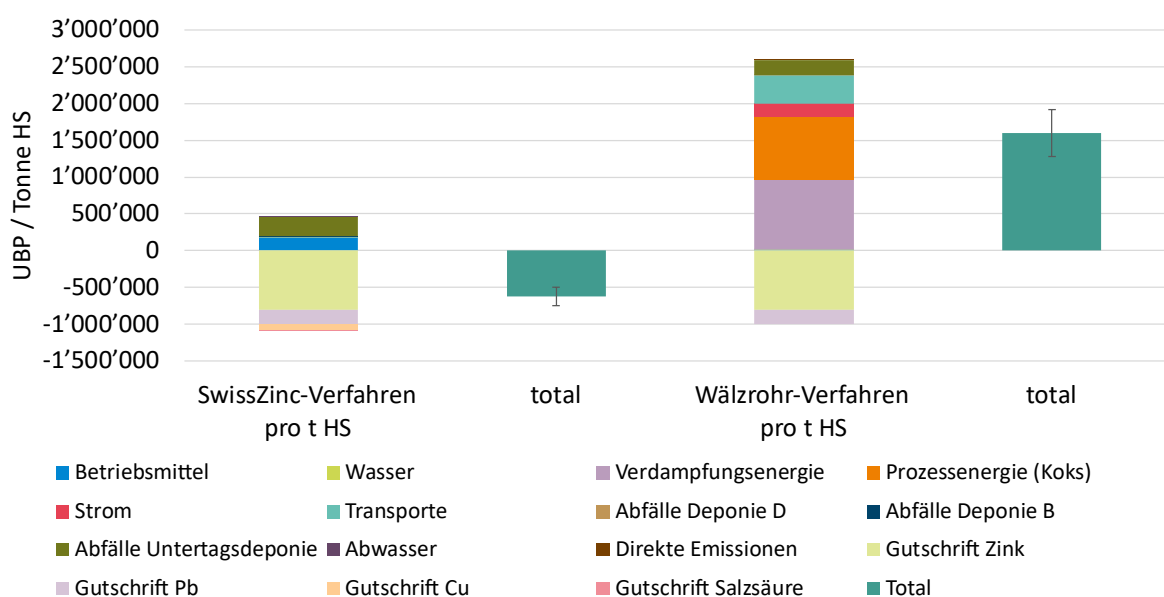


Abbildung 7: Gesamtumweltbelastung in UBP für das SwissZinc-Verfahren im Vergleich zum Wälzrohr-Verfahren für die Verarbeitung von 1 Tonne Hydroxidschlamm inkl. Gutschriften für die Metallrückgewinnung.

Abbildung 8 zeigt die Klimabelastung der beiden Verfahren in kg CO₂ eq. pro Tonne verarbeitetem Hydroxidschlamm.

Die Klimabelastung für die Verarbeitung von 1 Tonne HS im SwissZinc-Verfahren liegen bei 105 kg CO₂ eq. und die Gutschriften bei -240 kg CO₂ eq. Damit ergibt sich insgesamt eine Klimabelastung von -135 kg CO₂ eq. oder anders ausgedrückt:

Mit dem SwissZinc-Verfahren können bei der Verarbeitung von 1 Tonne HS 135 kg CO₂ eq. vermieden werden.

Die Klimabelastung für die Verarbeitung von 1 Tonne HS im Wälzrohr-Verfahren mit anschliessender Zink-Elektrolyse liegen bei 874 kg CO₂ eq. und die Gutschriften bei -220 kg CO₂ eq.

Damit ergibt sich insgesamt für die Verarbeitung von 1 Tonne HS mit dem Wälzrohr-Verfahren kein Nutzen für das Klima, sondern eine Klimabelastung von 654 kg CO₂ eq.

