

## From Waste to Product – Upscaling of Conditioning Lead and Zinc Slags in an Electric Arc Furnace

Jürgen Maier and Bernd Friedrich

Metallurgical processes for the production of several non-ferrous metals are accompanied by the generation of mineral residues like heavy metal-bearing slags. Consequently, huge amounts of hazardous material, still containing high concentrations of recoverable elements like lead and zinc, are put on landfills. This environmentally unfriendly approach is a big issue against the background of conservation of resources and thus the basic idea of circular economy. For this reason, we carried out examinations on the example of three slags, originated from different metallurgical manufacturing routes, to prove slag valorization due to heavy metal reduction while simultaneously winning of zinc oxide-enriched flue dust and lead-rich metal phase as valuable products. To this end, limit values for lead and zinc content in the remaining slag after heavy metal removal have been defined to be 0.3 wt-% and 2.0 wt.-%, respectively.

At its outset, this study addresses the challenge of handling heavy metal-containing slags with focus on depositing these process residues. One method of reducing hazardous components is a thermal treatment used to extract heavy metals and thus generate a mineral phase applicable in the construction material sector. The theoretical background of slag treatment process including chemical reactions and furnace technology is presented for experimental work done in a pilot-scale electric arc furnace. In this regard, the above-mentioned slags coming from copper and lead industry were chemically characterized, showing high potential for the recovery of valuable metals. For this purpose, main parameters were identified to be a process temperature of 1,300 – 1,350 °C and the addition of lignite coke and fluxes. Specific amounts of added lignite coke as reducing agent and fluxes like calcined lime and soda depended on slag type and the heavy metal concentration included therein. Products obtained from the slag treatment procedure were a mostly clean slag free of heavy metals, flue dust to be utilized winning lead and zinc and a metal phase suitable for lead refining or antimonial lead manufacturing. Aimed threshold values for lead and zinc concentration in treated slag have been mainly achieved, except in one case where it was slightly missed. Moreover, process data for operating the electric arc furnace, e.g. energy and electrode consumption, were determined for a first assessment of operational costs.

## Vom Abfall zum Produkt – Upscaling der Konditionierung im Elektrolichtbogenofen für Blei-/Zink-Schlacken

Jürgen Maier und Bernd Friedrich

1.	Schwermetallhaltige Schlacken der Bleiindustrie.....
2.	Grundzüge der Schlackenreduktion.....
3.	Grundlagen des ELBO.....
4.	Charakterisierung des Versuchsmaterials.....
5.	Experimentelle Arbeiten .....
5.1.	Aufbau des Pilot-ELBO.....
5.2.	Parameter .....
5.3.	Versuchsdurchführung.....
5.4.	Auswertung von Versuchsergebnissen.....
6.	Zusammenfassung .....
7.	Literatur .....

Metallurgische Prozesse zur Herstellung von Buntmetallen sind stets mit der Entstehung mineralischer Reststoffe wie schwermetallhaltigen Schlacken verbunden. In diesem Zusammenhang werden große Mengen umweltgefährdender Materialien, welche hohe Gehalte an recyclebaren Wertmetallen wie Blei und Zink enthalten, deponiert. Dieser umweltbelastende Ansatz steht der Schonung von natürlichen Ressourcen und dem Grundgedanken der Kreislaufwirtschaft entgegen. Aus diesem Grund sind Untersuchungen am Beispiel von drei Schlacken, die unterschiedlichen metallurgischen Prozessrouten entstammen, mit dem Ziel einer Schwermetallreduktion durchgeführt worden. Diese führt zu einer Aufwertung der konditionierten Schlacken bei gleichzeitiger Gewinnung eines an Zinkoxid angereicherten Flugstaubs und einer bleireichen Metallphase. Zu diesem Zweck sind angestrebte Grenzwerte für den Blei- und Zinkgehalt in der reduzierten Schlacke mit 0,3 Gew.-% bzw. 2,0 Gew.-% festgelegt worden.

In dem vorliegenden Beitrag wird zunächst die Problematik der Handhabung von schwermetallhaltigen Schlacken mit Fokus auf die Deponierung dieser Reststoffe adressiert. Eine Möglichkeit zur Entfernung gefährdender Bestandteile dieser Schlacken besteht in einem pyrometallurgischen Prozess zur Extraktion von Schwermetallen und damit der Darstellung einer mineralischen Phase zur Anwendung in der Baustoffindustrie.

Dazu werden die theoretischen Grundlagen der Schlackenconditionierung mit auf-tretenden chemischen Reaktionen und der entsprechenden Industrieofentechnik für nachfolgende experimentelle Arbeiten in einem Pilot-Elektrolichtbogenofen (ELBO) erläutert. Eine chemische Charakterisierung der hierbei verwendeten Einsatzmateri- alien, welche Schlacken aus der Blei- und Kupferroute sind, zeigt ein hohes Potential für die Rückgewinnung von Wertmetallen. Dabei sind als wichtigste Parameter eine Prozesstemperatur von 1.300 – 1.350 °C und die Zugabe von Braunkohlekoks und Flussmitteln festgestellt worden. Die genaue Menge des zugesetzten Braunkohle- kokes, der als Reduktionsmittel dient, und des als Flussmittel eingebrachten Kalks und Natriumcarbonats orientiert sich an der Art der Schlacke sowie der enthaltenen Schwermetallkonzentrationen. Die in der thermischen Schlackenbehandlung erzeug- ten Produkte sind eine annähernd schwermetallfreie Schlacke, ein für die Gewinnung von Blei und Zink geeigneter Flugstaub und eine bleireiche Metallphase, die in einer Bleiraffination verarbeitet oder zur Hartbleiherstellung genutzt werden kann. Die ge- setzten Grenzwerte der Blei- und Zinkkonzentration in den reduzierten Schlacken sind, bis auf einen Fall, in allen Untersuchungen erreicht worden. Weiterhin sind für den Ofenbetrieb relevante Prozessdaten wie der Energieverbrauch und Elektrodenabbrand für eine erste Abschätzung der operativen Kosten erfasst worden.

## 1. Schwermetallhaltige Schlacken der Bleiindustrie

Durch die Verhüttung von bleihaltigen Konzentraten und das Recycling bleihaltiger Erzeugnisse sind im Jahr 2020 weltweit 11,8 Millionen Tonnen Blei produziert wor- den [5]. Dabei ist die Entstehung großer Mengen schwermetallhaltiger Schlacken unumgänglich. Diese müssen als Abfälle aus der thermischen Bleimetallurgie auf einer Sonderabfall- oder Untertagedeponie untergebracht bzw. einer stofflichen Nutzung zugeführt werden [1]. Letzteres wird nach jetzigem Stand aus Kostengründen vernach- lässigt und eine Deponierung der Schlacken bevorzugt, obwohl ein hohes Potential für eine Wertmetallrückgewinnung besteht. Dieser Ansatz widerspricht dem Gedanken der Kreislaufwirtschaft und ist vor dem Hintergrund abnehmender Erzqualitäten kein zukunftsträchtiges Konzept [11]. Angesichts begrenzter Deponiekapazitäten und einer fortschreitenden Verknappung dieser ist in naher Zukunft zu erwarten, dass die Depo- niekosten steigen werden [6]. Neben diesem ökonomischen Aspekt ist vor allem aus ökologischer Sichtweise die Gewinnung von in Schlacken enthaltenen Wertmetallen, vor allem Blei und Zink, ein wichtiger Schritt zur Schonung natürlicher Ressourcen. Durch die Entfernung zuvor genannter Metalle sowie weiterer unerwünschter Be- gleitelemente wie Arsen und Antimon aus der Schlacke kann diese als Additiv in der Baustoffindustrie verwertet werden. Hierbei ist die Gesetzeslage zur Verwendung von Schlacken als Zusatzstoff von regionalen Bestimmungen geprägt und von der Herkunft der Schlacke abhängig. Die wichtigsten Kenngrößen sind das Eluatverhalten von ausgewählten Schwermetallen, der pH-Wert sowie die elektrische Leitfähigkeit [10], welche nach DIN 19528 bestimmt werden. Somit sind Angaben zu Obergrenzen von Schwermetallkonzentrationen in Schlacken für einen Einsatz in Baustoffen nicht direkt relevant, da die chemische Stabilität der Schlackenmatrix ein entscheidender Faktor ist.

