

Juni 2018

# Studie zum ökologischen Vergleich der Zink-Produktion aus KVA-Hydroxidschlämmen: SwissZinc-Verfahren und Befesa-Verfahren

## Endbericht

### Kontaktpersonen:

Melanie Haupt  
Prof. Stefanie Hellweg  
ETH Zürich  
Institut für Umweltingenieurwissenschaften  
Gruppe Ökologisches Systemdesign  
John-von-Neumann-Weg 9  
CH- 8093 Zürich  
Tel: +41 44 633 4337  
Email: stefanie.hellweg@ifu.baug.ethz.ch

# Inhalt

Zusammenfassung.....	3
1. Ziel und Untersuchungsrahmen .....	4
2. Sachbilanz.....	5
2.1 SwissZinc-Verfahren .....	6
2.2 Wälz- und Zinkverhüttungsprozess .....	6
3. Wirkungsabschätzung .....	7
3.1 Wirkungsmethoden.....	7
3.1 Resultierende Umweltauswirkungen .....	7
4. Interpretation und Diskussion.....	10
5. Schlussfolgerungen.....	11
6. Referenzen .....	12
Anhang .....	13

## Zusammenfassung

Mit dem Inkrafttreten der neuen Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (VVEA 2016) gilt für alle Kehrichtverwertungsanlagen (KVA) ab dem 1. Januar 2021 die Pflicht zur Metallrückgewinnung aus den anfallenden Filteraschen. 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. Dabei kommt das Verfahren der sauren Flugaschenwäsche (FLUWA) bzw. deren Weiterentwicklung zur direkten Metallrückgewinnung (FLUREC) zum Einsatz. Beim FLUREC-Verfahren der KEBAG wird Zink seit 2013 direkt aus den Filteraschen als Metall erfolgreich zurück gewonnen. Beim FLUWA-Verfahren werden die in den Filteraschen enthaltenen Metalle jedoch nicht direkt in der Schweiz zurückgewonnen, sondern in Form eines metallhaltigen Hydroxidschlammes im Ausland thermisch in einem Drehrohrprozess aufbereitet. Das entstehende Wälzoxid wird anschliessend der Zinkverhüttung zugeführt und dort in metallisches Zink umgewandelt. Alternative ausländische Verwertungswege, die nicht Zinkmetall als Produkt ergeben, wurden hier nicht mit verglichen.

Die verbleibenden 40% unbehandelter Filteraschen müssen in Zukunft ebenfalls mit einem Verfahren aufbereitet werden, welches die Metallrückgewinnung ermöglicht. Eine Mitbehandlung dieser Filteraschenmenge bei bestehenden Anlagen ist aus Kapazitätsgründen nicht möglich, so dass weitere neue Kapazitäten geschaffen werden müssen. Die vergleichende Ökobilanz dieser Studie vergleicht die Variante SwissZinc (Weiterentwicklung des FLUREC Prozesses) mit dem heutigen Verwertungsweg im Wälz- und Zinkverhüttungsprozess und soll Klarheit schaffen, welches Verfahren ökologisch zu bevorzugen ist. Als Wirkungsabschätzungsmethoden für die Abschätzung der Umweltwirkungen wurden für diesen Vergleich die Methode der ökologischen Knappheit (UBP), IPCC 2013 GWP 100a, USEtox (sowohl Öko- als auch Humantoxizität) sowie ReCiPe Endpoint (H) gewählt. Die Systemgrenzen umfassen bei beiden Verwertungsarten die Produktion von Zink ab Anfall des Hydroxidschlammes. Die funktionelle Einheit der Ökobilanz beträgt 1 kg *special high grade* Zink (SHG Zink, >99.995% Reinheit).

Unter dem Strich zeigt die vergleichende Ökobilanz deutliche ökologische Vorteile des SwissZinc-Verfahrens auf. Mitentscheidend für die ökologische Leistung ist, woher die Betriebsmittel Salz- und Schwefelsäure bezogen werden (aus Direktgewinnungsverfahren oder Nebenprodukten etablierter industrieller Prozesse), und ob die Kupferemissionen aus der Deponie, welche im Wälzverfahren mit nachfolgender Verhüttung entstehen, mitberücksichtigt werden. Die Ökobilanz zeigt, dass das SwissZinc-Verfahren bei allen Wirkungsabschätzungsmethoden in mindestens sechs der acht Szenarien ökologisch besser abschneidet als der Wälz- und Zinkverhüttungsprozess, in Bezug auf die Klimaauswirkungen und die voll-aggregierende Methode ReCiPe gar in sämtlichen Szenarien. Das Wälzverfahren mit anschliessender Zinkverhüttung schneidet nur dann positiver als das SwissZinc-Verfahren ab, wenn die dort eingesetzte Salzsäure aus dem Mannheimer-Prozess bzw. der Direktsynthese (Marktmix ecoinvent) stammen würde. Diese Prozesse spielen allerdings in der heutigen europäischen Salzsäureherstellung keine nennenswerte Rolle mehr.

