

Metallurgische Verwertbarkeit aufbereiteter NE-Metallkonzentrate aus MV-Rostaschen

Kilian Gisbertz, Bernd Friedrich, Stefan Heinrichs, David Rößmann, Thomas Pretz, Christian Knepperger

Der Einsatz von NE-Metallfraktionen aus Müllverbrennungsrosta-schen (MV-Rostaschen) in der Metallurgie ist neben unerwünschten metallischen Begleitelementen insbesondere aufgrund mineralischer Verunreinigungen limitiert. Im vorgestellten VeMRec-Projekt werden durch eine mechanische Konditionierung mittels selektiver Zerkleinerung und anschließender Siebklassierung diese mineralischen Verunreinigungen abgeschlagen und entfernt. Eine sensorgestützte Sortiereinheit basierend auf dem Prinzip der Röntgentransmission erzeugt aus den NE-Metallkonzentraten der MV-Rostasche eine Leicht- und eine Schwergutfraktion. Im vorliegenden Bericht wird der Einfluss der mechanischen Konditionierung auf die

metallurgische Verwertbarkeit der Leicht- sowie Schwergutfraktion vorgestellt. Das Leichtgut wird in einer Salzbad-schmelze mit Zentrifuge, das Schwergut in einem Kaltwand-Induktionsofen unter Entfernung des metallischen Zinkanteils (durch Vakuumdestillation) geschmolzen. Die erhaltenen Metallreguli werden analysiert und hinsichtlich der Verwertbarkeit der zur Verfügung gestellten Leichtgut- und Schwergutfractionen bewertet.

Schlüsselwörter:

Nichteisenmetalle – Müllverbrennungsrosta-schen – Selektive Zerkleinerung – Leichtmetallrecycling – Schwermetallrecycling

Metallurgical Utilisation of Conditioned Non-ferrous Metal Concentrates Recovered from Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Bottom Ash

The metallurgical utilisation of non-ferrous metal fractions separated from incineration bottom ash is limited due to unwanted metallic and particularly mineral impurities. Within the “VeMRec”-project mineral impurities are crushed and removed by mechanical conditioning, which consists of selective impact milling followed by a screening process. The subsequent sensor-based sorting system applies X-ray transmission to generate a light and heavy metal fraction from non-ferrous metal fractions recovered from incineration bottom ash. The presented paper investigates the influence of the mechanical conditioning on the metallurgical utilisation of the light and heavy metal frac-

tion. In a lab-scale evaluation the light metal fraction is refined in a salt bath centrifuge. The heavy fraction is molten in an induction furnace, in which the metallic zinc content is removed by vacuum distillation. The obtained metal ingots are chemically analysed and evaluated regarding the metallurgical utilisation of provided sorting fractions from MSWI bottom ash.

Keywords:

Non-ferrous metals – Bottom ash – Selective comminution – Light metal recycling – Heavy metal recycling

Exploitabilité métallurgique de concentrés de métaux non-ferreux conditionnés récupérés de cendres résiduelles des incinérateurs de déchets

Reciclabilidad metalúrgica de concentrados de metales no ferrosos procesados recuperados de cenizas de fondo de incineradores de desechos

Dieser Artikel wurde peer-reviewed.

1 Einleitung

Bei der thermischen Behandlung von Abfällen in Müllverbrennungsanlagen (MVA) fielen 2009 rund 4,76 Mio. t/a Müllverbrennungsrosta-schen (MV-Rostaschen) als feste Rückstände an [1]. MV-Rostaschen bestehen, je nach MVA-Inputzusammensetzung, zu etwa 85 bis 90 Gew.-% aus einer mineralischen Fraktion („Mineralik“), wie z.B. Glas, Keramik, Steinen oder anderen inerten Stoffen. Etwa

1 bis 5 Gew.-% setzen sich aus unverbrannten Rückständen („Unverbranntes“) zusammen, zumeist Holz, Kunststoff oder Papier. Rund 7 bis 10 Gew.-% sind Metalle, die sich weiter in Eisenmetalle (Fe-Metalle) sowie Nichteisenmetalle (NE-Metalle) unterteilen lassen. Fe-Metalle sind mit einem Anteil von 4 bis 9 Gew.-%, NE-Metalle mit 1 bis 3 Gew.-% in MV-Rostaschen enthalten.

Die Separation von NE-Metallen aus MV-Rostaschen wird in der MV-Rostaschenaufbereitung mittels Wirbelstrom-

scheidern (WSS) durchgeführt. Besonders in Kornfraktionen <10 mm besteht ein großes und häufig ungenutztes Potential zur Rückgewinnung von NE-Metallen, da hier i.d.R. keine WSS zur Separation von NE-Metallen vorhanden sind [2]. Nach GILLNER [3] ergibt sich in Deutschland ein Potential von NE-Metallkonzentrat in Höhe von rund 85 100 t/a. Aufgrund von Verunreinigungen und technisch begrenzten Trenngraden lassen sich hiervon aber nur 57 400 t/a NE-Metalle mobilisieren. Aktuell werden in Deutschland ca. 32 200 t/a NE-Metallkonzentrate mit einem NE-Metallgehalt von ca. 21 800 t/a zurückgewonnen. Ein Hauptgrund für diese große Differenz zwischen Potential und IST-Zustand liegt in der unzureichenden technischen Ausstattung der MV-Rostaschenaufbereitungsanlagen (RAA). Häufig soll eine hohe Reinheit der NE-Metallkonzentrate erreicht werden, wodurch zwangsläufig das Wertstoffausbringen sinkt.

Das Projekt „Verlustminimiertes Metallrecycling aus Müllverbrennungsaschen durch sensorgestützte Sortierung – VeMRec“ gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des FONA-R3 Programms befasst sich mit der optimierten Rückgewinnung von NE-Metallen aus MV-Rostaschen. Die wesentlichen Projektziele sind die Optimierung einer bestehenden Rostaschenaufbereitungsanlage und die Erweiterung der trockenmechanischen Aufbereitung um eine sensorgestützte Sortierung, mit Fokus auf einer zielmetallgerechteren metallurgischen Verwertbarkeit der Sortierprodukte. Dieser Beitrag untersucht dabei den Einfluss der mechanischen Aufbereitung im Hinblick auf eine Andienung der Vorstoffe an metallurgische Prozesse. Hierzu wird zunächst der VeMRec-Ansatz zur mechanischen Aufbereitung vorgestellt und im Anschluss auf die weitere metallurgische Einsatzbarkeit der erzeugten Vorstoffe eingegangen.

2 Optimierte NE-Metallrückgewinnung aus MV-Rostaschen

Im VeMRec-Projekt wird eine Erhöhung des Wertstoffausbringens von NE-Metallen aus MV-Rostaschen durch Optimierung einer vorhandenen RAA angestrebt. Hierfür werden in der bestehenden RAA Wirbelstromscheider (WSS) zur Separation von NE-Metallkonzentraten in Kornbereichen oberhalb und unterhalb von 10 mm eingesetzt. Um den Verlust an NE-Metallen zu minimieren, werden die Wirbelstromscheider in der bestehenden Anlage mit eng gestuften Körnungsbändern beschickt und die Parametrierung so gewählt, dass möglichst wenig des Zielstoffs NE-Metall in einer sogenannten „Restfraktion“ verloren geht. Diese Vorgehensweise verbessert zwar das Wertstoffausbringen, führt jedoch unausweichlich zu einem Fehlaustrag von Nichtmetallen in die Produktfraktion und somit zu einer Verringerung der Reinheit der NE-Metallkonzentrate. Aufgrund der hohen Störstoffgehalte, insbesondere mineralischer Verunreinigungen, von bis zu 40 Gew.-% in der Grobfraktion >10 mm ist eine weitere Anreicherung vor einer metallurgischen Verwertung sinnvoll.