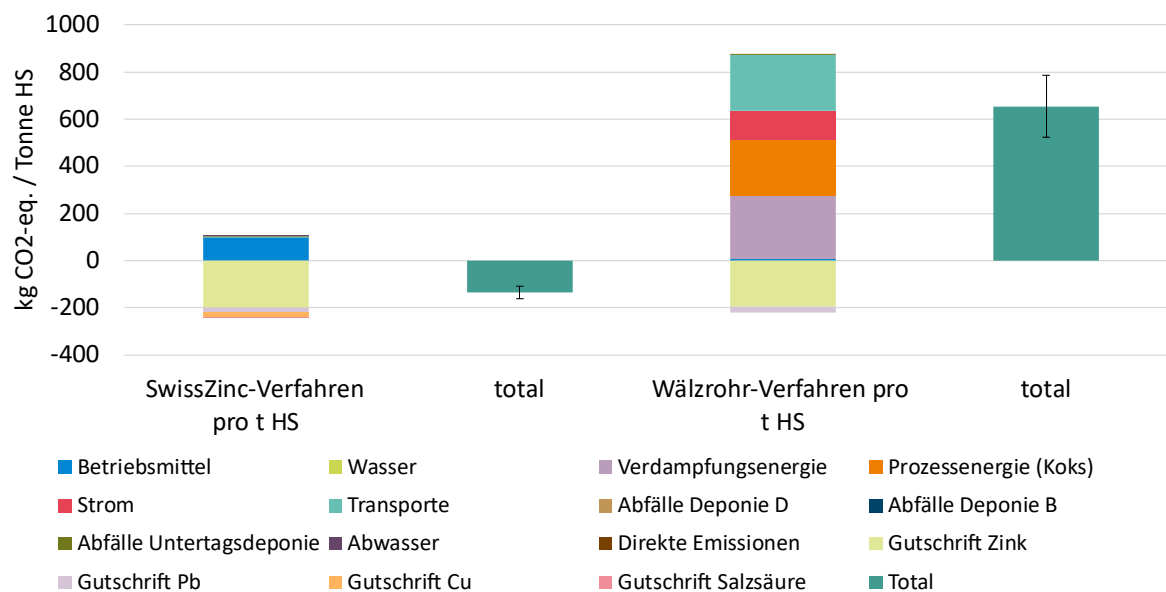


Abbildung 8: Klimabelastung in kg CO₂ eq. für das SwissZinc-Verfahren im Vergleich zum Wälzrohr-Verfahren für die Verarbeitung von 1 Tonne Hydroxidschlamm.

3.3 Sensitivitätsanalyse

3.3.1 Prozesse

Die Resultate in Kapitel 3.1 und Kapitel 3.2 zeigen, dass beim Wälzrohr-Verfahren die Wärmebereitstellung sowie die Transporte von hoher Relevanz sind. Entsprechend wurden Sensitivitäten für die Wärmebereitstellung und die Transporte durchgeführt. Da beim Wälzrohr-Verfahren Koks nicht nur Energieträger, sondern auch als Reduktionsmittel benötigt wird, kann dieser nicht einfach ersetzt werden. Ein möglicher Ersatz durch Wasserstoff aus erneuerbaren Energien wäre theoretisch möglich, ist aber in absehbarer Zeit nicht zu erwarten und wurde daher nicht modelliert. Jedoch könnte die Verdampfung des Wasseranteils mit einem anderen Energieträger oder mit KVA-Abwärme eine Option sein. Die möglichen Kupferemissionen bei der Deponierung haben auch im schlimmsten Fall keinen signifikanten Einfluss auf die Resultate. Daher wurde dafür keine Sensitivitätsanalyse gerechnet.

Folgende Sensitivitäten wurden berechnet:

- Bei der Sensitivitätsanalyse zur Wärmebereitstellung wurde der Einfluss auf die Ergebnisse bei der Verwendung von verschiedenen Energieträgern bzw. Energiequellen untersucht. Damit sollte geprüft werden, ob das SwissZinc-Verfahren an sich ökologischer als das Wälzrohr-Verfahren ist, oder ob der Unterschied im Wesentlichen auf die Abwärmenutzung der KVA zurückzuführen ist.
- Bei der Sensitivitätsanalyse zu den Transporten wurde untersucht, wie sich eine Entwässerung des Hydroxidschlammes in der Schweiz statt in Freiberg auf die Resultate auswirkt.

Abbildung 9 zeigt die Rückgewinnung von 1 kg Zink mit dem SwissZinc-Verfahren (oben) und mit dem Wälzrohr-Verfahren und anschließender Zink-Elektrolyse (unten) in Abhängigkeit der eingesetzten Energieträger bzw. Energiequelle.

Das SwissZinc-Verfahren bezieht Strom und Wärme direkt von der Keba (Energie ab KVA). Würde das SwissZinc-Verfahren nicht direkt einer KVA angehängt sein und stattdessen einen durchschnittlichen europäischen Industriedampf oder Industriedampf aus Gas für das Verfahren verwenden, so wäre die gesamte Umweltbelastung bei Industriedampf +84 % und bei Dampf aus Gas +31 % höher.

Der durchschnittliche europäische Industriedampf wird mit einem Mix aus verschiedenen Energieträgern (63% Erdgas, 14% Öl, 10% Raffineriegas, 9% Kohle und 4% andere) produziert.