# 1. Ziel und Untersuchungsrahmen

Mit dem Inkrafttreten der neuen Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (VVEA 2016) gilt für alle Kehrichtverwertungsanlagen (KVA) ab dem 1. Januar 2021 die Pflicht zur Metallrückgewinnung aus den anfallenden Filteraschen. Grundsätzlich kann die Metallrückgewinnung direkt aus den Filteraschen oder aus den Hydroxidschlämmen mittels thermischer und hydrometallurgischer Verfahren erfolgen. Eine Untersuchung aller Schweizer KVA-Filteraschen ergab eine jährlich rückgewinnbare Zinkfracht von 2'000 ± 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. Dabei kommt das Verfahren der sauren Flugaschenwäsche (FLUWA) bzw. deren Weiterentwicklung zur direkten Metallrückgewinnung (FLUREC) zum Einsatz. Beim FLUREC-Verfahren der KEBAG wird Zink seit 2013 direkt aus den Filteraschen als Metall erfolgreich zurück gewonnen. Beim FLUWA-Verfahren werden die in den Filteraschen enthaltenen Metalle jedoch nicht direkt in der Schweiz zurückgewonnen, sondern in Form eines metallhaltigen Hydroxidschlammes im Ausland thermisch in einem Drehrohrprozess 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 und Erhaltung der Entsorgungssicherheit. Für die Entscheidungsfindung zum allfälligen zukünftigen Einsatz des neuen SwissZinc-Verfahrens werden in diesem Bericht Grundlagen zum ökologischen Nutzen der Zinkproduktion mit dem SwissZinc Verfahren im Vergleich zur Zinkgewinnung im FLUWA-Verfahren mit anschliessendem Wälzverfahren erarbeitet. Der Bericht basiert auf dem im BAFU Projekt «Zinkrecycling aus Hydroxidschlämmen» erarbeiteten Modell, welches aktualisiert und überarbeitet wurde (Schlumberger et al. 2016). Das Ziel der vergleichenden Ökobilanz ist es, die totalen Umweltwirkungen der Zinkproduktion aus dem SwissZinc-Verfahren sowie dem Wälzverfahren mit anschliessender Zinkverhüttung zu quantifizieren und zu vergleichen. Alternative ausländische Verwertungswege, die nicht Zinkmetall als Produkt ergeben, wurden hier nicht mit verglichen.

Die vergleichende Ökobilanz wird gemäss ISO 14040/44 (ISO 14040 2006, ISO 14044 2006) durchgeführt und umfasst folgende Schritte: 1) Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen; 2) Sachbilanz; 3) Wirkungsabschätzung; 4) Auswertung.

Die **Systemgrenzen** der Ökobilanz umfassen die Produktion von sekundärem Zink aus Hydroxidschlamm, welcher aus der sauren Wäsche von Flugasche entsteht. Sofern nicht anders erwähnt sind sämtliche Hintergrundprozesse (Ressourcenverbrauch, Energie, Transport etc.) der Produktionsschritte, sowie alle dazugehörigen Emissionen in die Umwelt, berücksichtigt. Nicht berücksichtigt ist für beide Prozesse die benötigte Infrastruktur, da sie eine vernachlässigbare Rolle spielt.

Die **funktionelle Einheit** der Ökobilanz beträgt **1 kg special high grade (SHG)-Zink**. Sämtliche Berechnungen und Vergleiche in diesem Bericht beziehen sich, falls nicht anders angegeben, auf diese Einheit.

## 2. Sachbilanz

Die Sachbilanz des SwissZinc-Verfahrens wurde in enger Zusammenarbeit mit der Stiftung ZAR und der Firma Técnicas Reunidas SA erarbeitet, diejenige des Wälzverfahrens anhand der Betriebsdaten aus der BEFESA Umwelterklärung des Standortes Freiberg (2016) ermittelt und wo nötig mit Literaturdaten ergänzt. Die Prozesse sowie die wichtigsten Betriebsmittel und Emissionen sind nachfolgend kurz beschrieben. Alle Inventare sind im Anhang inkl. Annahmen und Quellen aufgelistet. Als Datengrundlage für Hintergrundprozesse wurde die ecoinvent v3.4-Datenbank verwendet (ecoinvent 2017). Für die gesamte Modellierung wurde ein cut-off Ansatz gewählt (Beschreibung siehe Anhang). Es werden daher keine Gutschriften oder Belastungen für Nebenprodukte betrachtet.

Die Deponierung der Rückstände als Teil der Umweltauswirkungen des Verfahrens ist berücksichtigt. Schadstoffe, die bei beiden Verfahren in identischer Form und Qualität anfallen oder emittiert werden, werden nicht mit berücksichtigt. Unterschiedlich ist jedoch der Weg des Kupfers, da dieses im Wälzprozess und der nachfolgenden Verhüttung nicht zurückgewonnen wird und mit der Wälzschlacke deponiert werden muss. Da die betrachteten Langzeitemissionen von Kupfer durch Auswaschung aus der Deponie die Ergebnisse je nach verwendeter Umweltwirkung stark beeinflussen, wurden diese im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse vertieft betrachtet.

Weitere Sensitivitätsanalysen untersuchen die Bedeutung der Herkunft der Betriebsmittel Salzsäure und Schwefelsäure. Sowohl Salz- als auch Schwefelsäure können sowohl primär produziert werden als auch als Nebenprodukte in anderen chemischen Industrien anfallen. Salzsäure wird laut ecoinvent v3.3 - Datenbank zu 46% als Nebenprodukt der Allyl-Produktion, zu 27% aus Direktsynthese und 27% im Mannheimer Prozess produziert<sup>1</sup>. Die Salzsäure fällt in Europa aber zu grossen Teilen als Nebenprodukt in der Toluol-2,4-diisocyanat (TDI)-Produktion (und anderen Industrien) an (PROCESS 2014). Die Umweltwirkung der Salzsäure aus dem TDI-Prozess wurde dabei durch ökonomische Allokation bestimmt (siehe Tabelle A.1 im Anhang). Da die Salzsäurepreise stark schwanken, wurden für die ökonomische Allokation die Marktpreise als konservativer Ansatz verwendet (Althaus et al. 2007). Diese Annahme hat einen direkten Einfluss auf die angerechnete Umweltwirkung der Salzsäure und somit auf die totale Umweltwirkung beider Verfahren. Das Gleiche gilt für die Schwefelsäure: sie kann primär mittels Verbrennung von Elementarschwefel hergestellt werden, in Europa ist sie jedoch fast ausschliesslich ein Nebenprodukt anderer Industrien, z.B. in der Kupferherstellung (Ashar & Golwalkar 2013)<sup>2</sup>. Daher wurde die Ökobilanz sowohl für primäre als auch für sekundäre Salz- und Schwefelsäure gerechnet.

---

<sup>1</sup> Bei der letzten Aktualisierung der ecoinvent-Datenbank auf v3.4 wurde der europäische Salzsäure-Markt neu wie folgt modelliert: 46% aus Direktsynthese, 46% Mannheimer Prozess und 7% als Nebenprodukt der Allyl-Produktion. Dieser neue Prozess wurde jedoch nicht berücksichtigt, da heute ein steigender Anteil der Salzsäure in sekundären Prozessen erzeugt wird. Diese Annahme wurde gleichermassen für das SwissZinc-Verfahren wie auch für den Wälz- und Zinkverhüttungsprozess getroffen.