Dennoch besteht ein Zusammenhang zwischen der in der Schlacke enthaltenen Schwermetallkonzentration und dem Eluatverhalten, weshalb in einem Schlackenre- duktionsprozess möglichst geringe Gehalte an Schwermetallen anzustreben sind. Um eine breitere industrielle Akzeptanz für die Verwertung schwermetallhaltiger Schlacken aus der Bleiindustrie zu schaffen sind in der vorliegenden Untersuchung drei Schlacken unterschiedlichen Ursprungs in einem ELBO konditioniert worden.

## 2. Grundzüge der Schlackenreduktion

Eine pyrometallurgische Behandlung von blei- und zinkhaltigen Schlacken ist ange- sichts enthaltener Wertmetalle eine sinnvolle Alternative zur Deponierung dieser Rest- stoffe. Blei liegt in diesen Schlacken meist in Form von nicht abgesetzten Metalltropfen sowie als im ursprünglichen Gewinnungsprozess nicht ausreduziertem Bleioxid vor. Weiterhin können Schlacken vor allem aus der Sekundärbleigewinnung sulfidische und sulfatische Bleiverbindungen enthalten. Zink hingegen liegt hauptsächlich in oxidischer Form vor und ist nur in Schlacken der Erzverhüttung von Bedeutung. [13] Nachfolgend ist in Bild 1 eine schematische Darstellung des Schlackenreduktionsprozesses sowie stattfindender Reaktionen für Blei, Zink und Eisen dargestellt.

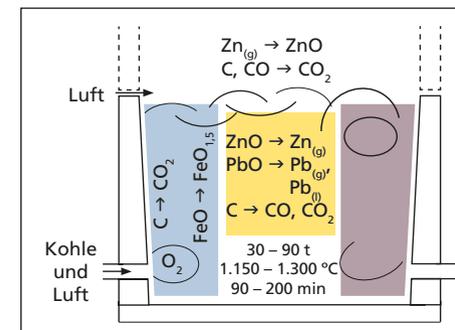


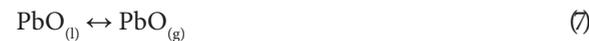
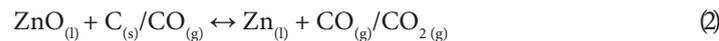
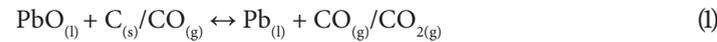
Bild 1: Schematische Darstellung der Schla- ckenreduktion mit ausgewählten Reaktionen für Blei, Zink und Eisen

Nach: Richards, G.: Kinetics of the zinc slag fuming process, Dissertation, University of British Columbia, Department of Metallurgical Engineering, 1983

Die Schlackenreduktion, auch als Schla- ckenverblasen bekannt, erfolgt in der Re- gel chargenweise mit einer Einsatzmenge von 30 – 90 t Schlacke, welche entweder in flüssiger Form aus z.B. einem Schachtofen oder als Feststoff chargiert wird, in einem rechteckigen wassergekühlten Ofen. Da- bei erstarrt ein Teil der Schlacke, welcher in unmittelbarem Kontakt zur wasser- gekühlten Wand steht, und bildet somit eine arteigene Schutzschicht aus. Zur Gewährleistung des für den Prozess no- twendigen Wärmeeintrags und Einstellung von reduzierenden Bedingungen in der Schlacke werden im Bodenbereich durch seitliche angebrachte Düsen Luft und pulverförmige Kohle eingeblasen. Oberhalb der Schmelzoberfläche wird zusätzliche Luft zur Nachverbrennung von Abgasen, vor allem gasförmigem Zink und Kohlenstoff- monooxid, eingeleitet. Die Dauer des Schlackenverblasens einer Charge dauerte etwa 90 – 120 min und wird bei einer Prozesstemperatur von 1.150 – 1.300 °C durchgeführt. Nach Erreichen einer Zinkkonzentration von 2 – 3 Gew.-% in der Schlacke gilt diese als an Schwermetallen hinreichend ausreduziert und wird anschließend abgestochen. Der Bleigehalt wird auf bis zu 0,5 Gew.-% am Ende des Schlackenverblasens gesenkt. Von einer weiteren Reduktion der Blei- und Zinkkonzentration in der Schlacke wird abgesehen, da aufgrund einer im Laufe des Schlackenverblasens zunehmenden Aktivität

des Eisenoxids dessen unerwünschte Reduktion zu metallischem Eisen möglich wird. Die Bildung einer Eisenphase führt bei der gegebenen Prozesstemperatur zu festen Ablagerungen und damit Schwierigkeiten beim Abstich des Ofens. [13]

Beim Schlackenverblasen finden chemische Reaktionen sowohl in der Schlacke als auch in der Atmosphäre oberhalb der Schmelze statt. Nachfolgend sind relevante Reaktionen in der Schlackenphase und Atmosphäre infolge einer Hinzugabe von Kohlenstoff als Reduktionsmittel bei einer Temperatur von 1.300 °C aufgeführt.



Reaktionsgleichungen (1) und (2) zeigen die beabsichtigten Reaktionen zur Reduktion von Blei- und Zinkoxid aus der Schlacke; Reaktionsgleichung (3) hingegen ist die unerwünschte Reduktion von Eisenoxid. In Reaktionsgleichung (4) ist das Boudouard-Gleichgewicht, eine Gleichgewichtsreaktion zwischen Kohlenstoffdioxid mit Kohlenstoff und Kohlenstoffmonooxid, dargestellt. Das Gleichgewicht liegt bei Temperaturen über 1.000 °C vollständig auf der Produktseite. Die Reaktionsgleichung (5) und (6) stellt die Verdampfung von Zink und Blei, welche bei der angestrebten Prozesstemperatur auftritt, dar. Weiterhin ist aufgrund eines relativ niedrigen Dampfdrucks von Bleioxid eine Verdampfung dieser Verbindung in Gleichung (7) sowie eine Oxidation des verdampften Bleis und Zinks aus Gleichung (5) und (6) bei Kontakt mit der Atmosphäre oberhalb der Schlackenphase in Gleichung (8) und (9) möglich. [13]

Entscheidend für das Zustandekommen der beschriebenen Reaktionen ist die Aktivität der jeweiligen Verbindungen innerhalb des Schlackensystems. Die Aktivität einer Verbindung kann durch eine Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Schlacke infolge ablaufender Reaktionen sowie durch eine gezielte Zugabe von Flussmitteln beeinflusst werden. Für den vorliegenden Fall der Schlackenconditionierung mit dem Ziel der Entfernung von Zink und Blei aus der Schlacke ist eine positive Wirkung von Kalk bekannt. So steigt die Aktivität von Zinkoxid bei zunehmender Kalkzugabe an [13]. Dagegen sinkt die Aktivität von dreiwertigen Eisenionen, da Kalk eine höhere Schlackenbasizität bewirkt und mit dieser eine Stabilisierung von Eisenionen in der Schlacke einhergeht. Außerdem steht eine steigende Schlackenbasizität der Ausbildung von Zinkferrit sowie Zinksilikat, welche im Vergleich zu Zinkoxid schwerer zu reduzieren sind, entgegen. Beide Effekte fördern die Reaktion in Gleichung (2) [2].