Die separierten NE-Metallkonzentrate der Korngröße 3 bis 40 mm aus der optimierten RAA werden in einer Pilotanlage, die im Rahmen des VeMRec-Projekts errichtet

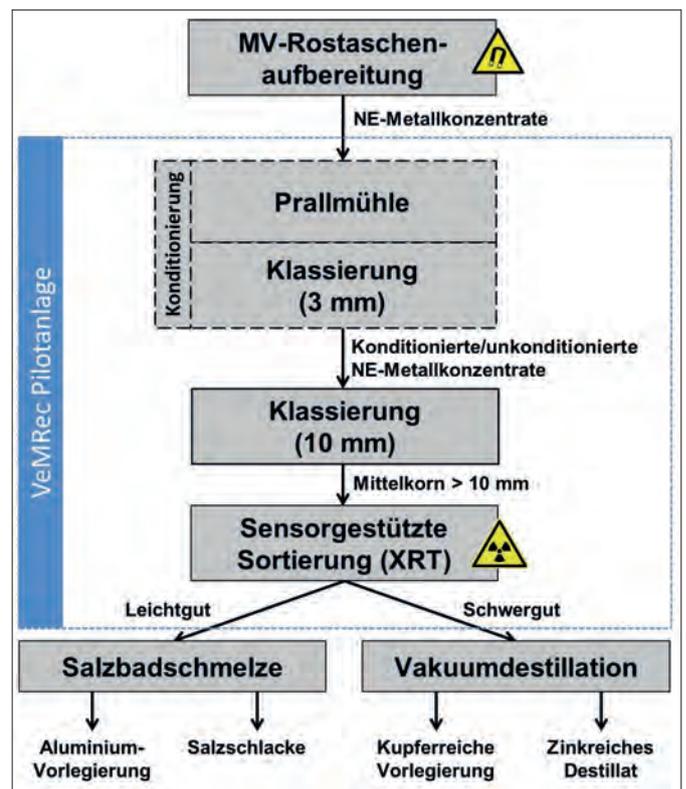


Abb. 1: Fließbild der Aufbereitung der NE-Metallkonzentrate aus MV-Rostasche und deren schmelzmetallurgische Bewertung

wurde, weiter mechanisch aufbereitet. Die Ziele hierbei sind zum einen die Erhöhung der Reinheit der NE-Metallkonzentrate und zum anderen die Separation des NE-Metallkonzentrats in eine NE-Leicht- und eine NE-Schwergutfraktion. An die NE-Leichtgutfraktion sind hohe qualitative Anforderungen gestellt, da diese eine verwertbare Aluminiumlegierung ermöglichen muss. Da eine metallurgische Raffination bei einigen Begleitelementen wie Eisen und Kupfer nicht möglich ist, muss in der Aufbereitung der Fokus auf einer hohen Reinheit der Leichtgutfraktion liegen.

In Abbildung 1 ist der Weg der NE-Metalle innerhalb des Forschungsvorhabens in einem Fließbild verdeutlicht. Die Pilotanlage besteht neben Klassier- und Fördertechnik im Wesentlichen aus einer selektiven Zerkleinerungsstufe und einer sensorgestützten Sortiereinheit, die nach dem Prinzip der Röntgentransmission (XRT) arbeitet. Vor einer Feinkornsartierung <10 mm wird in der Pilotanlage zunächst NE-Metallkonzentrat der Korngröße 10 bis 40 mm aufbereitet. Dieses lässt sich als Metallmischfraktion beschreiben, die sich in etwa zu 70 % aus Leichtmetallen und zu 30 % aus Schwermetallen zusammensetzt. In der Mischung enthaltene Störstoffe sind überwiegend mineralische und teilweise unverbrannte Partikel. Nachdem das erzeugte Leicht- und Schwergut mit der Pilotanlage die mechanische Aufbereitung verlassen hat, schließt sich deren schmelzmetallurgische Bewertung an, die in Kapitel 3 detailliert erläutert wird.

2.1 Mechanische Konditionierung der NE-Metallkonzentrate

Metallhaltige Partikel aus MV-Rostasche weisen aufgrund des Verbrennungsprozesses charakteristische Eigenschaften

ten bezüglich Korngrößen und Kornformen auf. In einer Müllverbrennungsanlage laufen Verbrennungsprozesse bei Temperaturen von 850 bis 1300 °C ab [4]. Auf dem Rost kommt es somit lokal zu großen Temperaturschwankungen. Organische Verbindungen werden weitgehend zerstört, was gesetzlich vorgeschrieben ist [5]. Mineralisierte Organik bildet häufig Konglomerate mit niedrig schmelzenden Metallen wie Aluminium, Zinn und Zink, die teilweise oberflächlich anschmelzen. Aluminium erscheint zu meist in Form von kompakten, tropfenförmigen Stücken, deren stabile hochschmelzende Oxidhaut eine Koagulation verhindert, aber auch vor weiterer Oxidation schützt.

Der Austrag der Rostaschen aus MVA erfolgt in Deutschland aktuell noch in allen Anlagen mittels Nassentschlacker. In der Schweiz sind bereits Trockenentascher im Einsatz, die eine Qualitätsveränderung der trocken gegenüber der nass ausgetragenen MV-Rostasche erkennen lassen [6]. Für das VeMRec-Projekt sind aktuell jedoch nur die nass ausgetragenen MV-Rostaschen relevant. Nach dem nassen Austrag liegt kein inertes Produkt vor, sondern ein Material, das komplexen Wechselwirkungen mit der Umgebungsatmosphäre und weiteren inneren chemischen und mineralogischen Umwandlungen unterliegt. Aus diesem Grund ist in Deutschland eine dreimonatige Alterung vorgeschrieben [7]. In dieser Zeit verändert sich die MV-Rostasche weiter und bildet aufgrund von Hydrat- und Karbonatbildungsreaktionen stabile Anhaftungen auf den Metallpartikeln.

Die in dem NE-Metallkonzentrat vorkommenden Störstoffe sind größtenteils mineralische Anhaftungen und mineralische Einzelpartikel. Aufgrund der verschiedenen Zerkleinerungscharakteristiken der in der Mischung vorhandenen Materialien kann durch eine selektive Zerkleinerung eine Reinigung des NE-Metallkonzentrates erreicht werden, indem spröde mineralische Bestandteile zerkleinert werden, duktile Partikel jedoch nicht. Mit einer anschließenden Klassierung des zerkleinerten Materials kann die in den feinen Kornbereich überführte Mineralik von den metallhaltigen Partikeln separiert werden. Ein geeignetes Zerkleinerungsaggregat für diese Aufgabe stellt die Prallmühle bzw. der Prallbrecher dar. Eine schematische Darstellung einer Prallmühle zeigt Abbildung 2. In einer Prallmühle wird das Aufgabegut von den schnell rotierenden Schlagleisten erfasst und in Richtung der Prallplatten beschleunigt. Bei dem Kontakt des beschleunigten Materials mit den federnd gelagerten Prallplatten kommt

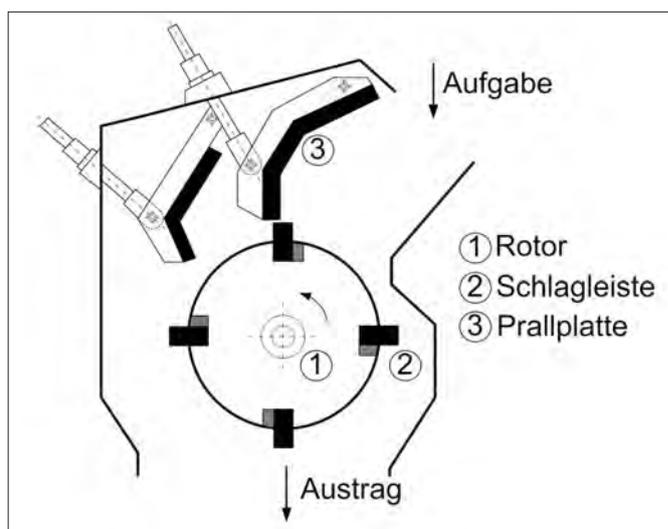


Abb. 2: Schema einer Prallmühle nach [4]

es zur Prallbeanspruchung. Zwar erfährt das Aufgabegut bei Kontakt mit den Schlagleisten auch eine Schlagbeanspruchung, jedoch überwiegt die Prallbeanspruchung.

Wie in Abbildung 3 zu erkennen ist, lässt sich durch die Prallzerkleinerung ein guter Aufschluss der Konglomerate erzielen. Zur Demonstration wurden einzelne Handstücke (links) in einer Prallmühle beansprucht und die zerkleinerte Mineralik entfernt. Die übrig gebliebenen Partikel (rechts) verdeutlichen die Selektivität dieses Zerkleinerungsvorgangs.