<sup>2</sup> Mangels Daten wurde angenommen, dass die sekundäre Schwefelsäure aus der Kupferhütte stammt. Dies führt zu hohen Umweltauswirkungen in Bezug auf Human- und Ökotoxizität (höher als Primärproduktion), die bei anderen Prozessen mit Schwefelsäure als Nebenprodukt nicht erwartet werden. Die Annahme wurde gleichermassen für das SwissZinc-Verfahren wie auch für den Wälz- und Zinkverhüttungsprozess getroffen.

## 2.1 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 bzw. bei qualitativer Eignung im Zementwerk recycelt werden.

## 2.2 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 3 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 Zinkerzkonzentrate substituieren.

Der Wälzprozess konnte aufgrund fehlender Daten nicht inputabhängig modelliert werden. Die vorliegenden Daten aus der BEFESA Umwelterklärung beziehen sich auf die gesamten angenommenen zinkhaltigen Abfälle (190'000 t/a), die zu 94% aus Abfällen der Stahl- und Eisenindustrie bestehen. Der Anteil mitverarbeiteter KVA-Hydroxidschlämme liegt unter 1%. Es wird daher angenommen, dass die Betriebsmittelverbräuche für alle verwerteten zinkhaltigen Abfälle gleich sind und somit aus den publizierten Daten übernommen werden können.

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. Emissionen und Betriebsmittelverbräuche dieser Röststufe wurden hier nicht berücksichtigt und vernachlässigt. In der nachfolgenden Laugungs-, Reinigungs-, Zinkelektrolyse- und Abwasserbehandlungsstufe wurden Literaturangaben bzw. analoge Daten aus dem SwissZinc-Verfahren (Teilprozess Zinkelektrolyse) zur Modellierung der spezifischen Umweltauswirkung herangezogen. Als Betriebsmittel wurden dabei lediglich Elektrizität, Schwefelsäure und Kalk berücksichtigt.

### 3. Wirkungsabschätzung

#### 3.1 Wirkungsmethoden

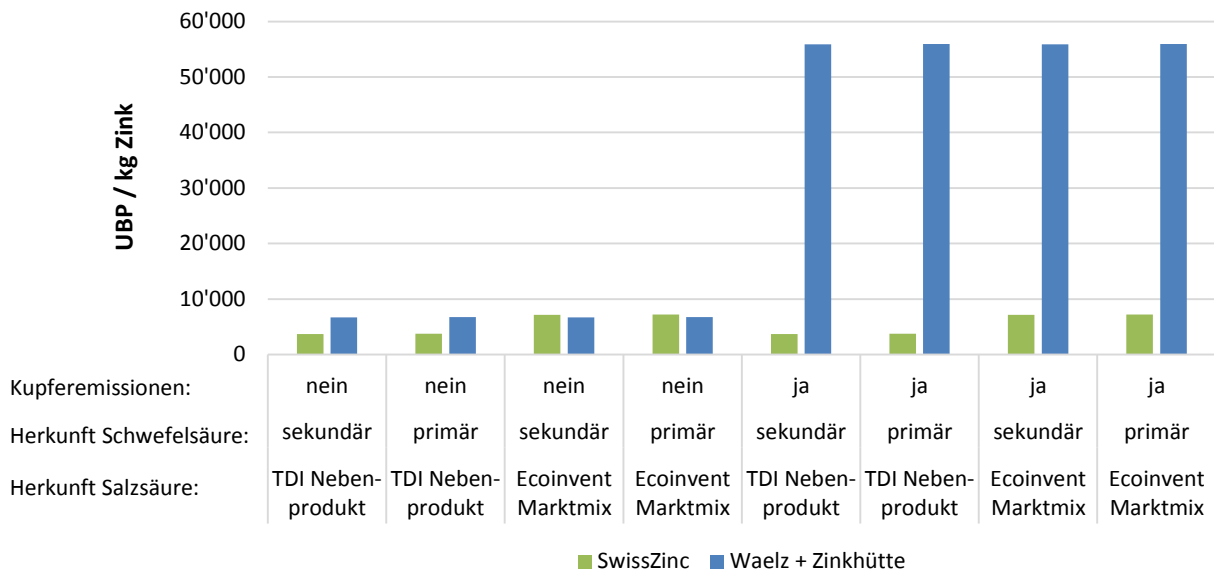
Tabelle 1 listet die in dieser Analyse verwendeten Wirkungsindikatoren für die Wirkungsabschätzung auf. Die Auswahl erfolgte einerseits aufgrund des Kontexts Schweiz, und andererseits wurde damit eine Vergleichbarkeit mit anderen Projekten gewährleistet (z.B. Ökobilanz des Phos4Life-Verfahrens (Mehr et al. 2018)). Die Auswahl der Wirkungsabschätzungsmethoden soll zudem eine umfassende Analyse aus Sicht der Umwelt ermöglichen, d.h. sämtliche relevanten Umweltwirkungen einschliessen.