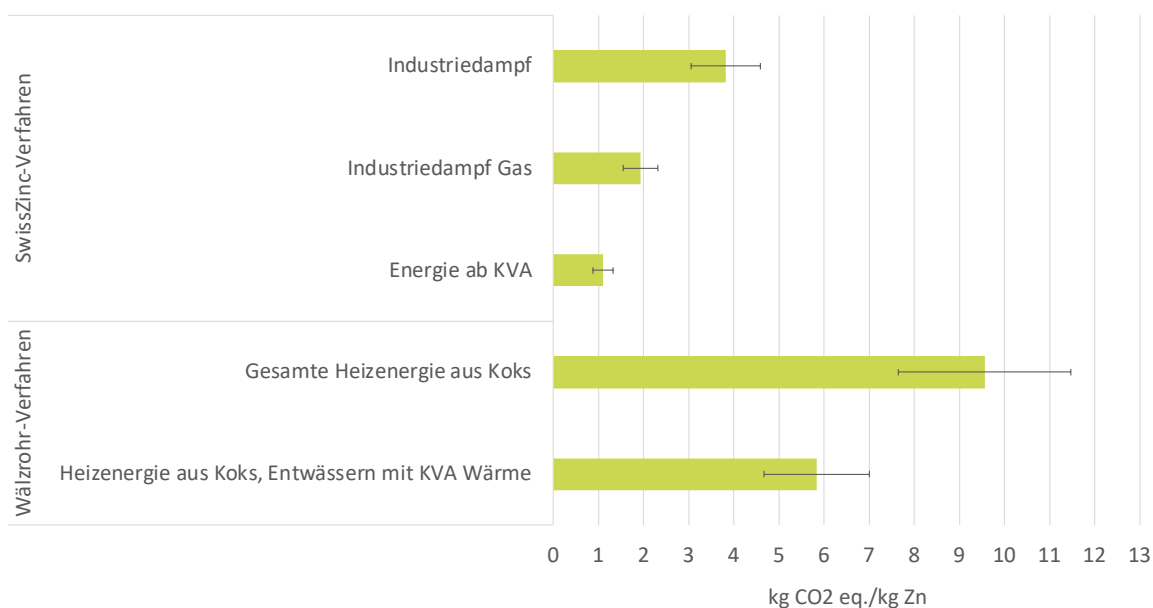
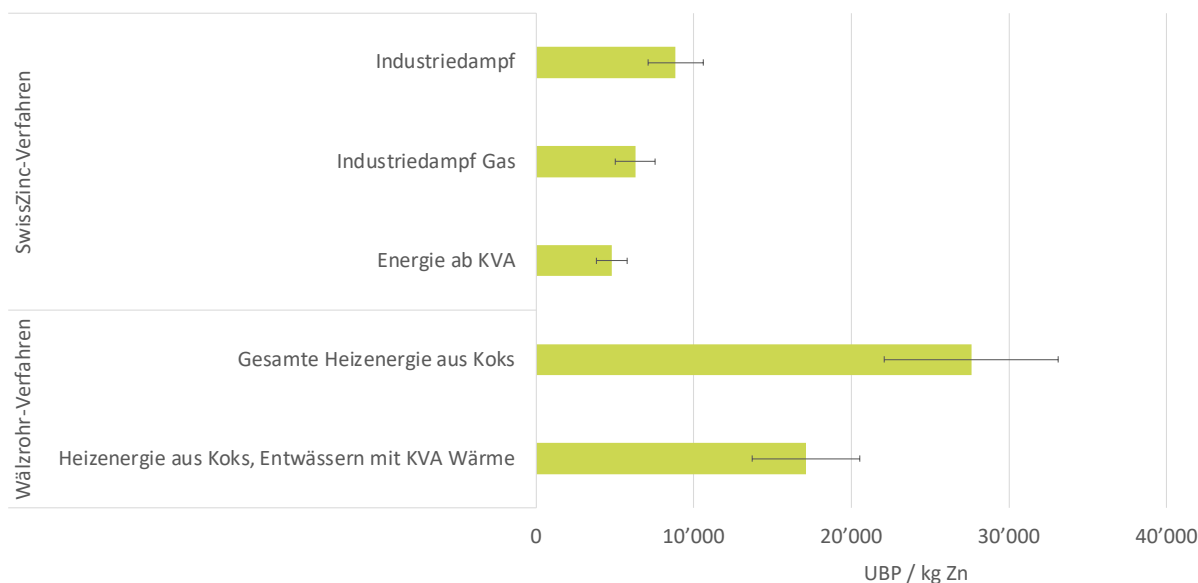


Abbildung 9: Sensitivitätsanalyse in Abhängigkeit der Energieträger bzw. Energiequellen.

Im Wälzrohr-Verfahren wird Koks als Energieträger verwendet und kann nicht einfach ersetzt werden, da Koks als Reduktionsmittel benötigt wird. Für die Trocknung des Hydroxidschlammes könnte jedoch ein anderer Energieträger verwendet werden. Im besten Fall wäre dies Abwärme z.B. einer KVA. Würde der Hydroxidschlamm bereits in der Schweiz mit Wärme von der KVA getrocknet, dann wäre die gesamte Umweltbelastung für die Rückgewinnung von 1 kg Zink knapp 40 % geringer. Selbst in diesem optimalen Fall sind die Umweltauswirkungen des Wälzrohr-Verfahrens noch doppelt so hoch wie im schlechtesten Szenario des SwissZinc-Verfahrens, bei dem die benötigte Wärme nicht aus Abwärme der KVA, sondern mit Dampf aus fossilen Energieträgern wie er in der Industrie in Europa bereitgestellt wird.

3.3.2 Methoden

Um die Auswirkungen der Wahl der Bewertungsmethode zu prüfen, wurde neben der Methode der ökologischen Knappheit zusätzlich die Europäische Methode «Environmental Footprint» oder «EF 3.1» genutzt. Da die Berechnungen vergleichbare Resultate ergaben, sind diese hier nicht gesondert ausgewiesen, zeigen aber, dass die Erkenntnisse beziehungsweise Schlussfolgerungen als robust angesehen werden können.

4 Fazit

Das SwissZinc-Verfahren weist für die Rückgewinnung von 1 kg Zink aus Hydroxidschlamm eine wesentlich tiefere Umweltbelastung auf als das Wälzrohr-Verfahren mit anschliessender Zinkelektrolyse.