Eine ähnliche Auswirkung hat die Zugabe von Kalk auf das Verhalten von Bleioxid in der Schlacke, weil eine Erhöhung der Schlackenbasizität ebenso die Aktivität des Bleioxids steigert und die Reaktion in Gleichung (1) begünstigt. [8]

Das Einschmelzen einer schwermetallhaltigen Schlacke unter Zugabe von Kohlenstoff als Reduktionsmittel kann alternativ zu dem in Bild (1) beschriebenen Ansatz auch in Aggregaten wie einem Badschmelzofen oder einem ELBO erfolgen [13]. Letzterer Ofentyp ist in der vorliegenden Untersuchung für das Schlackenverblasen verwendet worden, da die Eignung des ELBOs für die metallurgische Prozessierung verschiedener Einsatzmaterialien in vorangegangenen Untersuchungen erfolgreich gezeigt werden konnte. Dazu zählen die carbothermische Reduktion von blei- und zinkhaltigen Schlacken [3] und Rotschlamm [7] sowie die pyrometallurgische Gewinnung von Wertmetallen aus Manganknollen [14].

### 3. Grundlagen des ELBO

Der ELBO ist ein Aggregat, welches ursprünglich in der Eisen- und Stahlindustrie zur Herstellung von Legierungen sowie dem Schrottreycling verwendet wurde. Aufgrund einer hohen Flexibilität in Bezug auf das Einsatzmaterial und eines großen Durchsatzes dieses Anlagentyps wird dieser verstärkt zum reduzierenden Schmelzen verschiedener Einsatzstoffe genutzt. [15] Vor diesem Hintergrund eignet sich der ELBO zum Armschmelzen von Schlacken aus bspw. der Kupfer- oder Bleiindustrie.

Ein ELBO besteht aus einem meist wassergekühlten Stahlmantel rechteckigen, selten elliptischen oder zylindrischen Querschnitts mit einem flachen oder gewölbten Boden. Im Inneren ist das Ofengefäß mit einer feuerfesten Ausmauerung, welche sich für gewöhnlich nach der Art des Einsatzmaterials richtet, versehen. Abdeckt wird der Ofen mit einem feuerfest zugestellten Deckel, welcher Öffnungen für die Chargierung, den Durchgang von Elektroden und die Absaugung von Abgas aufweist. Die Elektroden bestehen aus Gründen der thermischen und mechanischen Stabilität sowie elektrischer Eigenschaften aus Graphit. Prinzipiell werden zwei Arten des ELBOs unterschieden, jene mit einer Boden- und einer Kopfelektrode werden im Gleichstrombetrieb sowie jene mit drei Kopfelektroden im Wechselstrombetrieb verwendet. [9] Im Fall einer Fahrweise des ELBOs mit frei brennendem Lichtbogen erfolgt der Energieübergang zwischen einer Elektrode und dem zu schmelzenden Gut durch Strahlung und Konvektion. Bei einer Fahrweise des Ofens mit in der Schmelze eingetauchten Elektroden steht hingegen eine Widerstandserwärmung im Vordergrund. Die Beschickung des ELBOs kann mit Einsatzmaterial im sowohl festen als auch flüssigen Zustand durchgeführt werden. Zum Zweck der Entleerung eines Ofens nach beendeter Schmelzarbeit und metallurgischer Prozessierung kann dieser entweder gekippt oder abgestochen werden. [4]

### 4. Charakterisierung des Versuchsmaterials

Das in der vorliegenden Untersuchung verwendete Einsatzmaterial umfasst drei schwermetallhaltige Schlacken unterschiedlichen Ursprungs. Zwei Schlacken weisen eine

fayalitische Matrix auf; eine der Schlacken entstammt einem Kupferhüttenprozess (S1) sowie eine weitere einer Konzentrat verarbeitenden Bleihütte (S2). Die dritte Schlacke ist eine Sodaschlacke (S3) eines Recyclingunternehmens für Bleisäurebatterien. Die chemische Zusammensetzung der Schlacken wird hinsichtlich der Metall- und Metalloxydkonzentrationen mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) ermittelt, wohingegen der Kohlenstoff- und Schwefelgehalt unter Anwendung der Verbrennungsmethode gemessen werden. Für Eisen, Blei, Zink und Kupfer beschränkt sich die Konzentrationsangabe auf den metallischen Zustand, da für diese Elemente keine Information zu dem Anteil oxidischer und sulfidischer Bindungsform vorliegt. Da Schlacken komplexe Vielstoffsysteme darstellen, werden in der nachfolgenden Tabelle nur die Anteile für die Untersuchung relevanter Phasen aufgezeigt.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung untersuchter Schlacken

Element/ Verbindung	S1	S2	S3
	Gew.-%		
SiO <sub>2</sub>	24,05	24,65	49,78
CaO	16,30	10,42	1,60
MgO	2,65	0,83	0,85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,96	3,08	4,59
Na <sub>2</sub> O	2,97	0,41	17,12
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,17	1,63	0,28
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,17	1,15	< 0,01
SnO <sub>2</sub>	0,74	0,49	1,08
Fe <sub>ges</sub>	28,85	23,15	8,32
Pb <sub>ges</sub>	3,40	6,68	1,81
Zn <sub>ges</sub>	3,86	13,27	1,39
Cu <sub>ges</sub>	0,85	0,01	0,40
C	0,08	0,36	0,88
S	1,34	0,16	1,48

In einem Vergleich der in den Schlacken enthaltenen Schwermetallkonzentrationen wird deutlich, dass die Schlacke S2 eine relativ hohe Blei- und Zinkkonzentration und somit ein hohes Potential für die Rückgewinnung dieser Wertmetalle aufweist. Demgegenüber hat die Schlacke S1 einen moderaten Blei- und Zinkgehalt, der Kupfergehalt hingegen ist deutlich höher. Schlacke S3 enthält den geringsten Anteil extrahierbarer Wertmetalle.