Die im Vorfeld der Prallmühlenversuche durchgeführten Technikumsversuche mit einer Hammermühle zeigten im Vergleich zur Prallmühle für das vorliegende Material eine schlechtere Selektivität im Zerkleinerungsergebnis. Durch die überwiegend schlagende Beanspruchung des Materials im Zerkleinerungsraum und die Limitierung der oberen Korngröße mittels Austragsrost kommt es in der Hammermühle zu einer höheren mechanischen Beanspruchung und somit zu einer Herabsetzung der oberen Korngröße aller Partikel. Verbunde werden zwar sehr gut aufgeschlossen, allerdings führt der Transfer der Metalle in das Feinkorn zu einer schlechteren Sortierbarkeit.

Zur weiteren Auswahl des geeigneten Zerkleinerungsaggregates und der geeigneten Einstellungen wurden im Technikumsmaßstab Zerkleinerungsversuche mit einer Prallmühle mit zwei verschiedenen Parametrierungen mit

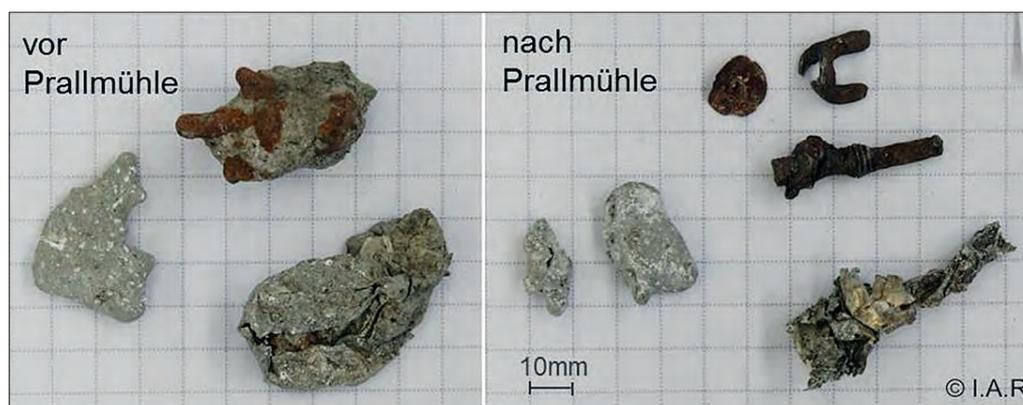


Abb. 3: Handstücke aus Metallkonzentrat vor/nach Prallmühle

jeweils 10 Einzelproben à 3 kg durchgeführt. Für den Versuch PM -1- wurde die Prallmühle auf eine Drehzahl von 1000 U/min eingestellt, was bei einem Schlagkreisradius von 230 mm einer Umfangsgeschwindigkeit von 24 m/s entspricht. Beim Versuch mit der Bezeichnung PM -2- wurde die Drehzahl auf 1500 U/min erhöht, entsprechend einer Umfangsgeschwindigkeit von 36 m/s.

Zur Bewertung des Zerkleinerungsergebnisses wurde das Material einer Siebung mit den Trennschnitten 16/ 6,3/ 2/ 1 und 0,63 mm unterzogen. Die hierbei entstandenen engen Körnungsbänder wurden anschließend separat mit einem Wirbelstromscheider nachsortiert. Der Wirbelstromscheider wurde bei diesen Versuchen im Labormaßstab mit – hinsichtlich NE-Produktausbringen und -reinheit optimalen – Einstellungen sowie geringem Durchsatz betrieben. Die Fraktion <0,63 mm wurde nicht weiter analysiert. Es ist davon auszugehen, dass der Metallgehalt in dieser Fraktion äußerst gering ist und eine mechanische Separation der Metallpulver aus dieser Korngröße mittels WWS schwierig ist. In Abbildung 4 sind die Sortierergebnisse des Wirbelstromscheiders sowie die Korngrößenverteilungen der Zerkleinerungsprodukte und des Inputs der Zerkleinerungsstufe dargestellt. Es kann eine deutliche Anreicherung mineralischer Partikel im Feingut <2 mm festgestellt werden, welche in Abbildung 4 dem als „Rest“ bezeichneten Mengenanteil entsprechen. Die NE-Metallprodukte des WSS in den Kornklassen >2 mm sind nach optischen Kriterien als nahezu frei von Mineralik zu bewerten, während in den NE-Metallprodukten der Korngrößen <2 mm noch Anteile mineralischer Bestandteile auszumachen sind. In den gröberen Fraktionen hat die Zerkleinerung der mineralischen Anteile demnach besser funktioniert als in den feinen. Die Kornklasse 2 mm bis 6,3 mm stellt einen Übergangsbereich dar, in dem sich zerkleinerte Mineralik aus den oberen Korngrößen akkumuliert. Weiterhin zeigt sich, dass sich bei höherer Drehzahl ein größerer Anteil Metallprodukt in den mittleren Korngrößen austragen

lässt. Hieraus ergibt sich ein Zusammenhang aus steigender Prallbeanspruchung bei gleichzeitiger Erhöhung des auszubringenden Metallproduktes.

Aus den Zerkleinerungsversuchen lässt sich die Prallmühle als geeignetes Zerkleinerungsverfahren für die Aufgabenstellung des VeMRec-Projekts identifizieren. Auf dieser Basis wurde die VeMRec-Pilotanlage entsprechend ausgerüstet und mit einem anschließenden Spannwellensieb versehen. Dieses ermöglicht eine scharfe Siebung und die Abtrennung des Feinkornes <3 mm aus dem geprallten NE-Metallkonzentrat. Im Anschluss wird das Überkorn bei einem weiteren Siebschnitt bei 10 mm aufgeteilt, um das Körnungsbänder der Aufgabe des anschließenden Sortierers auf 10 bis 40 mm einzuzugrenzen.

2.2 Trockenmechanische Dichtesortierung der NE-Metallkonzentrate

In der VeMRec-Pilotanlage wird zur Dichtesortierung des 10 bis 40 mm NE-Metallkonzentrats in ein Leichtgut- bzw. Schwergutprodukt ein sensorgestützter Bandsortierer eingesetzt, der nach dem Röntgentransmissionsprinzip (XRT) arbeitet. Wie in Abbildung 5 dargestellt, wird das NE-Metallkonzentrat durch eine Vibrationsrinne vereinzelt und über die gesamte Breite des Beschleunigungsbandes dem XRT-Sortierer zugeführt. Eine Vereinzlung der Partikel auf dem Band ist für die folgende Detektionseinheit des XRT-Sortierers notwendig, da bei einer Überlappung von mehreren Partikeln keine eindeutige Zuordnung der Partikel in eine Produktfraktion erfolgen kann. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass für einen exakten Austrag mittels Druckluftstoß ein gewisser Mindestabstand der Partikel auf dem Band zueinander eingehalten werden muss.