Da das SwissZinc-Verfahren direkt an der Kebag angegliedert ist, werden Strom und Wärme direkt von der Kebag bezogen. Entsprechend sind die Umweltauswirkungen des Energiebedarfs im SwissZinc-Verfahren sehr klein, da es sich dabei um ein Nebenprodukt der Abfallentsorgung handelt und daher die wesentliche Belastung der Abfallentsorgung in der KVA angelastet wird. Die wesentlichen Umweltauswirkungen im SwissZinc-Verfahren stammen zu 57 % aus der Deponierung von cadmiumhaltigen Abfällen in der Untertage-Deponie. Diese sind gleich wie beim Wälzrohr-Verfahren, da die dort anfallenden cadmiumhaltigen Abfälle gemäss Entsorgungspraxis der Schweiz auch als Sonderabfall deponiert werden müssen. Dazu kommen die Belastungen der Betriebsmitteln, vor allem Natriumcarbonat, Schwefelsäure und Kalziumoxid, welche knapp 40 % der gesamten Umweltbelastungen des SwissZinc-Verfahrens ausmachen.

Die Umweltauswirkungen für die Zink Rückgewinnung aus Hydroxidschlamm mit dem Wälzrohr-Verfahren mit anschliessender Zinkelektrolyse stammen zu 30 % vom Wärmeverbrauch, welcher für die Trocknung des Hydroxidschlammes aufgewendet werden muss und zu 37 % von der Wärme, die benötigt wird um das Wälzrohr zu betreiben. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Nutzung von Koks als Energieträger mit sehr hohen Umweltbelastungen verbunden ist im Vergleich zu anderen Energieträgern. Unter der Annahme, dass der Hydroxidschlamm mit einem 70 %igen Wasseranteil nach Freiberg transportiert wird, tragen auch die Transporte rund 17 % zu den gesamten Umweltbelastungen des Verfahrens bei. Der Stromverbrauch für die Zinkelektrolyse trägt mit 8 % und die Deponierung vom cadmiumhaltigen Ofenausbruch in einer Untertagedeponie mit 9 % zu den gesamten Umweltauswirkungen bei.

Die Relevanz- und Sensitivitätsanalysen haben gezeigt, dass die Umweltauswirkungen der beiden Verfahren im Wesentlichen von der zugeführten Energie, bzw. deren Energiequelle/ Energieträger abhängen.

Sensitivitätsanalysen haben jedoch gezeigt, dass das SwissZinc-Verfahren auch im worst case, wenn die Wärmeenergie fossil bereitgestellt würde, gegenüber dem Wälzrohr-Verfahren mit optimierter Trocknung und Transporten halb so hohe Umweltauswirkungen aufweist.

In dieser Studie wurden zudem die Umweltauswirkungen der Behandlung von 1 Tonne Hydroxidschlamm mit den beiden Verfahren berechnet. Bei dieser Berechnung werden die zurückgewonnenen Metalle als Gutschriften berücksichtigt. Wird 1 Tonne Hydroxidschlamm im SwissZinc-Verfahren verarbeitet, werden nebst Zink auch Kupfer, Blei und Salzsäure zurückgewonnen. Unter Berücksichtigung der Gutschriften für die Rückgewinnung der Metalle und der Salzsäure, ergibt sich insgesamt ein Umweltnutzen. Dies bedeutet, dass die Rückgewinnung dieser Stoffe mit geringeren Umweltauswirkungen verbunden ist, als deren Primärproduktion.

Die Verarbeitung von 1 Tonne Hydroxidschlamm im Wälzrohr-Verfahren mit anschliessender Zink-Elektrolyse ergibt dagegen keinen Umweltnutzen, sondern eine Umweltbelastung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Gutschriften für die Rückgewinnung von Zink und Blei aus dem Verfahren kleiner sind als die Umweltbelastung, die durch das Verfahren entsteht. Damit verursachen die zurückgewonnen Metalle eine höhere Umweltbelastung als deren Primärherstellung.

Zu beachten ist, dass die Berechnungen für die Verarbeitung von Hydroxidschlamm im Wälzrohr-Verfahren auf Daten basieren, die sich auf die Produktion von Wälzoxid und Wälzschlacke beziehen. Entsprechend sind sie mit höheren Unsicherheiten behaftet.

Die anschliessenden Prozesse für die Zink Rückgewinnung aus dem Wälzoxid in der Zinkhütte wurden nach (Haupt & Hellweg, 2018) angenähert.

5 Literatur

Befesa Zinc Duisburg GmbH. (2021). Umweltbericht 2021. Befesa Zinc Duisburg GmbH.

Bunge, R., & Kaarina, S. (2023). *Rückgewinnung von Metallen aus den Filteraschen von Kehrrechtverbrennungsanlagen*. BAFU.

European Commission. Joint Research Centre. (2023). *Updated characterisation and normalisation factors for the environmental footprint 3.1 method*. LU: Publications Office. Abgerufen von <https://data.europa.eu/doi/10.2760/798894>

Frischknecht, R., Dinkel, F., Braunschweig, A., Ahmadi, M., Kägi, T., Krebs, L., u. a. (2021). *Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der Ökologischen Knappheit - Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz* (S. 260). Bern: Bundesamt für Umwelt.

Haupt, M., & Hellweg, S. (2018). Studie zum ökologischen Vergleich der Zink-Produktion aus KVA-Hydroxidschlämmen: SwissZinc-Verfahren und Befesa-Verfahren.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press. <http://doi.org/10.1017/9781009157896>

ISO. (2006a). *ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. Geneva: International Standard Organisation.