## 5. Experimentelle Arbeiten

In diesem Kapitel wird zunächst die Versuchsanlage zur Konditionierung schwermetallhaltiger Schlacken im Pilotmaßstab vorgestellt. Dem folgt die Darstellung untersuchter Versuchsparameter in der Durchführung experimenteller Arbeiten mit einer abschließenden Bewertung der erzielten Versuchsergebnisse. Das Ziel der Untersuchung ist eine möglichst selektive Gewinnung eines zinkoxidreichen Flugstaub, einer vorwiegend bleihaltigen Metallphase sowie einer Restschlacke mit einem Bleigehalt unter 0,3 Gew.-% und einem Zinkgehalt unter 2,0 Gew.-%. Die Erzielung der zuvor genannten Schwermetallkonzentrationen wird als primäres qualitatives Bewertungskriterium definiert.

### 5.1. Aufbau des Pilot-ELBO

Die Konditionierung der in Kapitel 4 beschriebenen Schlacken ist in einem Wechselstrom-ELBO im Pilotmaßstab (Bild 2) am Institut für Metallurgische Prozesstechnik

und Metallrecycling durchgeführt worden. Die maximale Anschlussleistung des Ofens beträgt 1 MW bei einer Stromstärke von 5 kA und einer Spannung von 200 V. Für die Einbringung der Schmelzleistung werden drei Elektroden aus isostatisch gepresstem Graphit mit einem Durchmesser von 15 cm eingesetzt. Zur Kühlung des äußeren Stahlmantels, welcher im Ofeninnenraum mit feuerfesten Steinen aus Chrom-Magnesit zugestellt ist, dient ein geschlossener Kühlkreislauf mit luftgekühlten Radiatoren. Beschickt wird der ELBO durch eine Chargieröffnung im Ofendeckel bei feinstückigem Einsatzmaterial mit Hilfe eines Vibrationsförderers, im Fall von grobstückigem Gut wird das Material händisch chargiert. Das maximale Schmelzvolumen dieser Anlage beträgt 1,5 m<sup>3</sup>. Die Entleerung des Ofens erfolgt über einen Bodenabstich in eine unter der Gießschnauze platzierten Pfannenkaskade. Während des Schmelzprozesses wird Prozessgas abgesaugt und je nach Staubbelastung in einer Abgasreinigung wahlweise aus einem Aerozyklon und Gaswäscher oder Sackfilter und Gaswäscher gereinigt.

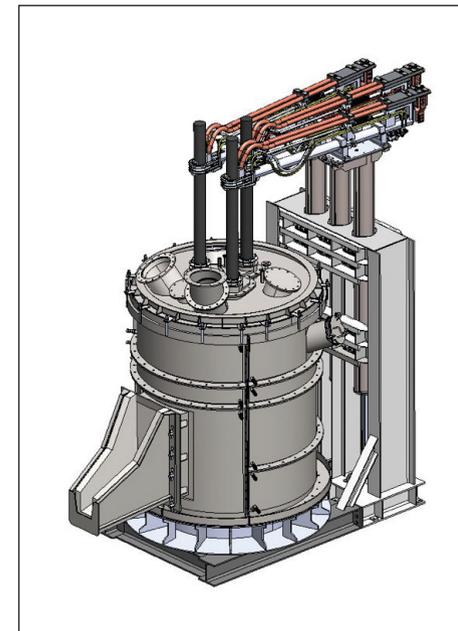


Bild 2: Schematische Darstellung des Pilot-ELBO

### 5.2. Parameter

Zu jeder der drei in Kapitel 4 beschriebenen Schlacken ist jeweils ein Versuch im Pilotmaßstab durchgeführt worden. Die Festlegung der Versuchsparameter orientiert sich an hier nicht näher ausgeführten Vorarbeiten in Form von thermochemischen Modellierungen im Zusammenhang mit experimentellen Untersuchungen im Labormaßstab. Letztere basieren zum Teil auf Literaturangaben, die in den oben beschriebenen theoretischen Grundlagen der Schlackenreduktion (Kapitel 2) zusammengefasst sind. So ist eine Versuchstemperatur von 1.300 – 1.350 °C, als Kompromiss aus Reaktionskinetik und vertretbarer thermischer sowie chemischer Belastung der feuerfesten Zustellung, gewählt worden. Hinzu kommt die verstärkte Neigung zur Verflüchtigung von Blei sofern die Temperatur der Schmelze 1.350 °C über-

schreitet, was dem Ziel einer Bleigewinnung in metallischer Form entgegenwirkt. Die Mengen der in den jeweiligen Versuchen eingesetzten Schlacken richten sich nach der Verfügbarkeit des Materials. Als Reduktionsmittel dient Braunkohlekoks mit einem fixen Kohlenstoffanteil von 87,5 Gew.-%, während der Hochofenkoks, der in der Zündmischung eingesetzt wird, 93,9 Gew.-% Kohlenstoff enthält. Bei der Parametrierung der Untersuchungen kann lediglich der chargierte Kohlenstoff für die Reduktionsreaktion berücksichtigt werden, obgleich drei Graphitelektroden mit der Schlacke in Kontakt stehen und daher ebenfalls zur Schlackenreduktion beitragen.

Die Schlacke S1 wird ohne die Zugabe eines Flussmittels reduziert. Die Zündmischung besteht aus 162,7 kg Schlacke und 28,9 kg Hochofenkoks. Im weiteren Verlauf werden 5.537,3 kg Schlacke sowie 133,1 kg Braunkohlekoks in einer Zeitspanne von 22 h 30 min chargiert. Damit beträgt die Kohlenstoffzugabe 2,52 % bezogen auf die Menge der eingesetzten Schlacke. Nach einer Haltezeit von einer Stunde erfolgt der Ofenabstich.

Im zweiten Versuch wird die Schlacke S2 unter Beimischung von gebranntem Weißfeinkalk im ELBO reduzierend geschmolzen. Die Zündmischung setzt sich aus 120,3 kg Schlacke und 20,0 kg Hochofenkoks zusammen. Weitere 3.906,2 kg Schlacke und 195,9 kg Braunkohlekoks mit zusätzlichen 184,5 kg Kalk, welches 94,6 Gew.-% Calciumoxidgehalt enthält, werden innerhalb von 20 h 30 min chargiert. Somit beträgt der Anteil des Kohlenstoffs 4,72 % und des Kalks 4,34 % in Bezug auf die Schlackenmenge. Die Entleerung des Ofens erfolgt nach einer zweistündigen Haltezeit.

Die Konditionierung der Schlacke S3 erfolgt unter der Zugabe von 99,6 Gew.-% reinem Natriumcarbonat als Flussmittel. Angefahren wird der Ofen mit einem Gemisch aus 186,2 kg Schlacke und 30,1 kg Hochofenkoks. Anschließend wird der ELBO mit 1.922,2 kg Schlacke sowie 67,1 kg Braunkohlekoks und 579,7 kg Natriumcarbonat in einem Zeitintervall von 19 h 30 min beschickt. Im Hinblick auf die thermische Zersetzung des Natriumcarbonats zu 339,0 kg Natriumoxid und 240,7 kg Kohlenstoffdioxid beträgt die berechnete Zugabe von Natriumoxid 16,08 % und von Braunkohlekoks 4,13 % bezogen auf die Masse der Schlacke. Die Haltezeit in diesem Versuch beträgt 30 min.