Die Detektionseinheit des XRT-Sortierers wertet die Absorption der emittierten Röntgenstrahlung von den einzelnen NE-Metallpartikeln bei zwei unterschiedlichen Energieniveaus (Dual-Energy) aus. Durch das Dual-Ener-

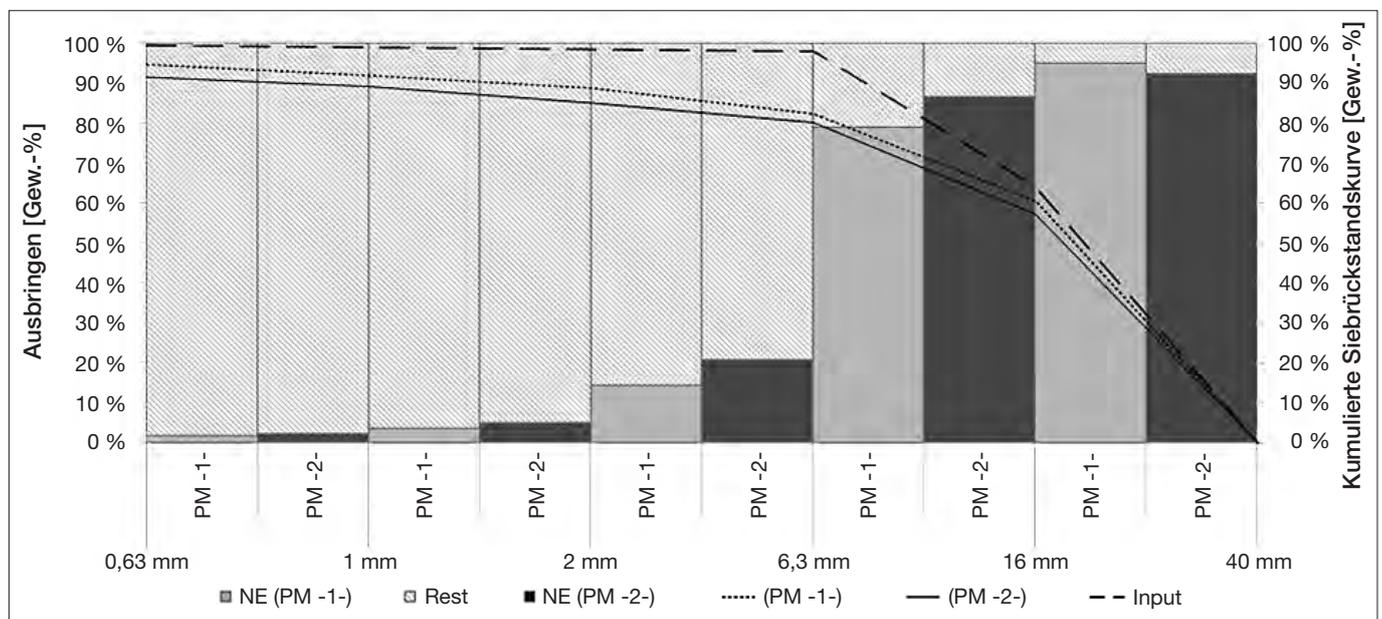


Abb. 4: Korngrößenverteilung und WSS-Produktausbringen nach Zerkleinerung

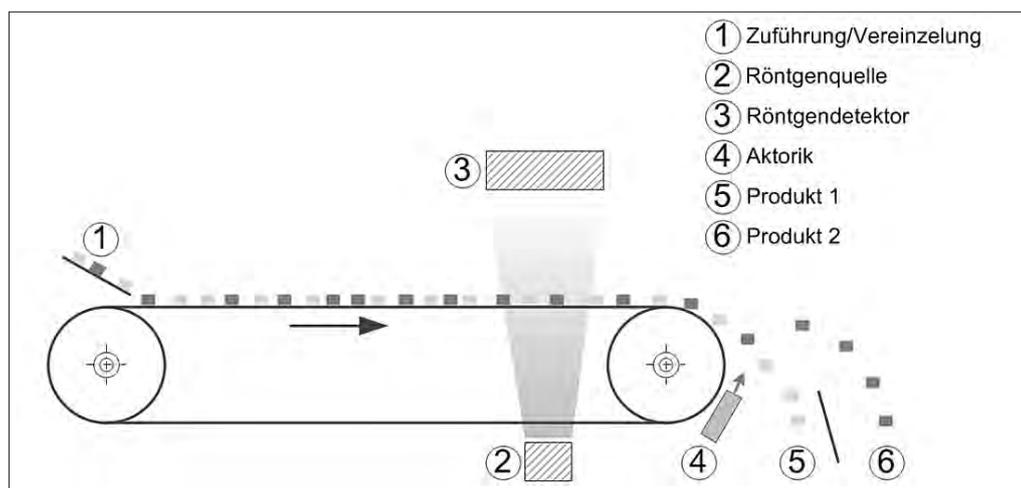


Abb. 5: Aufbau eines sensorgestützten Bandsortierers mit XRT-Einheit

gy-Verfahren kann der Einfluss von unterschiedlicher Materialdicke von NE-Metallpartikeln ausgeglichen und somit die materialspezifische Absorption bestimmt werden. Am Ende des Bandes erfolgt durch einen pneumatischen Austrag die Trennung der NE-Metallpartikel in eine Leichtgutfraktion (Produkt 1) und eine Schwergutfraktion (Produkt 2).

Durch die Anhaftung von mineralischen/inerten Komponenten an NE-Metallpartikeln kann das Sortierverhalten der XRT-Sortiereinheit beeinflusst werden. So kann beispielsweise ein kleines, spezifisch schweres NE-Metallpartikel, das mit einer dicken, spezifisch leichteren Mineralischicht umgeben ist, nicht eindeutig der Schwergutfraktion zugeordnet werden. Durch die Vorkonditionierung mittels Prallmühle können mineralische Anhaftungen gelöst werden und NE-Metallpartikel eindeutig einer der beiden Produktfraktionen zugeordnet werden. Als ein Beispiel für Verbunde, die nicht aufgeschlossen werden können, ist ein Aluminiumprofil mit einer Schraube zu nennen. Da die XRT-Sortierung in dem vorliegenden Fall mit dem Ziel betrieben wird, eine möglichst saubere Aluminiumfraktion zu erzeugen, darf ein solcher Verbund nicht in das Leichtgut gelangen. Dies wird mit Hilfe eines Schwellwerts auf Objektbasis für die Sortierparametrierung erreicht.

3 Metallurgische Verwertbarkeit erzeugter NE-Metallkonzentrate aus MV-Rostasche

Um die Effizienz der mechanischen Vorbehandlung festzustellen, werden insgesamt 10 t NE-Metallkonzentrat aus der MV-Rostaschenaufbereitung in der Pilotanlage verarbeitet. Bei einem Durchsatz von ca. 5 t/h wird die Sortieranlage in der ersten Stunde mit der Prallmühle und dem dazugehörigen Spannwellensieb verschaltet, in der zweiten Stunde wird die mechanische Konditionierung aus dem Betrieb genommen. Der Begriff „Konditionierung“ bezieht sich im Folgenden ausschließlich auf die Behandlung des NE-Metallkonzentrats mittels Prallmühle und Spannwellensieb in der VeMRec-Pilotanlage. Der Unterschied zwischen den Betriebsweisen mit und ohne Konditionierung wird bei etwa gleicher Betriebsdauer bereits in den Produktionsmengen – insbesondere des Leichtguts – bemerkbar. So werden 2,2 t (≈72 % des Gesamtguts) konditioniertes Leicht-

gut und 0,86 t (≈28 %) konditioniertes Schwergut erzeugt, während 2,92 t (≈77 %) unkonditioniertes Leichtgut und 0,88 t (≈23 %) unkonditioniertes Schwergut anfallen.

Die Probenahme erfolgt beim Leichtgut direkt vom Abwurfband variabel in Abständen von 10 min. Beim Schwergut kann aufgrund der geschlossenen Auswurf- und Auf-fangeinheit des XRT-Sortierers die Probenahme erst nach Entnahme des Auffangcontainers am Haufwerk erfolgen. Hierfür wird der Auffangcontainer gestürzt, das Haufwerk mittels Radlader gleichmäßig ausgebreitet und mit einem Farbmarker unterteilt, so dass fünf etwa gleich große Proben an festgelegten Stellen entnommen werden. Diese werden durch die Methode des Kegeln und Vierteln weiter geteilt, um entsprechend der obersten Korngröße Schmelzproben von etwa 2,4 kg (nach DIN 51701-2: $Q_{\min} = d_{\max} \cdot 0,06$ mit $d_{\max} = 40$ mm) zu erhalten.

Im Falle des Leichtguts wird eine Salzbadtrennschmelze als schmelzmetallurgische Bewertungsmethode eingesetzt (s. Abbildung 1), da dieser Raffinationsprozess geeignet ist, die im Leichtgut enthaltenen nichtmetallischen Bestandteile zu entfernen. Dieser nichtmetallische Anteil setzt sich hauptsächlich aus der anhaftenden und teilweise stückig vorliegenden Mineralik sowie den für Aluminiumschrotte typischen Oxidhäuten zusammen. Das bei der Salzbadtrennschmelze verwendete Schmelzsalz nimmt diese oxidischen Verunreinigungen auf, so dass die anfallende Salzschlacke den nichtmetallischen Anteil des aus MV-Rostaschen hergestellten Leichtguts beinhaltet.