ISO. (2006b). *ISO 14044:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. Geneva: International Standard Organisation.

ISO/TC. (2006). *Environmental management–Life cycle assessment–Principles and framework*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

Kägi, T., Dinkel, F., Frischknecht, R., Humbert, S., Lindberg, J., De Mester, S., u. a. (2016). Session “Midpoint, endpoint or single score for decision-making?”—SETAC Europe 25th Annual Meeting, May 5th, 2015. Conference Session Report. *Int J Life Cycle Assess*, 21(1), 129–132. <http://doi.org/10.1007/s11367-015-0998-0>

Mehr, J., & Hellweg, S. (2022). Studie zum ökologischen Vergleich der Zink-Produktion aus KVA-Hydroxidschlämmen: SwissZinc-Verfahren und Befesa-Verfahren.

Morf, L., & Kuhn, E. (2009). *Qualitätsentwicklung konventionell ausgetragener Schlacke*. Zürich: AWEL Zürich.

PRé Consultants. (2023). SimaPro 9.5 (Version 9.5.0.0). PRé Consultants.

VVEA. (2020). Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen. Abgerufen von <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20141858/>

6 Abkürzungen

Cd	Cadmium
Cu	Kupfer
EF 3.1	Environmental Footprint v3.1
FA	Filterasche
FE	funktionelle Einheit
GWP	Global Warming Potential
IPCC	Intergovernmental panel of Climate Change
HS	Hydroxid-Schlamm
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
LCA	Life cycle assessment - Ökobilanzierung
LME	London Metal Exchange, Börse für den weltweiten Handel mit Metallen
MöK	Methode der ökologischen Knappheit
Pb	Blei
SHG-Zink	special high grade Zink
UBP	Umweltbelastungspunkte
VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) Stand 1. April 2020
Zn	Zink

A1 Input Daten SwissZinc-Verfahren

Tabelle 1: Input Daten für das SwissZinc-Verfahren (Quelle: SwissZinc 2023)

Output	[t/a]	Einheit	Kommentar
Zink, 99.995%	2'200	t	
Bleizementat	731	t	
Kupferzementat	203	t	
20% Salzsäure	1'236	t	zu FLUWA der Kebag
Input			
Hydroxidschlamm 30% TS (HS30)	30'000	t	
Aktivkohle	1.1	t	
Betriebswasser	20'800	m ³	
CaO (Bleirückgewinnung + ABA)	990	t	
D2EHPA	1.3	t	
Diverse Betriebsmittel in Kleinmengen (z.B. Schmierstoffe usw....)	1.0	pauschal	
H ₂ O ₂ 35%	7.0	t	
H ₂ SO ₄ 96%	3'072	t	
HCl 32%	294.4	t	
Na ₂ CO ₃ 95%	1'225.5	t	
Wärme Prozess (ND-Dampf)	1'380	MWh	
Lösungsmittel	6.7	t	
Dampf (4.8 bar), Aufheizen Zementierung	17'600	MWh	Der Dampf wird direkt von der Kebag bezogen
Strom	10'540	MWh	Der Strom wird direkt von der Kebag bezogen
Trinkwasser	2'100	m ³	
Wasser enthärtet	18'900	m ³	
Zinkpulver	265	t	Zinkpulver für die Zementierung von Cu, Cd und Pb und Ag wird aus der eigenen Zinkproduktion hergestellt
NaCl	1'200	t	
NaOH 50% (ABA)	14	t	
Abfälle			
Laugungsrückstand inkl. Transport, Deponietyp D in CH, TS=60%	8'700	t	
ABA-Rückstand, inkl. Transport, TS=70%	1'286	t	
Gips aus H ₂ SO ₄ -Input, 85% TS, Deponietyp B in CH	2'720	t	
Abwasser	46'500	m ³	
Cadmiumrückstand (Cd-Zementat, 70% TS), UTD, Deutschland	55	t	

Transporte

Zug	2'683'800	tkm	99.4 km Transport (mittlerer Durchschnitt aller anliefernden KVAs), 10% per LKW, 90 % Bahn (Annahme: Standort KEBAG)
LKW	298'200	tkm	99.4 km Transport (mittlerer Durchschnitt aller anliefernden KVAs), 10% per LKW, 90 % Bahn (Annahme: Standort KEBAG)

A2 Input Daten Wälzrohr-Verfahren

Tabelle 2: Input Daten für das Wälzrohr-Verfahren (Befesa Zinc Duisburg GmbH, 2021) und Annahmen siehe Kommentare