### 5.3. Versuchsdurchführung

Vor Versuchsbeginn wird der ELBO über einen Zeitraum von etwa drei Tagen unter Zuhilfenahme eines Erdgasbrenners mit sukzessiv steigender Leistung vorgeheizt, sodass die Temperatur der Ausmauerung mindestens 800 °C erreicht. Anschließend wird für den Beginn des Schmelzvorgangs eine Zündmischung bestehend aus Schlacke und Hochofenkoks zwischen die Graphitelektroden chargiert und ein elektrischer Kontakt zwischen diesen geschaffen. Zur Erreichung dieses Ziels ist die Zugabe einer hohen Koks menge, welche die für den Reduktionsprozess angestrebte Koks zugabe übersteigt, aufgrund des zu überbrückenden Abstands zwischen den Elektroden unumgänglich. Somit ist in der Anfahrphase des ELBOs eine unerwünschte Eisenoxidreduktion (s. Gleichung 3) möglich. Nachdem ein Schmelzbad, das die gesamte Grundfläche des Ofens bedeckt, vorliegt und die Höhe der schmelzflüssigen Schlacke im Ofen für die Durchführung einer Temperaturmessung ausreichend ist, erfolgt der Übergang in einen Ofenbetrieb mit gleichmäßiger Chargiergeschwindigkeit und einer der Schmelztemperatur angepassten Leistungsregelung. Hierbei wird die jeweilige Schlacke zusammen mit Braunkohlekoks als Reduktionsmittel sowie in der Untersuchung der Schlacken S2 und S3 mit dem entsprechenden Flussmittel chargiert. Regelmäßige Temperaturmessungen werden für die Einhaltung einer vorgesehenen Prozesstemperatur von 1.300 – 1.350 °C durchgeführt.

Während des gesamten Versuchs wird staubhaltiges Abgas aus dem Ofeninnenraum abgesaugt. Bei der Untersuchung der Schlacke S1 ist das Prozessgas in einem Aerozyklon und Gaswäscher gereinigt worden. Infolge einer unzureichenden Separation des Flugstaubs im Aerozyklon und einer daraus resultierenden starken Nassabscheidung des Staubs im Gaswäscher ist in den darauffolgenden Versuchen mit der Schlacke S2 und S3 das Abgas unter Verwendung eines Sackfilters und Gaswäschers gereinigt worden. Die Umstellung der Abgasreinigung zeigt eine positive Wirkung hinsichtlich einer ungewollten Staubbelastung des Gaswäschers.

Nach der Beschickung des Ofens beginnt die Haltezeit für die vollständige Umsetzung des Braunkohlekoks mit dem Ziel der Reduktion von in der Schlacke enthaltenen Schwermetalloxiden. Nachfolgend endet der Versuch mit dem Abstich des ELBOs in eine Pfannenkaskade wie in Bild 3 zu sehen.



Bild 3:

Abstich des ELBOs am Versuchsende (links) und nach Abstich mit Schlacke gefüllte Pfannenkaskade (rechts)

Im Rahmen der Versuchsnachbereitung werden die erstarrte Schlacke sowie der gewonnene Flugstaub und die Metallphase beprobt und in einer chemischen Analyse charakterisiert. Weiterhin werden die Mengen dieser drei Ausgangsströme in einer Massenbilanz aufgenommen. Dabei stellt sich die Erfassung der Metallphase als problematisch dar, weil bei der Begutachtung des Bodenbereichs des ELBOs eine Metallinfiltration der Ausmauerung und der Fugen zwischen den Feuerfeststeinen festzustellen ist. Außerdem ist bei der Untersuchung der Schlacke S1 eine genaue Masse des Flugstaubs nicht zu ermitteln, da wie bereits beschrieben ein Großteil des Staubs in Form einer Suspension im Gaswäscher abgeschieden worden ist.

### 5.4. Auswertung von Versuchsergebnissen

Aus den Mengen der erfassten reduzierten Schlacken, Flugstäube und Metallphasen sind Massenbilanzen erstellt worden. Diese basieren angesichts dargestellter Schwierigkeiten der Flugstaubabscheidung und Metallinfiltration der feuerfesten Ausmauerung auf einer vereinfachten Form. Dazu sind die Massen des Flugstaubs aus der Untersuchung der

Schlacke S1 sowie der Metallphasen aus experimentellen Arbeiten mit den Schlacken S2 und S3 aus der Differenz der Einsatzmenge und der ermittelten Massen der übrigen Stoffströme bestimmt worden. Bild 4 zeigt die erstellten Massenbilanzen.

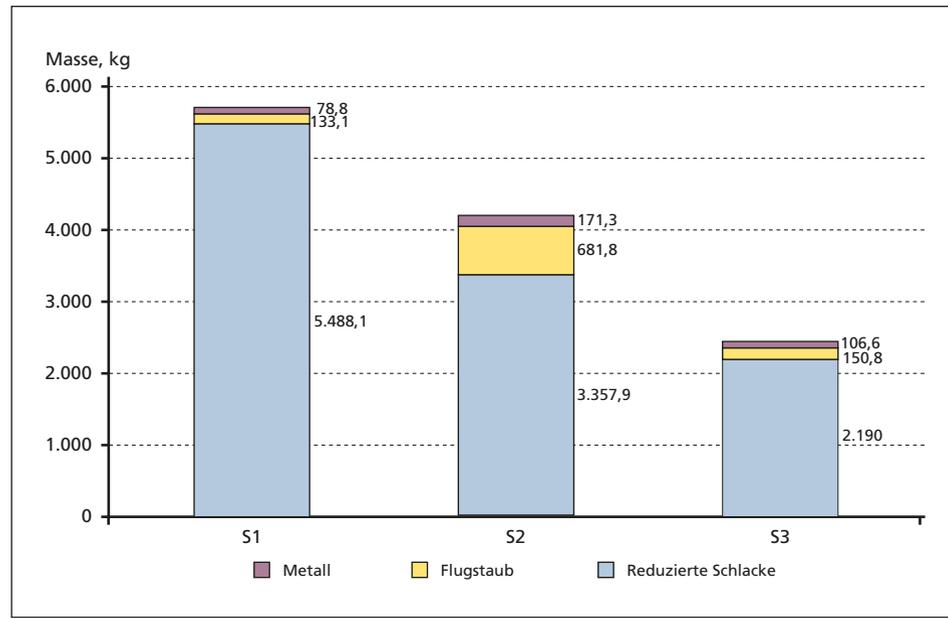


Bild 4: Massenbilanz aus Untersuchung der Schlacken S1, S2 und S3

Abhängig von der Verteilung der in den Schlacken S1, S2 und S3 reduzierten Verbindungen ergeben sich die Mengen des Flugstaubs und der Metallphase. Hierbei wird deutlich, dass die Masse von verdampften Verbindungen stets die Masse der Metallphase überschreitet. Dies weist auf das Vorhandensein einer großen Menge flüchtiger Elemente und Verbindungen bei der Prozesstemperatur hin und zeigt die Notwendigkeit einer leistungsfähigen Abgasreinigung zur pyrometallurgischen Behandlung der Schlacken. Gleichzeitig wird deutlich, dass das Volumen der Metallphase, begründet durch eine relativ hohe Dichte von Metallen, einen geringen Anteil ausmacht und nach dem Ofenabstich und der drauffolgenden Phasentrennung von der Schlacke als einzelner Stoffstrom schwer zu separieren ist.

