

Möglichkeiten des Recyclings von HMV-Schlacke

R.Deike¹, D.Ebert¹, R.Warnecke², M.Vogell³

¹ Universität Duisburg-Essen, ² Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH, Schweinfurt

³ C.C. Reststoff - Aufbereitung GmbH + Co. KG, Würzburg

1 Einleitung

Unter dem Titel „Die Grenzen des Wachstums“ [1] wurde zu Beginn der 70er Jahre zum ersten Mal versucht die Entwicklung der Welt mit Hilfe eines formalen mathematischen Modells zu beschreiben. In der Folge wurde in den reichen Industrienationen das Denken der heranwachsenden Generationen dahin gehend verändert, dass sich der notwendige Schutz der Umwelt und der natürlichen Ressourcen zur anerkannten Maxime gesellschaftlichen Handelns entwickelte. Heute ist es in modernen Gesellschaften ebenfalls zur Maxime gesellschaftlichen Handelns geworden, den eigenen Zivilisationsmüll so weit wie möglich nicht mehr zukünftigen Generationen zu überlassen, sondern ihn selbst und zeitgleich unter anderem in Müllverbrennungsanlagen zu verwerten [2].

Standen im Verlauf der bisherigen Entwicklung bei der Müllverbrennung die Fragen des Schutzes der Umwelt, der Energiegewinnung aus den organischen Bestandteilen des Mülls und der Verwertung der mineralischen Fraktion in Form der Schlacke im Vordergrund, so wächst in jüngster Zeit in der Öffentlichkeit, unter dem Aspekt der Steigerung der Ressourceneffizienz, das gesellschaftliche Bewusstsein, dass Metalle als Sekundärrohstoffe aus den MV-Schlacken zurückgewonnen werden können. In der Literatur werden die mehr oder weniger festen Rückstände, die am Ende des Rostes den Feuerungsraum verlassen, als Aschen oder Schlacken bezeichnet, wobei mit beiden Bezeichnungen dasselbe Produkt gemeint ist. Im weiteren Verlauf dieses Berichtes wird der Begriff Schlacken verwendet.

Eisen und NE-Metalle aus HMV-Schlacken abzutrennen, ist bereits heute schon Stand der Technik. Vor dem Hintergrund der Steigerung der Ressourceneffizienz von teuren Industriemetallen, die unter anderem auch in der Elektronikindustrie verwendet werden, stellt sich aktuell allerdings die Frage, welche zusätzlichen Recyclingpotenziale bei der Verwertung von Metallen aus HMV-Schlacken zukünftig unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu noch entwickeln sind. Wobei die Beantwortung dieser Frage allerdings sehr wesentlich davon abhängt, wie sich die Metallpreise entwickeln werden.

Im Rahmen einer hier vorgestellten Untersuchung wurden die metallischen Komponenten einer aufbereiteten HMV-Schlacke in verschiedenen Korngrößenpektren analysiert und charakterisiert. Die durchgeführten Untersuchungen beziehen sich im Wesentlichen auf die Metallgehalte in der Fraktion der aufbereiteten Schlacke < 12 mm und insbesondere auf die Korngrößenklassen < 2 mm.

Dabei stehen allerdings nicht die zu ermittelnden Gesamtanalysen im Vordergrund, sondern die Frage wie sich verschiedene Elemente auf die unterschiedlichen Korngrößenklassen verteilen. Des Weiteren wird im Rahmen dieser Untersuchungen der Frage nachgegangen, in welcher Form:

- metallisch,
- oxidisch,
- sulfidisch usw.

die Metalle in bestimmten Fraktionen der HMV-Schlacken vorliegen. Diesbezügliche Kenntnisse sind die Voraussetzung um evtl. Rückgewinnungspotenziale abschätzen zu können. Vor diesem Hintergrund wird ein Bilanzierungsmodell zur Bewertung von Recyclingpotenzialen von Metallen in HMV-Schlacken vorgestellt, mit dem die Metallströme in einer Müllverbrennungsanlage und im Verlauf der Aufbereitung der Schlacke erfasst werden.