Outputs	[t/a]	Einheit	Kommentar
Zink, 99.995%	16'845	t	Annahme gleiche Ausbeute wie im SwissZinc-Verfahren
Blei	2'354	t	Annahme gleiche Ausbeute wie im SwissZinc-Verfahren
Inputs			
Hydroxidschlamm 30% TS (HS30)	230'750	t	Annahmen: Hydroxidschlamm wird getrocknet bis er denselben Zn-Gehalt hat wie die Zn haltigen Abfälle. Danach ist die Behandlung gleich wie diejenige von Zn-haltigen Abfällen im Wälzverfahren. Bei 16'845 t Zn-Output werden bei 7.3 % Zn-Gehalt 16845/0.073 => 230'750 t Hydroxidschlamm mit 30% TS benötigt
Wärme	355'600	GJ	0.75395 t Koks / t Zn-Rückgewinnung Heizwert Koks ca. 27 - 29 MJ / kg Abschätzung Energie Bedarf: 16'845 t Zn * 0.75395 t Koks / t Zn * 28 GJ / t = 368'308 GJ
Diesel	21'385	kg	Diesel
Trinkwasser	1'260'000	kg	
Brauchwasser / Brunnenwasser	556'720'000	kg	
Kalk	4'063	t	Schlackebildner
Frischadsorbens	229	t	Annäherung mit Aktivkohle
Schwefelsäure	500	t	übernommen aus Haupt. et al 2018; Laugung Zinkhütte - Stöchiometrisch werden 3'000 t/a H ₂ SO ₄ 96% benötigt (ZnO+H ₂ SO ₄ --> ZnSO ₄ + H ₂ O). Blei und Cadmium benötigen zusätzlich total ca. 200 t/a. Infolge Restalkalinität erhöht sich der Verbrauch um 100 t/a. Aus der nachfolgenden Zinkelektrolyse wird wiederum Schwefelsäure gewonnen (ca. 2'800 t/a) --> Nettoverbrauch: 500 t/a Es wird eine best-case Annahme von 500 t/a getroffen.
CaO	990	t	Übernommen aus Haupt. et al 2018; CaO - ABA Zinkhütte; Annahme: Verbrauch wie bei SwissZinc (ca. 990 t/a). Abschätzung zur Abwasserbehandlung nach der Zinkelektrolyse.
Wärme	11'304	MJ	Heizöl
Erdgas	199'000	m ³	
Strom	6'399	MWh	Strom im Wälzverfahren; Übernommen aus Haupt. et al 2018
Strom	53'903	MWh	Zinkelektrolyse: Nach Haupt zwischen 2.9 -3.5 MWh/t
Wärme	295'000	GJ	Energie zum Verdampfen des Wassers im Hydroxidschlamm, von 30% TS auf 80% TS

Abfälle		
Altadsorbens	241	t
Ofenausbruch	330	t
		Ofenausbruch Feuerfestmaterial (kann noch Schwermetalle enthalten)
Transport		
LKW	29'210'000	tkm
		Übernommen aus Haupt. et al 2018 Transport ab FLUWA-KVA zum Umlade Standort Full (durchschnittlich 127 km Transport mit LKW)
LKW	115'000'000	tkm
		Übernommen aus Haupt. et al 2018 Befesa Freiberg zu Xstrata Nordenham: 500 km (alternativ Boleslaw, Bukowno/Katowice: ca. 500 km). Menge: Skaliert aufgrund des Befesa Umweltberichtes (59'000 t Wälzoxid pro Jahr (=32'000 t Zn/a), 3'200 t/a (=2'000 t Zn/a) als Wälzoxid aus Hydroxidschlamm)
LKW	152'490'000	tkm
		Übernommen aus Haupt. et al 2018 Strecke Full nach Befesa Freiberg (663 km)
Emissionen		
Kupfer Emissionen in Wasser	506	t
		Annahme: 50 % wird ausgewaschen und landet in Oberflächenwasser

A3 Allokationen und Gutschriften

Beim SwissZinc Verfahren wird neben Zink auch Bleizementat, Kupferzementat und Salzsäure zurückgewonnen. Diese Produkte können auf dem Markt verkauft werden.

Für die Berechnung der Gutschriften wurden die Produkte ökonomisch alloziert. Hierzu wurden folgende Angaben verwendet:

Tabelle 3: Angaben zur Berechnung des ökonomischen Allokationsschlüssels für die Produkte aus dem SwissZinc-verfahren.

Produkt	Menge (Tonnen)	Kommentar	LME Preis (\$)	Ertrag (\$)	Allokationsschlüssel
Zink, 99.995%	2'200	wird zum LME Preis verkauft	2'570	4'972'950	76.29%
Bleizementat (0.04%Cd, 70%Pb,0.2%Ag,5%Zn + Rest)	731	wird anteilmässig zu 60% vom LME Preis von Pb verkauft	2'245	689'260	10.57%
Kupferzementat (65% Cu, 0.8%Cd, 5.9%Pb, 0.4%Ag, 5%Zn + Rest)	203	wird anteilmässig zu 60% vom LME Preis von Cu verkauft	8'450	668'987	10.26%
20% Salzsäure	1'236	zu FLUWA der Kebag	250	187'273	2.87%
Total				6'518'470	100%

Für die Preise der Metalle wurden die LME (London Metal Exchange Börse) Durchschnittspreise der letzten 3 Monate genommen (Stand September 2023).

Das Blei- und das Kupferzementat werden als solches verkauft. Der Preis beläuft sich auf 60% des LME Preises, da diese Produkte noch einer Behandlung unterlaufen müssen, was den Preis für die Produkte senkt.

Die zurückgewonnene Salzsäure wird der Kebag verkauft.