Für das Schwergut kommt eine Vakuumdestillation als erstes metallurgisches Bewertungskriterium in Frage (s. Abbildung 1), da die in der Müllverbrennungssache vorhandenen Anteile an Messing- und Zinkdruckgussteilen zu einem erheblichen Zinkgehalt führen, für den eine metallische Rückgewinnung sinnvoll erscheint. Als Hauptprodukt dieser Vakuumdestillationsschmelze wird eine kupferreiche Vorlegierung erhalten, welche aufgrund ihres hohen Grads an Begleitelementen für eine verbesserte Vermarktbarkeit gegebenenfalls weiterbehandelt werden sollte.

Nachfolgend werden Vorgehensweise und Ergebnisse der labortechnischen Bewertung der metallurgischen Verwertbarkeit von NE-Metallkonzentraten aus MV-Rostasche in Abhängigkeit der mechanischen Vorbehandlung vorgestellt.

3.1 Metallurgische Bewertung des Leichtgut-Mittelkorns

Für die Salzbadschmelze wird ein eigener Versuchsaufbau entwickelt, der durch Zentrifugation nahezu vollständige Trenngrade zwischen Metall- und Schlackenphase ermöglichen soll. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6 exemplarisch dargestellt und für alle Leichtgut-Konzentrate identisch, um eindeutige Rückschlüsse auf den Einfluss der Vorbehandlung treffen zu können. Die Laborversuche werden in einem widerstandsbeheizten Ofen mit einem Schmelztiegel aus Tongraphit durchgeführt. Die Zentrifugenvorrichtung besteht aus einem mobilen Rührergestell aus geschweißten Stahl- und Aluprofilen, welches pneumatisch höhenverstellbar ist und den an einer Hohlwelle befestigten Zentrifugenkorb aus Graphit elektrisch antreibt. Alle Proben werden zur Vermeidung des Einbringens von Feuchtigkeit in das Schmelzbad zuvor bei 105 °C für 24 h getrocknet. Es werden jeweils drei Schmelzen von konditionierten bzw. unkonditionierten Leichtgut-Proben mit einer Menge von ca. 2,4 kg unter gleichen Versuchsbedingungen durchgeführt.

Damit der Aluminiumschrott in einem Salzbad zentrifugiert werden kann, muss eine ausreichende Badhöhe eingestellt werden. Hierzu wird mit einem Einsatz von 3,5 kg rezykliertem Schmelzsatz sowohl im Verhältnis zum Einsatzgewicht an Leichtgut (ca. 2,4 kg) als auch zu dessen Anteil an nichtmetallischen Komponenten ein deutlicher Salzüberschuss ($\equiv V_{\text{Salzschmelze}}/V_{\text{Alu-Schmelze}} \approx 1,5$) eingestellt. Bei der Wahl des Schmelzsalzes wird auf die Ergebnisse einer ersten Versuchsreihe zurückgegriffen, die zeigt, dass die Schmelzsalzzusammensetzung keinen nachweisbaren Einfluss auf die Schmelzausbeute hat [8]. Das Schmelzsatz besteht ohne Berücksichtigung der Feuchte aus 48,82 Gew.-% NaCl, 47,27 Gew.-% KCl, 0,13 Gew.-% CaF_2 , 0,16 Gew.-% SO_4^{2-} und wird bezogen auf die Salzeinsatzmenge zusätzlich mit 3 Gew.-% CaF_2 versetzt. Diese Menge an Fluoridzusatz ist in guter Übereinstimmung mit Untersuchungen nach SYDYKOV [9], wonach bei Prozesstemperaturen von 800 °C eine CaF_2 -Konzentration von 3 Gew.-% aufgrund der begrenzten Löslichkeit im äquimolaren NaCl-KCl-Schmelzsatz nicht überschritten werden soll.

Sobald das Schmelzsatz flüssig ist und eine Temperatur von 780 °C erreicht hat, wird der Zentrifugenkorb mit grobkörnigeren Partikeln der Leichtmetallfraktion beladen, in das Schmelzbad abgelassen und mit einer Geschwindigkeit von ca. 145 U/min rotiert. Nach etwa 10 Minuten ist die Charge abgeschmolzen und es können nun kontinuierlich weitere Partikel über eine Hohlwelle direkt in die Schmelz-zentrifuge chargiert werden. Danach wird die Zentrifuge aus dem Schmelzbad entfernt und mit Partikeln gefüllt, die beim kontinuierlichen Nachchargieren aufgrund ihres hohen Schmelzpunkts (wie z.B. Kupfer-/Stahldraht) nicht aufgeschmolzen wären und zu einem Totvolumen der Zentrifuge geführt hätten. Diese Charge wird anschließend für 15 Minuten in der Salzschnmelze zentrifugiert, bevor die Schmelze für weitere 10 Minuten ruhen gelassen wird, um ein letztes Absetzen von in der Salzschnmelze befindlichen Metalltropfen zu ermöglichen. Die Erstarrung der Schmelze erfolgt im abgeschalteten Ofen.

Während der Chargierphase sammeln sich in der Zentrifuge zunehmend Stücke, die bei etwa 750 °C nicht abgeschmolzen werden. Um die Effektivität der Zentrifuge aufrechtzuerhalten, werden diese teilweise schon während des Versuchs entfernt. Gleiches gilt für die höherschmelzenden Partikel der letzten Teilcharge. Beim Schmelzen der unkonditionierten Leichtgut-Proben fällt auf, dass der Anteil höherschmelzender Bestandteile größer ist und eine Zentrifugation zunehmend erschwert wird. Der insgesamt höhere oxidische Anteil dieser Fraktion führt zu einer geringfügigen Zunahme der Salzschnmelzeviskosität, was wiederum nach der Stoke'schen Gleichung (s. Gleichung 1) ein verschlechtertes Absetzverhalten von in der Salzschnmelze (= Fluid) dispergierten Aluminiumtröpfchen (= Partikel) zur Folge hat.

$$v_p = \frac{d_p^2 \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_{Fl})}{18 \cdot \eta_{Fl}} \quad (1)$$

(v_p : (stationäre) Absetzgeschwindigkeit des Partikels im Fluid; d_p : Partikeldurchmesser; ρ_p bzw. ρ_{Fl} : Dichte des Partikels bzw. des Fluids; η_{Fl} : Dynamische Viskosität des Fluids; g : Erdbeschleunigung)

Nur ein sehr geringer Anteil an unverbranntem Material der MV-Rostasche (z.B. Kunststoffverschlüsse von Alufalttuben) wird bei der RAA nicht aussortiert und somit in



Abb. 6: Ablauf der Zentrifugen-Salzbad-trennschmelze von Leichtgut

Tab. 1: Durchschnittliche Schmelzausbeute und Zusammensetzung der Metallreguli aus den Versuchsreihen mit konditioniertem/unkonditioniertem Leichtgut der Korngröße 10 bis 40 mm

Leichtgut	Angabe in Gew.-%	η	Al	Si	Zn	Cu	Fe	Mn	Pb	Sn	Ni	Cr	Σ
3 konditionierte Schmelzproben à ~2,4 kg	Median	80,1	93,85	2,51	1,62	1,16	0,55	0,22	0,08	0,02	0,04	0,02	99,93
	Mittelwert	79,6	93,32	2,73	1,76	1,12	0,53	0,22	0,08	0,10	0,04	0,02	99,93
	Sigma	1,8	0,82	0,43	0,23	0,07	0,05	0,01	0,01	0,12	0,00	0,00	0,01
3 unkonditionierte Schmelzproben à ~2,4 kg	Median	57,3	92,60	2,75	2,91	1,17	0,56	0,21	0,11	0,02	0,04	0,02	99,95
	Mittelwert	56,5	92,14	2,93	2,83	1,11	0,54	0,22	0,10	0,02	0,03	0,02	99,95
	Sigma	2,5	1,02	0,38	0,69	0,11	0,03	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01

das Leichtgut eingetragen. Diese zumeist organischen Bestandteile können zu gelegentlichen Abbränden (Flambildung) auf der Schmelzbadoberfläche führen und zählen wie die oxidischen Verunreinigungen zu den nichtmetallischen Komponenten.