**Tabelle 1:** Übersicht der Wirkungsindikatoren für die Wirkungsabschätzung. CTU = comparative toxic units.

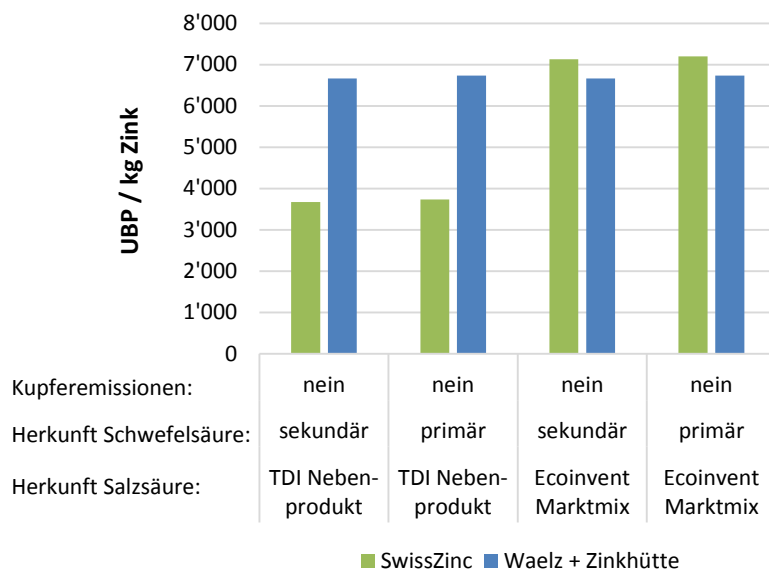
Wirkungsindikator	Abk.	Einheit	Hauptbeitragende Substanzen	Quelle
Umweltbelastungspunkte	UBP	UBP	Schwermetalle, fossile Brennstoffe	Frischknecht et al. 2008
Klimawandel	GWP	kg CO <sub>2</sub> -eq	CO <sub>2</sub> (fossil), N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub>	IPCC 2013
Ökotoxizität (Süsswasser)	ETP	CTU <sub>e</sub>	Schwermetalle, organische Schadstoffe	Rosenbaum et al. 2008
Humantoxizität	HTP	CTU <sub>h</sub>	Schwermetalle, organische Schadstoffe	Rosenbaum et al. 2008
ReCiPe, total (H)	-	Points (Pt.)	fossile Brennstoffe, Emissionen in Luft und Wasser	Goedkoop et al. 2009

#### 3.1 Resultierende Umweltauswirkungen

Alle Umweltauswirkungen werden darin pro Kilogramm SHG-Zink, entsprechend der funktionellen Einheit, angegeben. Abbildung 1 zeigt die totalen Umweltwirkungen der beiden Verfahren für die Wirkungsabschätzungsmethode Ökologische Knappheit (UBP), Abbildung 3 für die Auswirkungen hinsichtlich Klimawandel. Die Resultate sind dargestellt in Abhängigkeit zur Herkunft der Säuren und der Berücksichtigung der Langzeit-Kupferemissionen. Da die Kupferemissionen bei UBP stark dominieren, sind die Resultate dieser Methode in Abbildung 2 zwecks besserer Übersicht ohne Szenarien mit Kupferemissionen abgebildet. Die Graphen für die anderen Wirkungsabschätzungsmethoden sind dem Anhang zu entnehmen. In Tabelle 2 ist zudem als Gesamtübersicht abgebildet, wie die Verfahren in Abhängigkeit der Annahmen im Vergleich abschneiden.

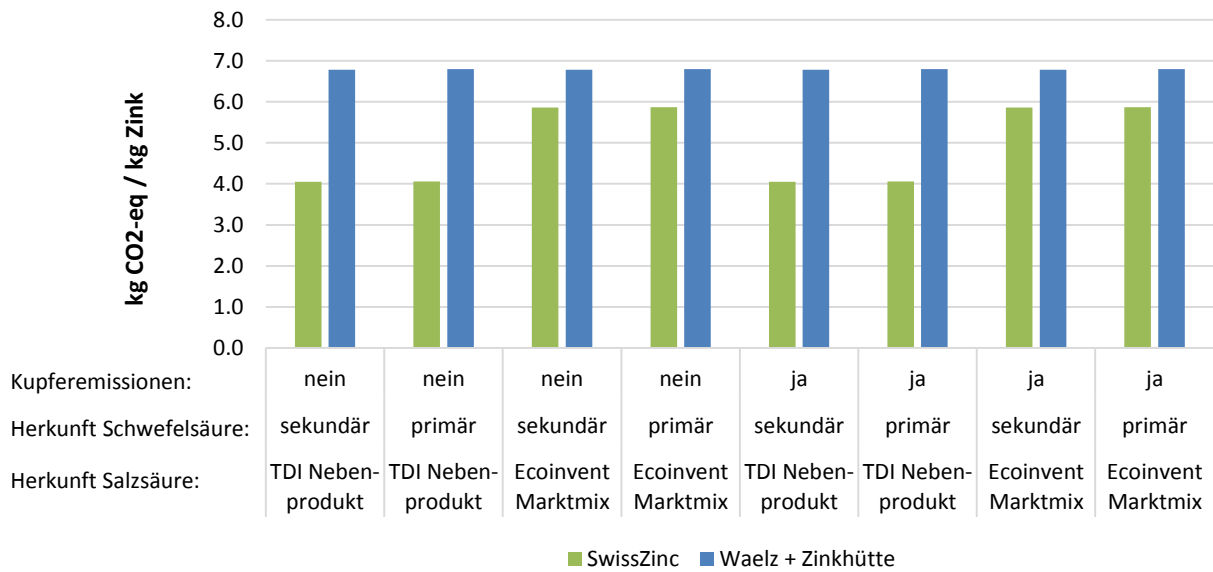


**Abbildung 1:** Umweltbelastungspunkte (UBP) pro kg SHG-Zink für das SwissZinc-Verfahren und den Wälzprozess mit anschliessender Verhüttung unter Berücksichtigung verschiedener Modellannahmen und Betriebsmittelherkünfte.



**Abbildung 2:** Umweltbelastungspunkte (UBP) pro kg SHG-Zink für das SwissZinc-Verfahren und den Wälzprozess mit anschliessender Verhüttung ohne Berücksichtigung der Kupferemissionen (zur besseren Übersicht).





**Abbildung 3:** Treibhausgasemissionen (als CO<sub>2</sub>-eq) pro kg SHG-Zink für das SwissZinc-Verfahren und den Wälzprozess mit anschließender Verhüttung unter Berücksichtigung verschiedener Modellannahmen und Betriebsmittelherkünfte.

**Tabelle 2:** Sensitivitätsanalyse über die Herstellung der Salz- und Schwefelsäure sowie der Berücksichtigung der Kupfer-Emissionen. Grüne Flächen markieren ein besseres Abschneiden des jeweiligen Prozesses (SZ = SwissZinc, W = Zinkrückgewinnung im Wälzverfahren). Orange Flächen kennzeichnen ökobilanzielle Ergebnisse mit wenig Signifikanz (Unterschied kleiner als 5%).