Zusätzliche wirtschaftliche Recyclingmaßnahmen sind allerdings unter der Prämisse zu bewerten, dass die Verwertung der mineralischen Fraktion weiterhin uneingeschränkt gewährleistet sein muss, da sie die mit Abstand größte zu verwertende Menge darstellt.

2 Entwicklungen auf den internationalen Rohstoffmärkten

Die Weltwirtschaft befindet sich in einer Entwicklung an deren Ende sich die Koordinaten der Wirtschaftszentren der Welt in 20 Jahren deutlich verschoben haben werden. Wurde die Weltwirtschaft in den letzten 60 Jahren im Wesentlichen von den USA, Japan und den Industrienationen in Westeuropa gesteuert, so wird dies in 20 Jahren sehr wahrscheinlich durch die USA und China in Kooperation mit verschiedenen heutigen Schwellenländern geschehen. Drastische Veränderungen sind heute schon im Zusammenhang mit der Verfügbarkeit von metallischen und mineralischen Rohstoffen zu erkennen. M. Wagner und D.Huy [3] weisen sehr deutlich darauf hin, dass sich auf der Konsumentenseite von Rohstoffen ein Strukturwandel vollzogen hat, da heute mit China, Indien und anderen bevölkerungsreichen Schwellenländern über die Hälfte der Weltbevölkerung an der Nachfrage nach Rohstoffen beteiligt ist. Die weltweite verstärkte Nachfrage nach Rohstoffen und damit einhergehende Veränderungen der Strukturen wichtiger internationaler Rohstoffmärkte führten in den letzten 10 Jahren zu bisher nicht gekannten Preissteigerungen (**Abb. 1**) einhergehend mit einer bisher nicht gekannten Volatilität der Märkte.

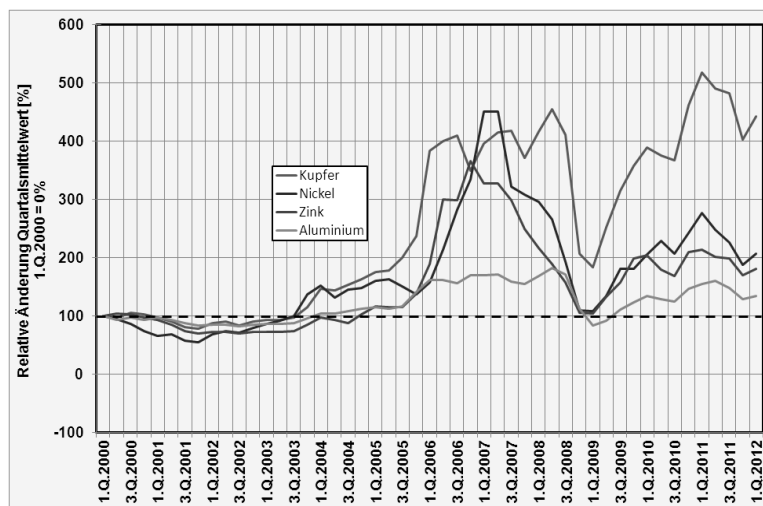


Abb.1: Preisänderungen von diversen Industriemetallen auf der Basis von Quartalsmittelwerten [2] nach Daten von [4].

Im Bereich der Rohstoffe sind vielfach Marktstrukturen zu identifizieren, die der Struktur in der Weltstahlindustrie (**Abb. 2**) ähnlich sind. Aus der Abb. 2 ist zu entnehmen, dass in der Weltstahlindustrie in dem letzten Jahrzehnt ein extremes Wachstum der Stahlproduktion in China stattgefunden hat.