Die Produktphasen Metall und Salzschlacke werden im Anschluss eines Versuchs voneinander getrennt und für die bilanzielle Bewertung verwogen. Der Metallregulus wird mittig geteilt, plan gefräst und seine Zusammensetzung mit Hilfe eines Funkenspektrometers (Hersteller: SPECTRO Analytical Instruments GmbH, Typ: SPECTROMAXx) an drei unterschiedlichen Stellen analysiert (s. Abbildung 6).

Die bilanzielle Betrachtung eines Versuchs erfolgt nach der Bestimmung der sogenannten Schmelzausbeute an Metall, welche sich nach Gleichung (2) ermitteln lässt.

$$\eta = \frac{m_{\text{Me-Regulus}}}{m_{\text{Vorstoff, trocken}}} \quad (2)$$

$$\text{NMK} = 100 \% - \eta \quad (3)$$

(η : Schmelzausbeute; $m_{\text{Me-Regulus}}$: Gewicht des Metallregulus; $m_{\text{Vorstoff, trocken}}$: Einsatzgewicht der getrockneten Vorstoffprobe; NMK: Anteil der nichtmetallischen Komponenten)

Sie ist bei guter Versuchsdurchführung zusammen mit dem Anteil nichtmetallischer Komponenten (s. Gleichung 3) ein geeignetes Maß zur Bewertung der Qualität des Vorstoffs sowie eine Größe, die es ermöglicht, den im industriellen Maßstab notwendigen Salzeinsatz festzulegen [9].

In Tabelle 1 sind die durchschnittlichen Ergebnisse der Versuchsreihen mit unkonditioniertem und konditioniertem Leichtgut zusammengefasst. Neben der deutlich verbesserten Schmelzausbeute für konditioniertes Leichtgut ist insbesondere der geringere Gehalt an Zink hervorzuheben, welcher zu einer höheren Aluminiumkonzentration von 93,32 Gew.-% führt.

3.2 Metallurgische Bewertung des Schwergut-Mittelkorns

Die Vakuumdestillation von Zink aus konditioniertem und unkonditioniertem Schwergut findet in einem Kaltwand-Induktionsofen statt. Die wassergekühlte Induktionsspule nimmt den Schmelztiegel aus Tongraphit auf, in dem sich das jeweilige Probematerial befindet. Auf den Tiegel wird ein Graphitdeckel gesetzt, der mittig über einen Durchgang (mit tiegelseitiger Lochblende) zum Kondensator verfügt. Der Kondensator besteht aus einem verschließbaren, geschichteten Stahlzylinder, der aufgrund des überstehenden Steigrohrs des Durchgangs über ein Auffangvolumen für Kondensat verfügt. Das Zink-Kondensat kann im flüssigen Zustand zu einem Überlaufkopf ablaufen. Wie in Abbildung 7 dargestellt, ist die Vorgehensweise für alle, wenngleich unterschiedlich vorbehandelten Schwergut-Proben identisch, so dass auch hier Schlussfolgerungen zum Erfolg der mechanischen Vorbehandlung getroffen werden können. Für die Auslegung des Vakuumdestillationsprozesses wird auf experimentelle Daten nach WINKLER et al. [10] zurückgegriffen, nach denen bei Temperaturen von

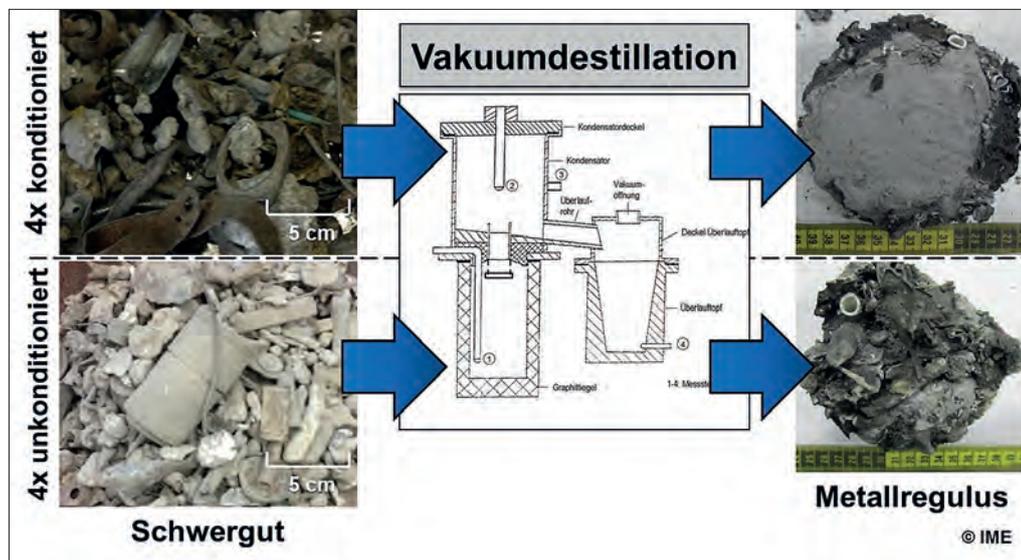


Abb. 7: Ablauf der Vakuumdestillation von Schwergut

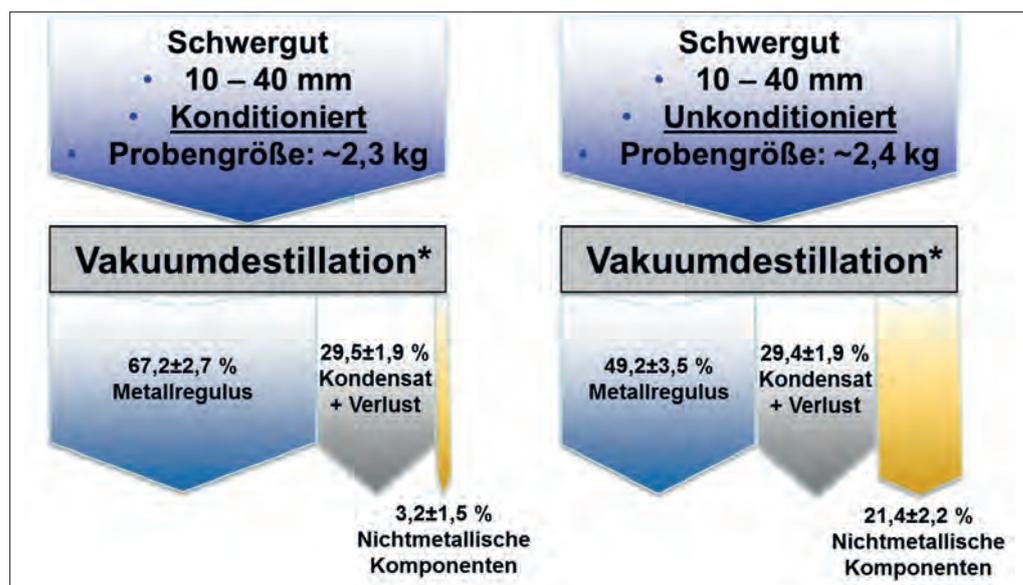


Abb. 8: Massenbilanz der Vakuumdestillationsversuche mit konditioniertem und unkonditioniertem Schwergut; *gemittelt über jeweils vier Schmelzversuche

1200 °C und Drücken von 0,4 mbar eine nahezu vollständige Entfernung metallischen Zinks aus Messingschrotten mit einem Zinkgehalt von bis zu 30,8 Gew.-% möglich ist. Die Mitverdampfung von Kupfer bei diesen Bedingungen wird als gering angegeben, während die Bleigehalte der Messingschrotte (0,5 bis 2,0 Gew.-% Pb) durch den Destillationsvorgang um ca. die Hälfte reduziert werden.