Salzsäure	Schwefel-säure	Cu-Emissionen	Ökol. Knappheit		Klimawandel		Ökotoxizität		Humantoxizität		ReCiPe total	
			Ökol. Knappheit	Ökol. Knappheit	Klimawandel	Klimawandel	Ökotoxizität	Ökotoxizität	Humantoxizität	Humantoxizität	ReCiPe total	ReCiPe total
			SZ	W	SZ	W	SZ	W	SZ	W	SZ	W
TDI Nebenprodukt	sekundär	ja	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Red
TDI Nebenprodukt	sekundär	nein	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Red
TDI Nebenprodukt	primär	ja	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Red
TDI Nebenprodukt	primär	nein	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Green	Red
Ecoinvent Marktmix	sekundär	ja	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Red	Green	Yellow	Yellow
Ecoinvent Marktmix	sekundär	nein	Yellow	Yellow	Green	Red	Red	Green	Red	Green	Yellow	Yellow
Ecoinvent Marktmix	primär	ja	Green	Red	Green	Red	Green	Red	Red	Green	Yellow	Yellow
Ecoinvent Marktmix	primär	nein	Yellow	Yellow	Green	Red	Red	Green	Red	Green	Yellow	Yellow

## 4. Interpretation und Diskussion

Die Ergebnisse zeigen in den meisten Fällen der Sensitivitätsanalyse eine geringere Umweltbelastung pro kg SHG-Zink des SwissZinc-Verfahrens verglichen mit dem Wälzprozess und anschliessender Verhüttung des Konzentrates. Werden die Langzeitemissionen von Kupfer berücksichtigt, ist das SwissZinc-Verfahren in fast jedem Fall ökologisch vorteilhaft (einzige Ausnahme: Humantoxizität bei Verwendung von Salzsäure gemäss dem ecoinvent v3.3-Marktmix sowie primärer Schwefelsäure, da die Herkunft der Säuren insbesondere die Humantoxizität stark beeinflusst). Doch auch wenn die Kupferemissionen nicht berücksichtigt werden, ist das SwissZinc-Verfahren in fast allen Szenarien ökologisch vorteilhaft (siehe Tabelle 2). Die Ausnahmen betreffen Szenarien, wo für die Herkunft der Salzsäure der ecoinvent v3.3-Marktmix angenommen wurde: die hohen Umweltbelastungen dieser Salzsäure bei der UBP-Methode, sowie bezüglich Öko- und Humantoxizität sorgen dafür, dass der SwissZinc-Prozess in diesen Fällen schlechter abschneidet. Vergleicht man die erhalten Umweltwirkungen mit denjenigen der primären Zinkgewinnung aus Erzen bzw. Konzentraten (siehe Anhang 4, Tabelle A.5), so schneiden die beiden sekundären Prozesse SwissZinc und Wälzprozess mit anschliessender Verhüttung in den meisten Fällen ebenfalls positiv ab.

Durch die Sensitivitätsanalyse konnte gezeigt werden, dass die Umweltauswirkungen stark von der Herkunft der Säuren abhängen. Werden diese von Primärproduzenten bezogen, resultiert eine höhere Umweltbelastung für beide Prozesse. Auch reduziert sich der ökologische Vorteil des SwissZinc-Verfahrens stark oder verwindet sogar, wenn Salzsäure gemäss dem ecoinvent v3.3-Marktmix im SwissZinc-Verfahren eingesetzt wird, da für das SwissZinc-Verfahren grosse Salzsäure-Mengen benötigt werden. Der heutige europäische Salzsäuremarkt unterscheidet sich gemäss verschiedenen Quellen jedoch deutlich vom hier verwendeten ecoinvent v3.3-Marktmix. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Anteil an sekundär produzierter Salzsäure deutlich höher ist, als dies zur Zeit der Modellierung von ecoinvent angenommen wurde.

Ein Schwachpunkt der vorliegenden Analyse ist die fehlende inputabhängige Modellierung des Wälzprozesses sowie der anschliessenden Röstung/Laugung in der Zinkhütte. Für eine genauere Modellierung wären zusätzliche Primärdaten der jeweiligen Betreiber nötig. Da jeweils mit best-case Annahmen für das Wälzverfahren gearbeitet wurde (siehe Anhang 3) ist jedoch nicht davon auszugehen, dass eine genauere Modellierung die Umweltwirkungen des Wälzverfahrens entscheidend reduzieren würde.

## 5. Schlussfolgerungen

Zusammenfassend sollen folgende Punkte nochmals hervorgehoben werden:

- Das SwissZinc-Verfahren ist im Vergleich zur Produktion von Zink aus Wälzoxid für alle Wirkungsabschätzungsmethoden ökologisch vorteilhaft, wenn die Salzsäure aus der Nebenproduktion der chemischen Industrie bezogen wird.
- Die Umweltwirkung im Fall SwissZinc wird dominiert vom Verbrauch von Salzsäure (z.B. 59-74% der Umweltbelastungspunkte). Es ist daher dringend notwendig, die Herkunft der Säure zu verfolgen und möglichst Salzsäure welche als Nebenprodukt entstanden ist zu verwenden.
- Werden Langzeitemissionen berücksichtigt, dominieren die Kupferemissionen die Umweltwirkung des Wälzprozesses (nach Methode der ökologischen Knappheit sowie Ökotoxizität). Im Vergleich zum SwissZinc-Verfahren wird im Wälzprozess das Kupfer nicht zurückgewonnen sondern verbleibt im zu deponierenden Rückstand.

## 6. Referenzen

Althaus H.-J., Chudacoff M., Hirsch R., Jungbluth N., Osses M. and Primas A. (2007). Life Cycle Inventories of Chemicals. ecoinvent report No. 8, v2.0. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.

Ashar N.G., Golwalkar K.R. (2013). A Practical Guide to the Manufacture of Sulfuric Acid, Oleums, and Sulfonating Agents, Springer, DOI 10.1007/978-3-319-02042-6\_2.

ecoinvent (2017). The Ecoinvent Database v3.3. The ecoinvent Centre, Zurich, Switzerland. <http://www.ecoinvent.org>.

Frischknecht R., Steiner R. Jungbluth N. (2008). Ökobilanzen: Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006. Öbu – Netzwerk für nachhaltiges Wachstum, Zürich, Schweiz.

Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J. van Zelm R. (2009). ReCiPe 2008 – A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition. Report I: Characterisation.

IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin G., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. and Midgley P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp

ISO 14040 (2006). Environmental management; Life cycle assessment, Life cycle impact assessment. International Organisation for Standardisation (ISO).

ISO 14044 (2006). Environmental management; Life cycle assessment, Requirements and guidelines. International Organisation for Standardisation (ISO).

PROCESS: Chemie, Pharma, Verfahrenstechnik (2014). Bayer plant Erweiterung der Salzsäure-Anlage in Dormagen. Link: <https://www.process.vogel.de/bayer-plant-erweiterung-der-salzsaeure-anlage-in-dormagen-a-444317/> Zuletzt aufgerufen: 22.05.2018.

Rosenbaum R., Bachmann T., Gold L., Huijbregts M., Jolliet O., Juraske R., Koehler A., Larsen H., MacLeod M., Margni M., McKone T., Payet J., Schuhmacher M., van de Meent D., Hauschild M. (2008). USEtox – The UNEP-SETAC toxicity model: Recommended characterization factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment 13(7): 532-546.

Schlumberger S., Haupt M., Jutz M. (2016). Zinkrecycling aus Hydroxidschlämmen. Abschlussbericht. Mitfinanziert durch das BAFU, Dezember 2016.

# Anhang

## Anhang 1 – Methodik

### A.1.1 Cut-off Ansatz

Der Cut-off Ansatz beschreibt eine Philosophie wonach die Primärproduktion immer dem ersten Nutzer des Materials angerechnet wird. Wenn Material recycelt wird, werden dem primären Nutzer keine Gutschriften dafür gegeben, dass er sekundäres Material zur Verfügung stellt. Als Konsequenz ist das Eingangsmaterial von Recyclingprozessen «burden-free», also ohne jegliche Umweltauswirkungen. Sekundäres Material beinhaltet dann lediglich die Aufwände, welche im Recyclingprozess verursacht werden. Das heisst, dass Abfallproduzenten keine Gutschriften erhalten für das im Recycling hergestellte sekundäre Material. (ecoinvent 2017)

### A.1.2 Ökonomische Allokation

Da die Auswirkungen der sekundären Salzsäureproduktion nicht der Datenbank entnommen werden konnten, mussten sie mittels ökonomischer Allokation berechnet werden. Tabelle A.2 beschreibt die Allokation inkl. getroffener Annahmen. Es ist wichtig zu beachten, dass für die Salzsäure der ecoinvent v3.3-Datensatz verwendet wurde, da der Neue noch weiter von der realen Marktzusammensetzung abweicht.

**Tabelle A.1:** ecoinvent-Prozesse und Annahmen zur Salzsäureherstellung, die im Rahmen der Sachbilanz dieser Studie eine Rolle gespielt haben.

Prozess	Einheit	Ort	Bemerkung
market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state (v3.3)	kg	RER	Europäischer Marktprozess der Salzsäure (46% als Nebenprodukt der Allyl-Produktion, 27% Direktsynthese, 27% Mannheimer Prozess), welcher allerdings die aktuelle Marktsituation nur unzureichend abbildet, da Salzsäure zunehmend als Nebenprodukt gewonnen wird ➤ In den Szenarien benannt als „ecoinvent Marktmix“
toluene diisocyanate production	kg	RER	Toluol-2,4-diisocyanat (TDI)-Produktionsprozess, bei welchem Salzsäure in grossen Mengen als Nebenprodukt anfällt; der Prozess ist in ecoinvent v3.3 ohne Salzsäure als Nebenprodukt modelliert, der ecoinvent-Report (Althaus et al. 2007) liefert jedoch Marktpreise beider Produkte für eine ökonomische Allokation (siehe Althaus et al. 2007) ➤ In den Szenarien benannt als „TDI Nebenprodukt“

**Tabelle A.2:** Preisangaben für die ökonomische Allokation der Salzsäure (Allokation anhand der Einnahmen).

Produkt	Preis ab Werk (€/t)	Menge (t)	Einnahmen (€)	Allokationsfaktor (-)	Quelle
TDI	2'100	1	2'100	0.964	Althaus et al. 2007
Salzsäure	79.2	1 <sup>1</sup>	79.2	0.036	Althaus et al. 2007

<sup>1</sup> Annahme (dieser Wert liegt zwischen dem Literaturwert und dem stöchiometrischen „Theoriewert“)

## Anhang 2 – Inventar SwissZinc-Verfahren

Tabelle A.3: Inventar SwissZinc.

Input	Einheit	Menge	Quelle / Berechnungen / Kommentare
<b>Inputs aus Technosphäre</b>			
HCl 32%	t/a	11384	Angabe ZAR
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 96%	t/a	505	Angabe Técnicas Reunidas / ZAR
NaOH 50%	t/a	28	Angabe ZAR
CaO 100%	t/a	3482	Angabe Técnicas Reunidas / ZAR
Wasserstoffperoxid	t/a	14	Angabe Técnicas Reunidas / ZAR
Komplexbildner	t/a	1	Angabe Técnicas Reunidas
Lösungsmittel	t/a	7	Angabe Técnicas Reunidas
Strom (CH-KVA/CH/EU)	kWh	7534400	Angabe Técnicas Reunidas / ZAR
<b>Oberflächengewässer (Abwassermenge: 180'000 m<sup>3</sup>/a)</b>			
Stickstoff als N	kg	388.25	Angabe ZAR
Phosphor als P	kg	0	Angabe ZAR
Arsen	kg	1	Angabe ZAR
Blei	kg	1	Angabe ZAR
Cadmium, ion	kg	1	Angabe ZAR
Chrom	kg	1	Angabe ZAR
Kupfer	kg	0.5	Angabe ZAR
Nickel	kg	0.6	Angabe ZAR
Quecksilber	kg	0.000626	Angabe ZAR
Zink	kg	3.4	Angabe ZAR
<b>Transporte</b>			
CH-Bahn	tkm	994000	99.4 km Transport (mittlerer Durchschnitt aller anliefernden KVAs), 10% per LKW, 90% Bahn (Annahme: Standort KEBAG)
CH LKW	tkm	110444	99.4 km Transport (mittlerer Durchschnitt aller anliefernden KVAs), 10% per LKW, 90% Bahn (Annahme: Standort KEBAG)