Review

Ökologischer Vergleich der Zink-Produktion aus KVA-Hydroxidschlämmen: SwissZinc-Verfahren und Wälzrohr-Verfahren

Bericht: Stefanie Conrad und Mischa Zschokke, Carbotech AG

Reviewbericht: Dr. Fredy Dinkel, Steinenbühl 36, 4417 Ziefen

Auf der Basis: Schlussbericht vom 27. November 2023

1 Einleitung

Die Firma Carbotech erstellte für die SwissZinc AG in Bern eine Ökobilanz von zwei unterschiedlichen Prozessen zur Zink-Rückgewinnung aus KVA-Schlacke. Der Review dieser Studie erfolgte durch Fredy Dinkel. Herr Dinkel hat früher in der Carbotech gearbeitet. Dennoch ist die Unabhängigkeit des Reviews gegeben, da er einerseits in keiner Abhängigkeit von der Firma SwissZinc steht und andererseits heute keine Anstellung und ökonomischen Interessen an der Firma Carbotech hat. Zudem erfüllt Fredy Dinkel auf Grund seiner über 30-jährigen Erfahrung in der Erstellung sowie Reviewer von Ökobilanzen und als Dozent für Ökobilanzen an verschiedenen Hochschulen alle Bedingungen, die an einen Reviewer gestellt werden.

Das vorliegende Review Dokument basiert auf dem Schlussbericht vom 27. November 2023.

2 Prüfkriterien und Vorgehen

Auch wenn die Studie nicht strikt nach der ISO-Norm 14'040ff erfolgte, siehe Kapitel 3.3, so wurde der Prüfung die internationalen Normen ISO EN 14040 (2006) [1] und 14044 (2006) [2] zu Grunde gelegt, da diese Norm das Vorgehen bei einer Ökobilanzierung festlegt. Geprüft wurde nach den in der LCA-Rahmennorm 14040 vorgegebenen Kriterien, ob

1. das bei der Durchführung der Ökobilanz angewendeten Vorgehen mit dieser internationalen Norm übereinstimmen
2. die angewendeten Methoden wissenschaftlich begründet sind und dem Stand der Ökobilanz-Technik entsprechen
3. die Rahmenbedingungen so gesetzt sind, dass die Fragestellung sinnvoll beantwortet werden kann
4. die verwendeten Daten in Bezug auf das Ziel der Studie hinreichend und zweckmässig sind
5. die Auswertungen die erkannten Einschränkungen und das Ziel der Ökobilanz berücksichtigen
6. der Bericht transparent und nachvollziehbar ist
7. ob der Bericht in sich stimmig ist und die Beantwortung der Fragestellung schlüssig aus den Resultaten hergeleitet wird.

Der Review wurde begleitend durchgeführt. Nach der Startsitzen vom 7. 9. 2023, welche physisch stattfand, wurden die weiteren Sitzungen virtuell durchgeführt. In der ersten Sitzungen wurden die Rahmenbedingungen, das Vorgehen der Datenerhebung sowie die Methoden zur Auswertung festgelegt. In einer zweiten Sitzungen wurde die Sachbilanz und Modellierung diskutiert und in der dritten Sitzungen die vorläufigen Resultate vorgestellt und daraus die notwendigen Sensitivitäten festgelegt. In der vierten Sitzungen wurden die überarbeiteten Resultate diskutiert und die Berichterstattung besprochen. In einer Abschlussbesprechung wurde der

Berichtsentwurf diskutiert. Der Reviewer bekam Einblick sowohl in die Vordergrunddaten, wie auch in die verwendeten Hintergrunddaten und die sich daraus ergebende Modellierung. Die Vordergrunddaten wurden soweit möglich auf Plausibilität geprüft. Die Modellierung und Verknüpfung mit den Hintergrunddaten erfolgten durch Stichproben. Soweit dies im Rahmen der Stichproben möglich ist, hat diese Prüfung gezeigt, dass das Modell grundsätzlich korrekt ist und die Verknüpfungen mit den Hintergrunddaten sinnvoll sind. Unklarheiten wurden diskutiert und ggf. angepasst. Anschliessend wurde die Plausibilität der Resultate geprüft und diskutiert. Zudem wurde dem Reviewer ein Berichtsentwurf vorgelegt. Dieser wurde geprüft und die Anregungen von Seiten des Reviewers sind in den Schlussbericht eingeflossen. Da auch alle anderen Anregungen des Reviewers umgesetzt wurden, sind diese nicht mehr im vorliegenden Bericht aufgeführt.

3 Allgemeine Kommentare und Würdigung

Das Vorgehen macht einen sehr guten Eindruck und zeigt, dass die Mitarbeiter*innen von Carbotech langjährige Erfahrung in der Erstellung von Ökobilanzen haben. Die Annahmen und die Vorgehensweise sind klar dargelegt. Dazu zählen u.a. die Darstellung der Ausgangslage und die Definition der Fragestellung und der funktionellen Einheit. Die Systemgrenzen sind beschrieben, eine graphische Darstellung wäre für den Leser hilfreich.

Positiv zu erwähnen ist der Umgang mit den Unsicherheiten, welche durch Sensitivitäten abgedeckt wurden. Zudem wurden die Ungenauigkeiten mit einer Monte Carlo Methode bestimmt. Zudem wurden die Resultate der Bewertungsmethode abgesichert, indem eine zweite gesamttaggregierende Methode verwendet wurde.

Als vorbildlich ist die Transparenz der Studie zu nennen. Alle relevanten Vordergrunddaten werden aufgeführt, damit können die Resultate weitgehend nachvollzogen werden. Auch wenn dies eine wesentliche Anforderungen der Norm ist, so weisen viele Studien heute diese Transparenz nicht auf.