Nachdem das Schwergut getrocknet im Tiegel eingesetzt und der Ofen verschlossen sowie mehrfach evakuiert worden ist, wird bei einem Prozessgasdruck von 600 mbar Argon mit dem Aufheizvorgang begonnen. Sobald im Tiegel bzw. im Probematerial eine Temperatur von 900 °C erreicht worden ist, wird mit Hilfe der Vakuumpumpe der Druck kontinuierlich gesenkt, bis eine Verdampfung eintritt. Dieser Destillationsvorgang wird durch einen Temperaturanstieg des im Dampfstrahl befindlichen Thermoelements bemerkbar. Zeigt sich eine Abnahme der Temperatur, klingt die Destillation ab und der Ofendruck wird erneut abgesenkt, bis entweder eine weitere Verdampfung einsetzt oder der gewünschte Enddruck von ≤ 1 mbar erreicht ist. Anschließend wird der Druck in der Ofenkammer durch Einlassen von Argon angehoben und die Temperatur auf 1000 °C erhöht, um erneut eine Destillation durch Drucksenkung hervorzurufen. Diese Vorgehensweise wird bei 1100 °C und 1200 °C wiederholt, um schrittweise eine vollständige Entzinkung zu bewirken. Am Ende eines Versuchs wird die Temperatur im Tiegel bei 1200 °C für etwa 30 min gehalten, um einen möglichst homogenen Schmelzregulus zu erhalten.

Als Produktphasen entstehen Tiegelmetall, auf dem sich teilweise verschmolzene nichtmetallische Komponenten befinden, und das im Kondensator gesammelte Zink-Destillat, welches je nach Abscheidungsart (Kondensatordeckel/-wand/-boden) eine unterschiedliche Struktur aufweist. Am Kondensatorboden befindet sich feinkörniges Kondensat mit vereinzelt zusammenhängenden grobkörnigen Partikeln, während an der Kondensatorwand ein zum Teil plattenförmiges und am Kondensatordeckel ein sehr grobkörniges, kristallines Kondensat vorliegt. Der Metallregulus im Tiegel wird von Anhaftungen befreit und

für die Massenbilanz verwogen. Bei allen Schwergut-Destillationsversuchen fällt der Metallregulus äußerst spröde aus, so dass keine Massiv-Proben für eine stationäre Röntgenfluoreszenzanalyse entnommen werden können. Aufgrund dessen wird eine mobile Röntgenfluoreszenzanalyse des Typs Niton XL3t des Herstellers Thermo Scientific verwendet, welche eine chemische Analyse auch an nicht plangefrästen Probenoberflächen ermöglicht.

In Abbildung 8 ist die Massenbilanz der Schwergut-Versuchsreihen grafisch zusammengefasst. Die Produktmengen sind prozentual auf die Einsatzmenge an Schwergut bezogen und werden jeweils über vier Vakuumdestillationsversuche gemittelt zusammen mit dem statistischen Fehler (auf die Grundgesamtheit bezogenen Standardabweichung) angegeben. Der Unterschied zwischen den Schmelzproben aus konditionierten und unkonditionierten Schwergut ist neben der durch Konditionierung verbesserten Schmelzausbeute in dem Anteil nichtmetallischer Komponenten zu erkennen, welcher sich im Tiegel auf dem Metall-Regulus als heterogene Phase ausgebildet hat (s. Abbildung 7). Darüber hinaus lässt sich ebenfalls im Kondensat ein gewisser Anteil nichtmetallischer Bestandteile wiederfinden. Die vorhandenen, aber geringen diffusen Emissionen des Kondensats, beispielsweise in den Ofenraum oder an verwendete Versuchsmaterialien (in Form von z.B. Dichtringen aus Thermoschutzmatte), gestalten eine vollständige Erfassung als schwierig und gehen deshalb als Verluste in den Massenanteil des Kondensats ein.

Da ein Fokus der Vakuumdestillation neben der Rückgewinnung metallischen Zinks unter Vermeidung eines aufwändigen Wälz/Leach/Elektrolyse-Prozesses auf der Erzeugung einer marktfähigen Kupfervorlegierung liegt, werden in den Tabellen 2 und 3 die auf die Tiegelmetallmenge bezogenen Ausbeuten sowie die durchschnittliche chemische Analyse der Metallreguli zusammengefasst.

Im Vergleich der Analyseergebnisse fällt auf, dass der gemittelte Cu-Gehalt der Versuchsreihe mit unkonditioniertem Schwergut über dem mit konditioniertem Schwergut

Tab. 2: Schmelzausbeute und Zusammensetzung der Metallreguli, gemittelt aus vier Schmelzversuchen unter Zinkdestillation mit konditioniertem Schwergut

Angabe in Gew.-%	$\eta_{\text{Me-Regulus}}$	Cu	Al	Fe	Cr	Si	Ni	Sn	Mn	Zn	Mo	Co	Sb	Σ
Median	67,3	58,91	22,03	9,59	2,71	2,35	1,79	0,32	0,30	0,03	0,06	0,04	0,02	99,72
Mittelwert	67,2	59,01	21,64	10,73	3,34	2,16	1,87	0,30	0,29	0,04	0,06	0,05	0,02	99,51
Sigma	2,7	2,55	3,91	3,32	1,49	0,45	0,27	0,06	0,04	0,05	0,02	0,02	0,00	0,44

Tab. 3: Schmelzausbeute und Zusammensetzung der Metallreguli, gemittelt aus vier Schmelzversuchen unter Zinkdestillation mit unkonditioniertem Schwergut

Angabe in Gew.-%	$\eta_{\text{Me-Regulus}}$	Cu	Al	Fe	Cr	Si	Ni	Sn	Mn	Zn	Mo	Co	Sb	Σ
Median	48,0	60,88	16,47	10,41	2,93	2,81	1,98	0,61	0,18	0,09	0,07	0,06	0,02	99,68
Mittelwert	49,2	62,29	16,54	11,27	3,20	3,17	1,96	0,69	0,18	0,08	0,09	0,06	0,04	99,57
Sigma	3,5	8,63	4,80	5,08	1,66	2,13	0,47	0,27	0,03	0,04	0,07	0,03	0,03	0,24

liegt, sich die chemische Analyse aber auf eine geringere Metallmenge bezieht. Des Weiteren sind die gemittelten Standardabweichungen der Konzentrationswerte für unkonditioniertes Einsatzmaterial deutlich höher als für konditioniertes Schwergut. Dies macht sich ebenfalls in den gegenüber Ausreißern nicht so anfälligen Medianwerten bemerkbar, welche allerdings einen im Vergleich zu den Mittelwerten geringeren Unterschied zwischen konditioniertem und unkonditioniertem Schwergut aufweisen.

4 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Eine mechanische Vorbehandlung mittels Prallmühle führt zu einer deutlichen Verbesserung in der schmelzmetallurgischen Verwertung des Leichtguts mittels Salzbadtrennschmelze. Der Unterschied von 23,1 Prozentpunkten in der gemittelten Schmelzausbeute zwischen konditioniertem und unkonditioniertem Leichtgut verdeutlicht, dass der Fokus bei der MV-Rostaschenaufbereitung auf dem maximierten Ausbringen von NE-Metallkonzentrat liegt und somit ein hoher Anteil mineralischer Bestandteile in den Ausgangsstoff der VeMRec-Pilotanlage eingebracht wird. Eine trockenmechanische Abtrennung dieser Bestandteile vor der sensorgestützten Sortierung ist für die nachfolgende metallurgische Verwertung unerlässlich.

Die Dichtesortierung mittels Röntgentransmission scheint in Bezug auf den erzielten Aluminiumgehalt von 93,3 Gew.-% nach Schmelzen des konditionierten Leichtguts eine hinreichende Effizienz aufzuweisen. Der reduzierte Zinkgehalt im Vergleich zum unkonditionierten Leichtgut kann verschiedene Ursachen haben. Zum einen wird durch eine Prallbeanspruchung des NE-Metallkonzentrats das bei Raumtemperatur relativ spröde metallische Zink teilweise zerkleinert und im anschließenden Siebvorgang abgetrennt. Zum anderen kann durch lokale Temperaturschwankungen während der Müllverbrennung Zink lediglich aufschmelzen bzw. rekondensieren und Metall-Mineralik-Verbunde bilden, welche durch die mechanische Aufbereitung aufgebrochen und ebenfalls in der mineralischen Feinfraktion abgeschieden werden. Durch die nur im einstelligen Prozentbereich liegenden Gehalte von Silizium, Zink, Kupfer und Eisen bietet sich nach derzeitigem Stand der Forschungsergebnisse für das konditionierte Leichtgut eine Verwertung als Altschrott zur Herstellung von Gusslegie-

rung mittels salzeinsetzender Verfahren im (kippbaren) Drehtrommelofen an.