### Anhang 3 – Inventar Wälzprozess + Zinkhütte

**Tabelle A.4:** Inventar für Rückgewinnung Zink aus Hydroxidschlämmen im Wälzprozess

Input	Einheit	Menge	Quelle / Berechnungen / Kommentare
<b>Inputs aus Technosphäre</b>			
HCl 32%	t/a	0.25	Befesa Umweltbericht 2016
NaOH 50%	t/a	7.93	Befesa Umweltbericht 2016
CaO 100%	t/a	31.69	Befesa Umweltbericht 2016
HOK	t/a	11.21	Befesa Umweltbericht 2016
Koks 100%	t/a	1462.13	Befesa Umweltbericht 2016
Soda 100%	t/a	52.32	Befesa Umweltbericht 2016
Trinkwasser	m <sup>3</sup> /a	4057	Befesa Umweltbericht 2016
Strom WO Verhüttung	kWh	966949	Befesa Umweltbericht 2016
Erdgas	m <sup>3</sup> /a	43510	Befesa Umweltbericht 2016
Laugung Zinkhütte (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	t/a	500	Stöchiometrisch werden 3'000 t/a H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 96% benötigt (ZnO+H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> --> ZnSO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> 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.
Strom Zinkhütte (D/EU)	kWh	6'825'773	Die Verhüttung von Zink braucht 3-3.5 kWh pro t Zink (gerechnet mit 3.5 kWh/t) (Quelle: Elektrochemische Verfahrenstechnik, Volkmar M. Schmidt, Wiley VC Verlag, 2003)
CaO 100%, ABA Zinkhütte	t/a	300	Annahme: Verbrauch wie bei SwissZinc (ca. 311 t/a). Abschätzung zur Abwasserbehandlung nach der Zinkelektrolyse.
<b>Emissionen</b>			
Cu in Wälzschlacke	t/a	80.64	Annahme: Gleiche Menge wie im SwissZinc Prozess zurückgewonnen werden kann (nach Angaben Técnicas Reunidas/ZAR)
<b>Abluft</b>			
Gesamtstaub	kg	112.7555	Befesa Umweltbericht 2016
Blei	kg	3.357082	Befesa Umweltbericht 2016
Cadmium	kg	0.056378	Befesa Umweltbericht 2016
CO <sub>2</sub> direkt	kg CO <sub>2</sub>	4344593	Befesa Umweltbericht 2016
VOC	kg C/a	123.652	Befesa Umweltbericht 2016
SO <sub>2</sub>	kg	1336.011	Befesa Umweltbericht 2016
HCl	kg	33.63715	Befesa Umweltbericht 2016

HF	kg	35.05843	Befesa Umweltbericht 2016
PCDD/PCDF	kg TE	8.24E-08	Befesa Umweltbericht 2016
Hg	kg	0.132654	Befesa Umweltbericht 2016
NOx	kg	1705.072	Befesa Umweltbericht 2016
<b>Transporte</b>			
CH LKW	tkm	1411111	Transport ab FLUWA-KVA zum Umladestandort Full (durchschnittlich 127 km Transport mit LKW)
Wälzoxid aus HS zu Zinkhütte	tkm	1590838	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 (=2000 t Zn/a) als Wälzoxid aus Hydroxidschlamm)
Hydroxidschlamm, D-LKW zu BEFESA	tkm	7366667	Strecke Full nach Befesa Freiberg (663km)

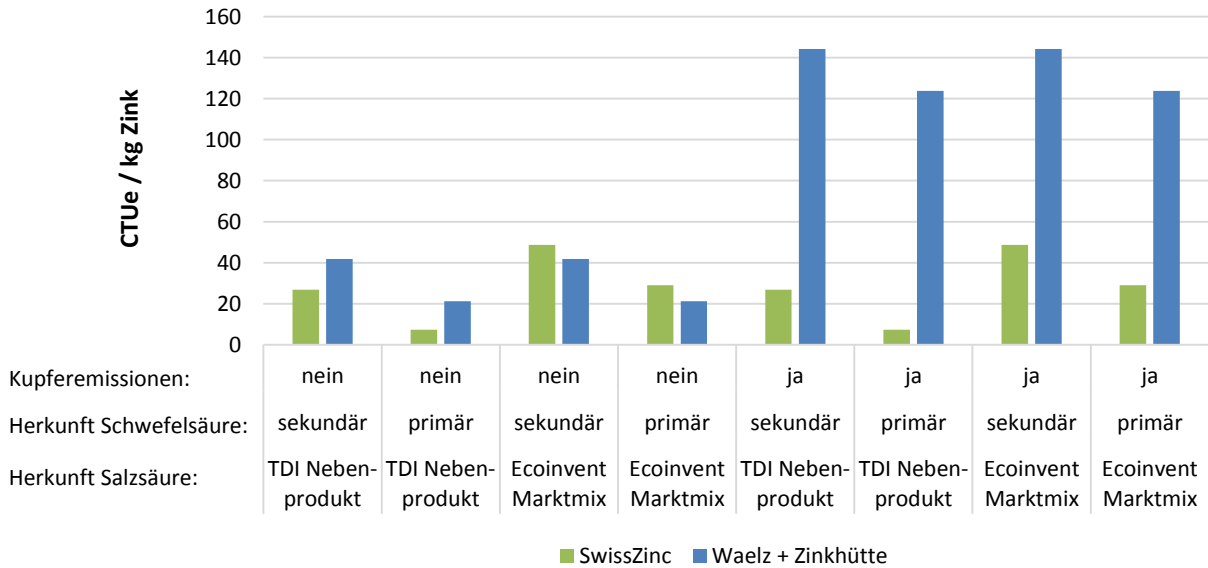
#### Anhang 4 – Umweltwirkung Zink-Primärproduktion

**Tabelle A.5:** Umweltwirkung der primären Zinkproduktion aus Konzentraten/Erzen (RoW) und globaler Zinkmarktmix (GLO), der zu 91% aus der Primärproduktion (RoW) besteht. Bezugsgrösse ist ein Kilogramm *special high grade* Zink.