Zur Bewertung der Schlackenreduktion werden Analysen der reduzierten Schlacken, Flugstäube und Metallphasen im Folgenden betrachtet. Analog der Bezeichnung der Schlacken S1, S2 und S3 werden die dazugehörigen reduzierten Schlacken als RS1, RS2 und RS3 sowie die die Flugstäube als FS1, FS2 und FS3 und die Metallphasen als M1, M2 und M3 aufgeführt. Die Tabelle 2 fasst die chemischen Zusammensetzungen der reduzierten Schlacken, welche nach denselben Methoden wie die ursprünglich eingesetzten Schlacken (Kapitel 4) charakterisiert worden sind, zusammen.

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung reduzierter Schlacken

Element/ Verbindung	RS1	RS2	RS3
	Gew.-%		
SiO <sub>2</sub>	23,97	29,89	39,41
CaO	17,83	18,27	2,30
MgO	3,13	2,18	1,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,27	3,94	4,30
Na <sub>2</sub> O	3,08	0,53	28,73
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< NWG	0,07	0,23
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< NWG	< NWG	< NWG
SnO <sub>2</sub>	0,25	0,21	0,65
Fe <sub>ges</sub>	28,49	27,70	10,46
Pb <sub>ges</sub>	0,18	0,21	0,36
Zn <sub>ges</sub>	0,53	1,53	0,52
Cu <sub>ges</sub>	0,34	0,02	0,40
C	0,02	0,01	0,06
S	0,51	0,05	1,83

In allen Versuchen ist eine signifikante Abnahme der Blei- und Zinkkonzentrationen erreicht worden, sodass die gesetzten Grenzwerte, ausgenommen des Bleigehalts in der Schlacke RS3, erzielt sind. In der reduzierten Schlacke RS1 sind mit 0,18 Gew.-% Blei und 0,53 Gew.-% Zink die insgesamt niedrigsten Schwermetallgehalte zu verzeichnen, was auf eine moderate Ausgangskonzentrationen dieser sowie eine ausreichende Menge zugegebenen Reduktionsmittels zurückzuführen ist. Dabei ist festzustellen, dass eine geringe Abnahme des in der ursprünglichen Schlacke S1 enthaltenen Eisengehalts erfolgt ist. Aufgrund des geringen Ausmaßes der Eisenoxidreduktion ist keine signifikante Ausbildung einer Eisenphase aufgetreten. Damit steht das Ergebnis dieses Versuchs in

Übereinstimmung mit der in Kapitel 2 erläuterten Prozessgrenze im Hinblick auf die erreichbare Zinkkonzentration von 2 Gew.-% bei gleichzeitiger Vermeidung einer Eisenoxidreduktion. Selbiges gilt für die Reduktion der Schlacke S2, welche die höchste Konzentration an Blei und Zink aufweist, und in einer hinreichenden Senkung der Schwermetallkonzentrationen resultiert. Hier liegt der Zinkgehalt mit 1,53 Gew.-% in der reduzierten Schlacke RS2 noch über dem kritischen Wert für das Einsetzen einer Eisenoxidreduktion. An der Stelle zeigt sich die positive Auswirkung der Zugabe des Flussmittels Kalk, das die Reduktion von Blei- und Zinkoxid fördert. Lediglich in der reduzierten Schlacke RS3 ist der Bleigehalt nicht unter 0,36 Gew.-% gesenkt worden. Dies lässt die Annahme zu, dass Blei zum Teil in sulfidischen oder sulfatischen Verbindungen vorliegt, wodurch eine carbothermische Reduktion verhindert wird. Die Zinkkonzentration, welche im Ausgangsmaterial mit 1,69 Gew.-% bereits relativ niedrig ist, kann dementsprechend nur geringfügig reduziert werden. An der Stelle sei zu beachten, dass für Komponenten der reduzierten Schlacken RS2 und RS3 eine verdünnende Wirkung zugegebener Flussmittel zu berücksichtigen ist.

Neben ausreduzierten Schlacken entstehen in den durchgeführten Untersuchungen Flugstäube, die hauptsächlich durch die Verdampfung von Blei und Zink geprägt sind. Die chemische Zusammensetzung der Flugstäube FS1, FS2 und FS3, die mittels RFA und Verbrennungsmethode bestimmt worden sind, ist in den nachstehenden Diagrammen abgebildet.