Die Konditionierung mittels Prallmühle wirkt sich ebenfalls beim Schwergut positiv auf die Massenbilanz der Vakuumdestillationsversuche aus, da zwischen den Schmelzproben des unkonditionierten und konditionierten Schwerguts ein Unterschied von 18 Prozentpunkten in der Metallausbeute festzustellen ist, welcher sich gleichermaßen als Verringerung des Anteils nichtmetallischer Komponenten äußert. Der Erfolg der trockenmechanischen Dichtesortierung mittels Röntgentransmission lässt sich für das Schwergut noch nicht abschließend beurteilen. Noch ist festzuhalten, dass neben den hohen Konzentrationen an Zink, welches durch Destillation hinreichend als Kondensat abgetrennt wird, lediglich Kupfergehalte um 60 Gew.-% in den Metallreguli erreicht werden und eine deutliche Verdünnung mit Störstoffen vorliegt. Hierzu zählen fehlausgetragene Aluminiumpartikel sowie kaum vermeidbare Edelstähle, welche sich in der chemischen Analyse anhand der Legierungselemente Fe, Cr und Ni wiederfinden lassen. Der Verdünnungsgrad ist nach derzeitigem Stand der Forschung so hoch, dass eine industrielle Verwertung des erzeugten Schwerguts zwar möglich, sicherlich aber mit Strafabzügen seitens der Abnehmer zu rechnen ist.

Eine mögliche Erklärung dafür, dass der Cu-Gehalt der Metallreguli mit Schmelzproben aus mechanisch konditioniertem Schwergut im Mittel niedriger ist, liegt im geringeren Anteil nichtmetallischer Bestandteile. Beim unkonditionierten Schwergut kommt es im XRT-Sortierer in der Umgebung der auszutragenden Kupfer-, Messing- und anderer Schwermetallteile zu Fehlausträgen an Aluminiumwerkstoffen, aber auch vermehrt an nichtmetallischen Komponenten, welche anhaftend, staubförmig und stückig vorliegen. Dieser nichtmetallische Anteil führt bei der Vakuumdestillation zur Ausbildung einer heterogenen, schlacken- bzw. ascheähnlichen Phase, welche die ebenfalls enthaltenen Leichtmetallpartikel daran hindert, sich in die Schmelzphase abzusetzen und somit Aluminium auch weniger stark in die Metallschmelze einlagert wird.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der labortechnischen Bewertung lässt sich schlussfolgern, dass sich die mechanische Prallbeanspruchung der

VeMRec-Pilotanlage eindeutig positiv auf die bilanziell ermittelten Metallausbeuten für ihre schmelzmetallurgische Verwertung auswirkt. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse wird innerhalb des VeMRec-Projektes zukünftig für das Feinkorn der Größe <10 mm als auch im großtechnischen bzw. industriellen Maßstab überprüft. Dies geschieht mit besonderem Fokus auf den Erfolg einer optimierten trockenmechanischen Dichtesortierung mittels Röntgen-Transmission.

Im Rahmen dieser Untersuchung konnte gezeigt werden, dass durch eine mechanische Vorbehandlung Metall-Mineralik-Verbunde aufgeschlossen werden und eine Entfernung stückiger und anhaftender Mineralik durch anschließende Klassierung möglich ist. Der Gesamtwirkungsgrad der Konditionierung, welcher sich aus der Multiplikation der Wirkungsgrade der Prallzerkleinerung und des nachgeschalteten Spannwellsiebess zusammensetzt, zeigt noch Verbesserungspotentiale. Wird Aluminium als Zielstoff für das Leichtgut definiert, so ist ein Gehalt von ca. 93 Gew.-% im metallischen Produkt der Salzbadtrennschmelze für die Herstellung von Gusslegierungen als gut zu bewerten. Die Steigerung des Aluminiumgehalts bis hin zur Ermöglichung der Knetlegierungsherstellung aus Leichtgut ist Gegenstand zukünftiger Fragestellungen im Projekt. Bei der alleinigen Betrachtung von Kupfer als Zielstoff des Schwergutes werden dem Ergebnis der Vakuumdestillationsversuche folgend noch keine zufriedenstellenden Gehalte erzielt. Hierbei stellt sich zusätzlich die Frage nach der Selektivität der Vakuumdestillation von konditionierten Schwergut-Konzentraten mit einem besonderen Blick auf die chemische Analyse der erhaltenen Produktphasen (Metall und Kondensat) und deren Gehalte an Edelmetallen. Darüber hinaus ist neben der Verbesserung der mechanischen Aufbereitungstechnik die Möglichkeit zur pyrometallurgischen Raffination gegeben, welche dann sowohl in ihrer Ressourcen- als auch Energieeffizienz gegenüberzustellen sind.

Insgesamt existiert nach derzeitigem Kenntnisstand bei den mechanischen Aufbereitungsschritten ein noch zu untersuchendes Optimierungspotential hinsichtlich der weiteren Minimierung des Mineralikeintrags sowie der Cross-Kontamination der Fraktionen, um eine verbesserte Effizienz sowie eine homogenere Zusammensetzung für nachgeschaltete metallurgische Schritte erreichen zu können. Hierbei ist neben einer Verringerung an fehlergetragenen Aluminiumwerkstoffen in das Schwergut eine vorgeschaltete Abtrennung von Edelstählen exemplarisch zu nennen.

Danksagung

Das hier zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03R081 im Rahmen der Maßnahme „r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“ gefördert. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] ALWAST, H. & RIEMANN, A. (2010): Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen. Sachverständigen Gutachten: Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen. – Hg. v. Umweltbundesamt; Prognos AG, Dessau (Texte, 50/2010).
- [2] HEINRICHS, S. et al. (2012): Recovery of NF-metals from bottom ash's fine fraction – State-of-the-art in Germany. – In IWWG (Hg.): Venice 2012: Fourth International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venice; International Waste Working Group.
- [3] GILLNER, R. (2011): Nichteisenmetallpotential aus Siedlungsabfällen in Deutschland. – Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2011; Aachen, Shaker (Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredlung, 40).
- [4] KRANERT, M. (2010): Einführung in die Abfallwirtschaft. – Hg. v. Klaus Cord-Landwehr; Vieweg+Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden.
- [5] 17. BImSchV 2013. Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen – 17. BImSchV. In: BGBl.
- [6] BÖNI, D. (2009): Trockener Schlackenausrag. Ungenutzte Potentiale in der Abfallverwertung. – In: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Michael Beckmann (Hg.): Energie aus Abfall. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (Band 6): 109-122.
- [7] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (1994): Merkblatt Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle; LAGA 01.03.1994. – In: Müll und Abfall **94** (04).
- [8] GISBERTZ, K. et al. (2013): Maximising Metal Recovery from Incineration Ashes. – In: Proceedings/EMC 2013, European Metallurgical Conference; June 23-26, 2013, Weimar, organized by GDMB; Clausthal-Zellerfeld; GDMB Verlag; Vol. 3, 2013; ISBN 978-3-940276-52-3: 1127-1132.
- [9] SYDKOV, A. (2004): Eigenschaften und Ausbeuteeffluss von NaCl/KCl-basierten Schmelzsalzen des Al-Recyclings. – Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2004; Aachen; Shaker (Schriftenreihe des IME/IME, Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling).
- [10] WINKLER, O. & BAKISH, R. (1971): Vacuum Metallurgy. – Elsevier Publishing Company, Amsterdam – London – New York: 260-261.

Dipl.-Ing. Kilian Gisbertz
 Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Bernd Friedrich
 Beide:
 RWTH Aachen University
 IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling
 Intzestraße 3
 52056 Aachen
 Deutschland

Dipl.-Ing. Stefan Heinrichs
 Dipl.-Ing. David Rübmann
 Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz
 Alle:
 RWTH Aachen University
 I.A.R. Institut für Aufbereitung und Recycling
 Willnerstraße 2
 52056 Aachen
 Deutschland

Dipl.-Ing. Christian Knepperger
 MAV Mineralstoff-Aufbereitung und -Verwertung GmbH
 Bataverstraße 9
 47809 Krefeld
 Deutschland