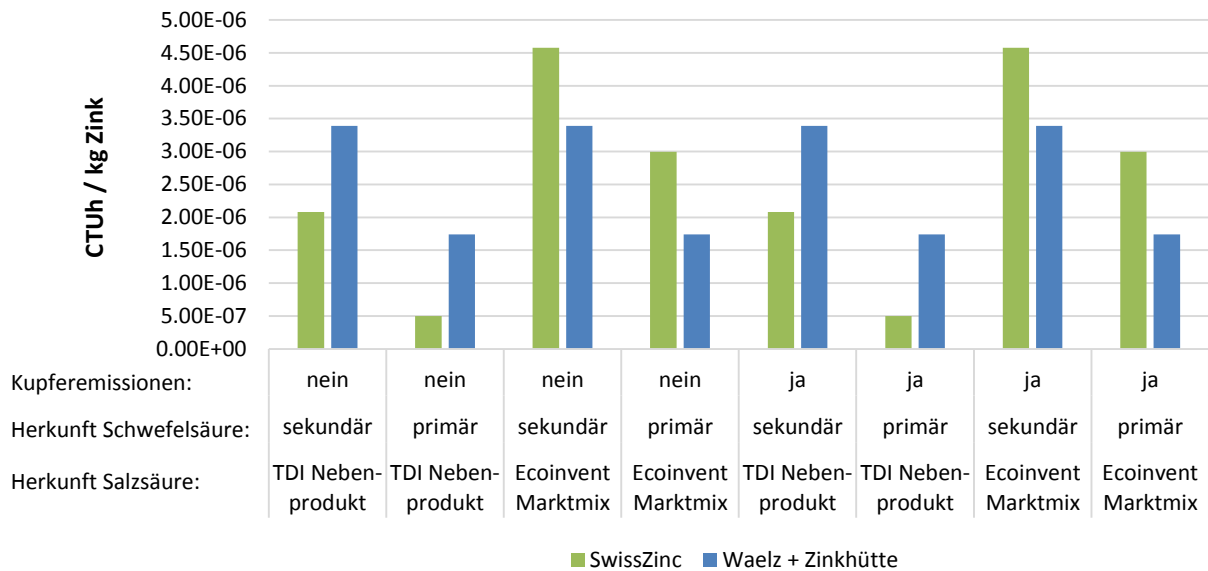
ecoinvent v3.4 Prozess	Ökologische	Klimawandel	Ökotoxizität	Humantoxizität	ReCiPe total
	Knappheit				
	UBP	kg CO <sub>2</sub> -eq	CTUe	CTUh	Pt.
primary zinc production, from concentrate (RoW)	1.19E+05	5.19	132.4	4.47E-05	0.78
market for zinc (GLO)	1.11E+05	4.92	124.1	4.11E-05	0.77



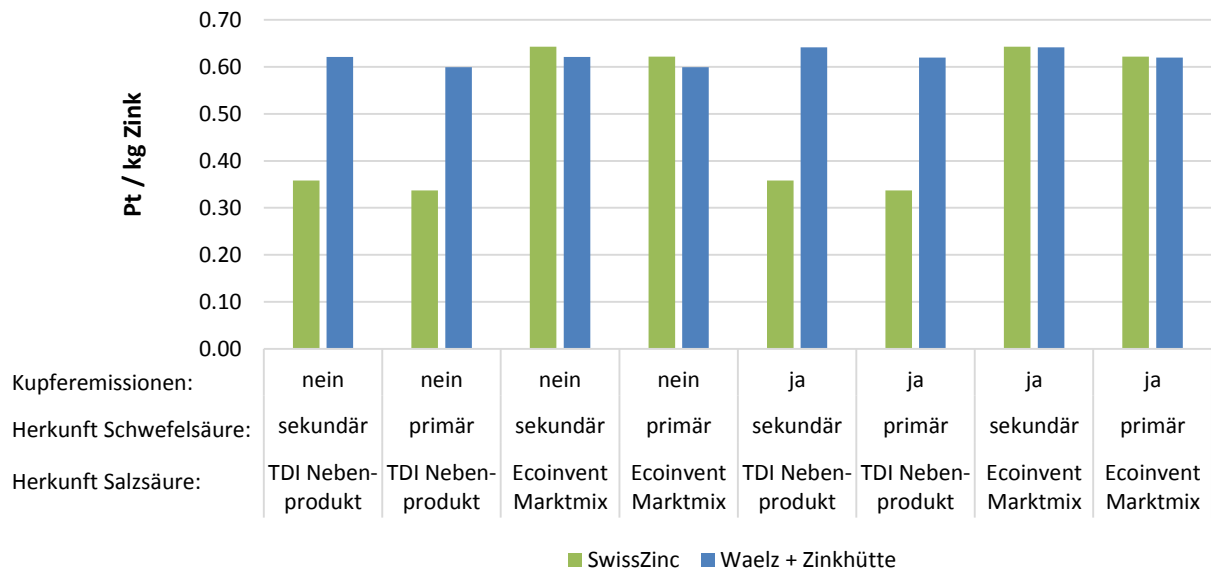
## Anhang 5 – Resultate



**Abbildung A.1:** Ökotoxizität (in CTUe) pro kg SHG-Zink für das SwissZinc-Verfahren und den Wälzprozess mit anschließender Verhüttung unter Berücksichtigung verschiedener Modellannahmen und Betriebsmittelherkünfte.



**Abbildung A.2:** Humantoxizität (in CTUh) pro kg SHG-Zink für das SwissZinc-Verfahren und den Wälzprozess mit anschließender Verhüttung unter Berücksichtigung verschiedener Modellannahmen und Betriebsmittelherkünfte.



**Abbildung A.3:** ReCiPe Points pro kg SHG-Zink für das SwissZinc-Verfahren und den Wälzprozess mit anschließender Verhüttung unter Berücksichtigung verschiedener Modellannahmen und Betriebsmittelherkünfte.