3.1 Ziele und Rahmenbedingungen

Das Ziel und die Verwendung der Studie werden klar und verständlich beschrieben. Als Vergleichsbasis wurden zwei verschiedenen funktionelle Einheiten verwendet. Diesen entsprechen den zwei unterschiedlichen Fragestellungen und werden als sinnvoll erachtet. Ebenso erachtet der Reviewer die Systemgrenzen für diese Studie als korrekt gewählt. Sie sind so weit gewählt, dass die unterschiedlichen Prozessschritte berücksichtigt werden, die zur Beantwortung der Fragestellung notwendig sind und so eng, dass die Resultate aussagekräftig sind.

3.2 Daten und Modellierung

Die verwendeten Vordergrunddaten werden als plausibel erachtet. Sie basieren für das SwissZinc-Verfahren auf Messdaten. Für das Wälzrohrverfahren lagen aus einer Vorgängerstudie Daten aus dem Umweltbericht einer Firma vor, welche einen solchen Prozess betreibt. Dennoch mussten teilweise Annahmen getroffen werden, da von der Firma keine weiteren Daten zur Verfügung gestellt wurden. Die gewählten Hintergrunddaten (ecoinvent Prozesse) und deren Verknüpfungen mit den Vordergrunddaten können auf Grund der stichprobenartigen Prüfung als sinnvoll und für diese Studie als geeignet bezeichnet werden.

Positiv zu erwähnen sind die Verbesserungen gegenüber der Vorgängerstudie. So wurden u.a. die Kupferemissionen wesentlich plausibler modelliert. Ebenso wurde die Allokation der verschiedenen Produkte und Nebenprodukte sinnvoll gemacht und die Basis dazu transparent dargestellt.

3.3 Auswertung und Interpretation

Gemäss Norm sollen für vergleichende Studien, welche für die Öffentlichkeit bestimmt sind, keine Methoden verwendet werden, welche die verschiedenen Umweltauswirkungen zu einer einzigen Kennzahl verrechnen. Dennoch sind genau solche Methoden gut geeignet, um klare Aussagen zu machen. Entsprechend begrüsst der Reviewer sehr, dass die Autor*innen diesbezüglich über die Norm hinausgegangen sind und die Methode

der ökologischen Knappheit (MöK) verwendet haben. Zudem wurde der Indikator CO₂ Äquivalent ausgewiesen, da dieser heute ein vieldiskutierter Indikator ist. Die Resultate der MöK wurden mit einer anderen gesamtaggrierenden Methode, EF-Methode, überprüft und mit dem Reviewer diskutiert. Da deren Resultate keine anderen Schlussfolgerungen ergeben, wurden die Ergebnisse der EF-Methode im Bericht nicht dargestellt, was für die Lesbarkeit des Berichtes sinnvoll ist. Eine Darstellung im Anhang wäre aufschlussreich, wenn auch nicht notwendig.

Positiv zu erwähnen ist die Relevanzanalyse und die daraus abgeleiteten Sensitivitätsanalysen, welche einerseits zeigen, dass die Hauptaussage stabil ist und andererseits die Ursachen der Unterschiede ausweisen. Der wesentliche Unterschied ergibt sich aus der verwendeten Energie für die Verfahren. Um die Frage zu beantworten, ob das SwissZinc Verfahren an sich ökologisch vorteilhaft ist oder ob sich dieser Vorteil im Wesentlichen aus der Nutzung der KVA-Abwärme ergibt, wurden Szenarienrechnungen mit anderen Energieträgern gemacht.

3.4 Berichterstattung

Der Bericht ist klar strukturiert und beschränkt sich auf das Wesentliche. Dies ist für die Lesbarkeit des Berichtes sehr hilfreich und zeigt, dass die Autor*innen bei der Erstellung des Berichtes die Zielgruppe im Auge hatten. Dennoch ist der Bericht so transparent gestaltet und enthält alle notwendigen Informationen, damit das Vorgehen und die Resultate auch von nicht Ökobilanz-Spezialisten verstanden werden können. Der Bericht beantwortet die Fragestellung der Studie auf eine nachvollziehbare Weise.

4 Beurteilung

Auf Grund der gemachten Prüfungen, die dank dem Einblick in alle Annahmen und Daten sehr gut durchgeführt werden konnten, erfüllt die vorliegende Studie alle in Kapitel 2 aufgeführten Anforderungen an eine Ökobilanzstudie. Soweit dies auf Grund der Prüfung beurteilt werden kann, sind unter den Rahmenbedingungen der Studie die wesentlichen Resultate korrekt und stabil. Das heisst, auch bei etwas anderen Annahmen ergeben sich keine gegenteiligen Schlussfolgerungen. Der Auftraggeber kann sich somit auf die Hauptaussage verlassen, dass das SwissZinc-Verfahren zur Rückgewinnung von Zink wesentlich geringere Umweltauswirkungen verursacht als das Wälzrohr-Verfahren.

5 Literatur

- [1] ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Deutsche und Englische Fassung ISO EN 14040, Genf Oktober 2006
- [2] ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Deutsche und Englische Fassung ISO EN 14044, Genf Oktober 2006

Ziefen, 27. November 2023

Dr. Fredy Dinkel, Carbotech AG