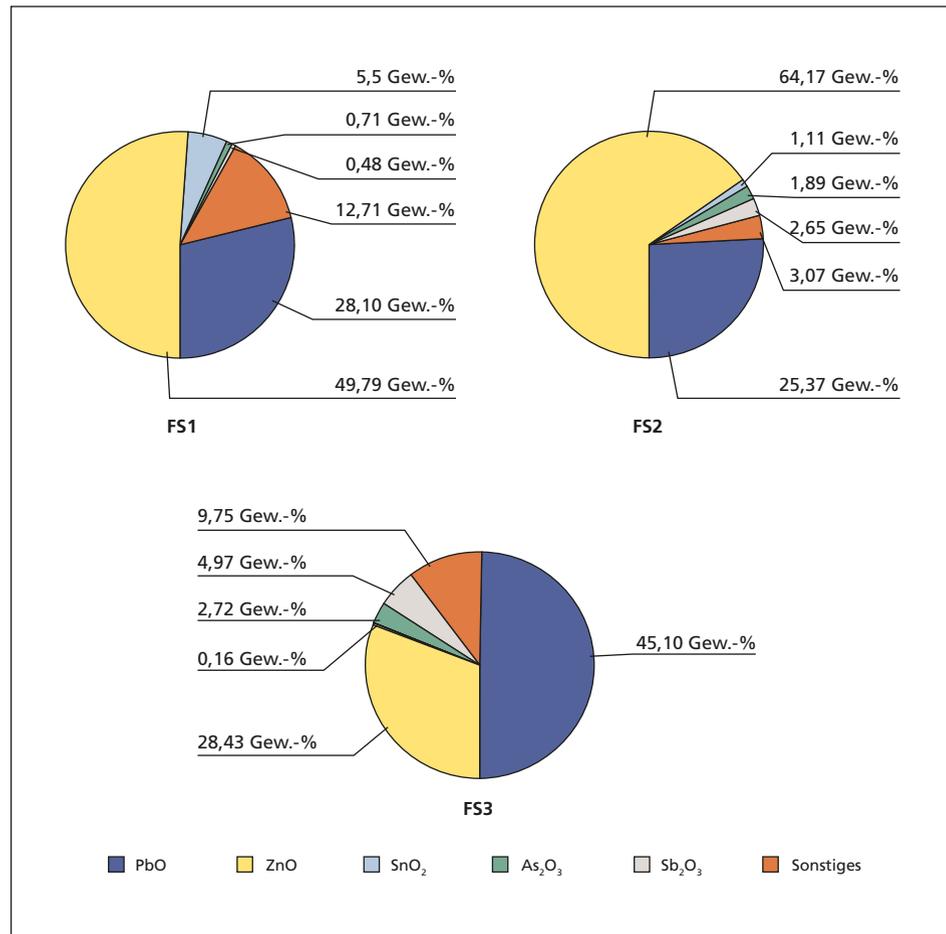


Bild 5: Chemische Zusammensetzung der Flugstäube FS1, FS2 und FS3

Abgesehen von flüchtigen Verbindungen sind in allen Flugstäuben unter Sonstiges während der Chargierung verstaubte Schlackenkomponenten, Flussmittel- sowie Koks-partikel vorzufinden. Der Flugstaub FS1 enthält mit 49,79 Gew.-% und 28,10 Gew.-% die zweithöchste Zink- und Bleioxidkonzentration; weiterhin den höchsten Anteil an Zinnoxid und sonstigen Verbindungen im Vergleich zu Flugstäuben der beiden anderen Versuche. Aus der Untersuchung der Schlacke S2 geht die höchste Zinkanreicherung im Flugstaub mit 64,17 Gew.-% hervor bei einer Bleioxidkonzentration von 25,37 Gew.-%. Folglich ist der Wert des Flugstaubs FS2 hinsichtlich des Zinkoxidgehalts am größten und das Produkt in der Form mit der Qualität eines Wälzoxids vergleichbar. Der Flugstaub FS3 hingegen hat mit 45,10 Gew.-% den höchsten Bleioxidanteil und mit 28,43 Gew.-% die niedrigste Zinkoxidkonzentration. Da dieser Flugstaub aus dem letzten Versuch im ELBO resultiert, ist der Einfluss einer Metallinfiltration der feuerfesten Ausmauerung aus vorangegangenen Untersuchungen bei dem relativ hohen Bleigehalt des Flugstaubs in Betracht zu ziehen.

Ein weiteres Produkt der Schlackenreduktion stellen die gewonnenen Metallphasen dar. Die zugrundeliegende Analyseverfahren der chemischen Zusammensetzung (Bild 6) ist eine RFA.

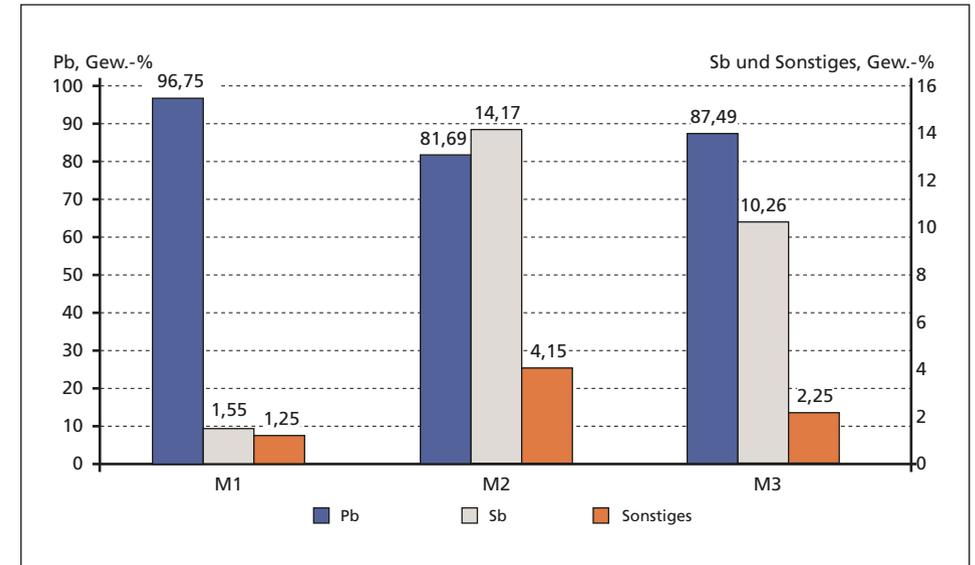


Bild 6: Chemische Zusammensetzung der Metallphasen M1, M2 und M3

Die Metallphasen enthalten in allen Untersuchungen vorwiegend Blei sowie Anteile von Antimon und sonstigen Elementen. Letzteres beinhaltet geringe Konzentrationen an Kupfer, Arsen, Zinn und Silber. Die Metallphase M1 weist mit 96,75 Gew.-% den höchsten Bleigehalt und mit 1,55 Gew.-% den niedrigsten Antimongehalt auf. Somit entspricht diese Metallphase etwa der Qualität von Rohblei und kann als Einsatzstoff in einer Bleiraffination verwendet werden. Das metallische Produkt M2 enthält im Gegensatz zu den übrigen Metallphasen mit 81,69 Gew.-% die geringste Bleikonzentration und mit 14,17 Gew.-% den höchsten Antimongehalt. Die Metallphase M3 enthält 87,49 Gew.-% Blei und 10,26 Gew.-% Antimon. Die Zusammensetzungen der Metallphasen M2 und M3 ähneln kommerziellen Hartbleilegierungen und können vor diesem Hintergrund zu deren Herstellung genutzt werden.

Für eine Beurteilung der Schlackenreduktion aus prozesstechnischer Sicht werden der Energieverbrauch und Elektrodenabbrand als Kennwerte herangezogen. Bei der Prozessierung der Schlacke S1 beträgt der Energieverbrauch 7.933 kWh und der Elektrodenabbrand 157,7 kg. Für die Reduktion einer Tonne Schlacke liegt der Energieverbrauch damit bei 1.392 kWh und der Elektrodenabbrand bei 27,7 kg. Für die pyrometallurgische Behandlung der Schlacke S2 liegt der Energieverbrauch bei 5.793 kWh und der Elektrodenabbrand bei 119,8 kg, was auf eine Tonne Einsatzmaterial gerechnet einem Einsatz von 1.376 kWh und 28,5 kg Elektrodenabbrand entspricht. Im letzten Versuch mit der Schlacke S3 sind 4.765 kWh elektrischer Energie und 91,1 kg Elektrodenmasse verbraucht worden. Daraus resultiert eine Aufwendung

von 1.773 kWh Energie und 33,9 kg der Graphitelektroden bezogen auf eine Tonne umgesetzter Schlacke mit Flussmittel. Bei einer Gegenüberstellung der beschriebenen Ergebnisse der Untersuchungen geht hervor, dass für die Reduktion der Schlacken S1 und S2 ein vergleichbarer Energieverbrauch und Elektrodenabbrand festzustellen ist. Eine signifikante Abweichung davon ist in der Untersuchung der Schlacke S3 erkennbar. Der Grund ist eine relativ lange Chargierdauer bezogen auf die Menge des Einsatzmaterials, da bei der Zugabe von Natriumcarbonat eine Zersetzung dessen in Natriumoxid und Kohlenstoffdioxid erfolgt. Um eine starke Schaumbildung infolge der Freisetzung von Kohlenstoffdioxid zu vermeiden ist die Beschickung des Ofens langsamer erfolgt.

Die durchgeführten Untersuchungen der Schlackenreduktion unter Verwendung verschiedener Prozessschlacken haben gezeigt, dass das gesetzte Ziel einer Abreicherung von Schwermetallen erfolgreich umgesetzt worden ist. Neben konditionierten Schlacken, die in Bezug auf eine mögliche Verwertung als Zuschlagstoff für Baustoffe mittels Eluatuntersuchung noch geprüft werden müssen, stellen die gewonnenen Flugstäube und Metallphasen die wichtigsten quantifizierten Produkte dar. Für diese besteht die Möglichkeit einer industriellen Verarbeitung mit dem primären Ziel der Gewinnung von Zink aus den Flugstäuben und Blei aus den Metallphasen, wobei die Extraktion weiterer Wertmetalle denkbar ist. Die erzielbare Qualität des Flugstaubs und der Metallphase richtet sich nach der Selektivität der Überführung von hauptsächlich Schwermetallen in diese Phasen. Diese wiederum ist vom Verhältnis der Schwermetalle in den reduzierten Schlacken abhängig, sodass aus der Schlacke S2 mit dem höchsten Zinkgehalt der zinkoxidreichste Flugstaub resultiert. Weiterhin bleibt für die Konditionierung der Schlacken festzuhalten, dass bezüglich einer hinreichenden Reduktion von Schwermetallen bei gleichzeitiger Vermeidung der Eisenoxidreduktion die notwendige Menge des Reduktionsmittels möglichst genau zu ermitteln ist. Faktoren wie der Abbrand des Kokes und der Einfluss der Graphitelektroden, welche während des Prozesses in der Schlackenschmelze eingetaucht sind und zur Reduktion beitragen, erschweren die exakte Bestimmung der benötigten Koks menge.

## 6. Zusammenfassung

Die Konditionierung von schwermetallhaltigen mineralischen Rückständen ist anhand drei verschiedener Prozessschlacken der Blei- und Kupferindustrie in einem Pilot-ELBO untersucht worden. Dabei steht eine maximale Ausbeute von in den Schlacken enthaltenen Wertmetallen, die durch eine carbothermische Reduktion in einen Flugstaub und eine Metallphase überführt werden, im Vordergrund. Zugleich wird eine an Schwermetallen abgereicherte Schlacke ausgetragen, wobei das besterzielte Resultat aller Untersuchungen eine Abnahme der Bleikonzentration auf 0,18 Gew.-% und der Zinkkonzentration auf 0,53 Gew.-% darstellt. Die bei der Schlackenreduktion generierten Flugstäube weisen eine hohe Anreicherung an Zinkoxid auf und sind mit einem maximal erreichten Zinkgehalt von 64,17 Gew.-% als ein absatzfähiges Produkt zu bewerten. Ebenso sind Metallphasen mit einem Bleianteil von bis zu 96,75 Gew.-% sowie Blei-Antimon-Legierungen, die eine dem Hartblei ähnliche Zusammensetzung

haben, erzeugt worden. Beide Arten der metallischen Erzeugnisse sind potentielle Zwischenprodukte, die in einer Bleiraffination verarbeitet werden können. Über die stoffliche Verwertung der untersuchten Schlacken hinaus werden für den Ofenbetrieb relevante Kenngrößen wie der Energieverbrauch und Elektrodenabbrand betrachtet. Unter Berücksichtigung aller Versuche ist für die Konditionierung einer Tonne Schlacke ein Energiebedarf von etwa 1.400 kWh sowie ein Abbrand von etwa 30 kg Elektrodenmasse ermittelt worden.

Angesichts eines in der Zukunft fortbestehenden Anfalls großer Mengen schwermetallhaltiger Schlacken, die unweigerlich einer Deponierung bedürfen, ist eine Abkehr von der gegenwärtigen und ökologisch nicht vertretbaren Handhabung dieser Abfallstoffe zu erwarten. Die in dem vorliegenden Beitrag beschriebenen Erkenntnisse, die sich auf Versuche in einem industrienahen Maßstab stützen, indizieren die Gewinnung von zur Weiterverarbeitung geeigneten Zwischenprodukten. Zur Gewährleistung eines technisch stabilen Schlackenreduktionsprozesses ist eine Mischung verschiedener Schlacken künftig in Erwägung zu ziehen, um bei Bedarf die Konzentration kritischer Elemente zu verdünnen bzw. den Gehalt an Wertmetallen stets in einem konstanten Bereich zu halten.

### Danksagung

Die in dem Beitrag vorgestellte Untersuchung ist mit finanzieller Unterstützung des EIT RawMaterials im Rahmen des geförderten Projekts SlagVal (Slag valorisation for multi metal recovery and mineral resource production) mit der Fördernummer 17181 entstanden; Website: <https://eitrawmaterials.eu/project/slagval/>

## 7. Literatur

- [1] ABAG-itm GmbH: Handbuch zum richtigen Umgang mit dem Europäischen Abfallverzeichnis 2001/118/EG, Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart/ Fellbach, 2003
- [2] Abdel-latif, M. A.: Fundamentals of zinc recovery from metallurgical wastes in the Enviroplas process, Minerals Processing, Band 15, Heft 11, 2002, S. 945-952
- [3] Böhlke, J.; Friedrich, B.; Hecker, E.: Treatment of Industrial Lead and Zinc Slags in a Pilot Scale SAF, World of Metallurgy – Erzmetall, Band 58, Heft 4, 2005, S. 210-217
- [4] Heinen, K.-H.: Elektrostahl-Erzeugung, 4. Auflage, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1997
- [5] International Lead and Zinc Study Group: Review of trends in 2020: Lead, Pressemitteilung, 2021
- [6] Kaiser, F.; Oetjen-Dehne, R.; Radermacher, J.: Marktsituation und Marktmechanismen bei Deponien – Übersicht über die Bundesländer, In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Band 7. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2020, S. 488-502
- [7] Kaußen, F.; Friedrich, B.: Reductive Smelting of Red Mud for Iron Recovery, Chemie Ingenieur Technik, Band 87, Heft 11, 2015, S. 1535-1542
- [8] Koch, K.; Janke, D.: Schlacken in der Metallurgie, In: Krajewski, W. and Krüger, J. (Hrsg.): Schlacken und Steinbildung bei der thermischen Blei- und Blei-Zink-Erzeugung, Verlag Stahleisen mbH, 1984, S. 147-160

- [9] Kriz, S.; Sisco, F. T.: Das Elektrostahlverfahren: Ofenbau, Elektrotechnik, Metallurgie und Wirtschaftliches, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1929
- [10] Ministerium des Inneren des Landes Nordrhein-Westfalen: Anforderungen an die Güteüberwachung und den Einsatz von Metallhüttenschlacken im Straßen- und Erdbau, Anlage 6, 2004
- [11] Mudd, G.: The sustainability of mining in Australia: Key production trends and their environmental implications for the future, Forschungsbericht, Monash University and Mineral Policy Institute, Department of Civil Engineering, 2009
- [12] Richards, G. G.: Kinetics of the zinc slag fuming process, Dissertation, University of British Columbia, Department of Metallurgical Engineering, 1983
- [13] Sinclair, R. J.: The extractive metallurgy of lead, Australasian Institute of Mining Metallurgy, Carlton South, 2009
- [14] Sommerfeld, M.; Friedmann, D.; Kuhn, T.; Friedrich, B.: *Zero-Waste: A Sustainable Approach on Pyrometallurgical Processing of Manganese Nodule Slags*, Minerals, Band 8, Heft 12, 2018, S. 544-557
- [15] Vignes, A.: Extractive Metallurgy 3: Processing Operations and Routes, Kapitel 5: Smelting Reduction Operations, Wiley-VCH, 2013, S. 125-150

### Ansprechpartner



**Jürgen Maier, M.Sc.**  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen  
IME – Institut für Metallurgische Prozesstechnik  
und Metallrecycling  
Intzestraße 3  
52072 Aachen, Deutschland  
+49 24180 95861  
jmaier@ime-aachen.de



**Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. Bernd Friedrich**  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen  
Institutsleiter  
IME – Institut für Metallurgische Prozesstechnik  
und Metallrecycling  
Intzestraße 3  
52072 Aachen, Deutschland  
+49 24180 95850  
bfriedrich@ime-aachen.de