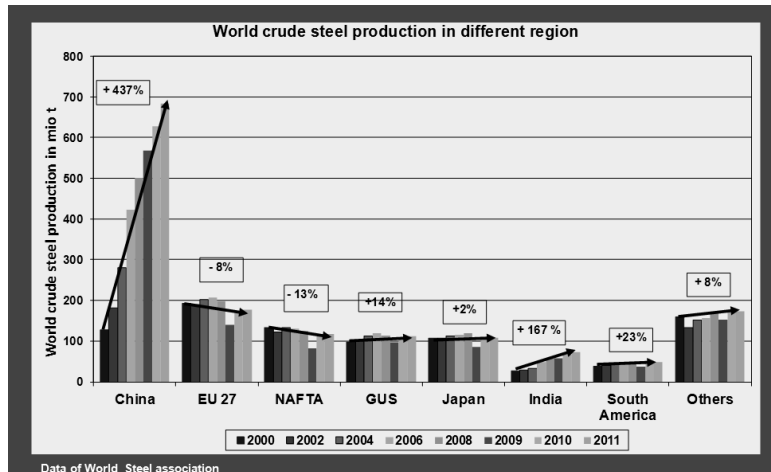


Abb. 2: Die Weltrohstahlproduktion aufgeteilt in verschiedene Regionen der Welt [5] nach Daten von [6].

Marktstrukturen dieser Art, die durch ein sehr hohes Maß an Unausgewogenheit gekennzeichnet sind, führen zu extrem volatilen Verhältnissen was die Relation von Angebot und Nachfrage hinsichtlich der benötigten Rohstoffe und der daraus resultierenden Preise betrifft. Diese Tatsache konnte ganz besonders bei den Entwicklungen der Erzpreise zu Beginn des Jahres 2010 beobachtet werden. In einer Phase, in der die Stahlindustrien der Welt noch damit beschäftigt waren, die durch die Wirtschaftskrise verbundenen drastischen Produktionsrückgänge unternehmerisch zu bewältigen, stiegen in der Folge der starken Nachfrage aus Asien die Preise für Eisenerz drastisch an [7]. Dieser drastische Anstieg der Eisenerzpreise wurde dadurch begünstigt, dass auf der Angebotsseite ein oligopolistisch strukturierter Markt [8] existiert. Diese im Bereich der metallischen Rohstoffe durchaus häufiger anzutreffenden Marktstrukturen auf der Angebotsseite sind ein weiterer Grund für die volatileren Rohstoffmärkte.

Sich schnell und drastisch verändernde Metallpreise haben aber unter den Bedingungen eines freien Marktes einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Metallrecyclings, die sehr wesentlich dadurch bestimmt wird, welche Erlöse für die recycelten Produkte erzielt werden können. Vor diesem Hintergrund sind auch Prozesse zum Recycling von Metallen aus HMV-Schlacken zu analysieren, wobei sehr wahrscheinlich von mittelfristig weiter steigenden Preisen ausgegangen werden kann.

3 Charakteristische Eigenschaften von HMV-Schlacken

Im Jahr 2009 sind ca. 4,76 Mio. t Schlacken aus der Müllverbrennung [9] angefallen, davon wurden:

- 76% in mineralischer Form im Deponie- und Straßenbau verwertet
- 7% als metallisches Eisen und 0,7% in Form von NE-Metallen gewonnen
- 7% einer Untertage- oder sonstigen Verwertung zugeführt
- 10% deponiert.

Petrologische Untersuchungen von HMV-Schlacken [10, 11] zeigen, dass es sich bei Rohschlacken (nicht aufbereitete Schlacken) um eine Mischung aus den folgenden Komponenten handelt:

- 45% feinkörnige Aschen
- 40% grobkörnige gesinterte Verbrennungsprodukte
- 10% inerte Abfallstoffe wie Glas, Keramik und Steinen
- 5% Metalle
- bis zu 2% organisches Material.

Wobei die Zusammensetzungen dieser Rohschlacken bzw. Rohaschen abhängen [10, 12] von:

- der Abfallzusammensetzung
- den Feuerungsbedingungen
- der Verweilzeit in der Anlage
- der Art des Schlackenausstrags.

Bei HMV-Schlacken handelt es sich im Wesentlichen um Calcium-Aluminium-Silikate [10,13] in denen außerdem noch größere Mengen an Eisen enthalten sind. Des Weiteren sind

- als Nebenbestandteile eine Reihe von Metallen (Mg, Ti, Na, K...)
- als Spurenelemente Zn, Pb, Cu ...
- als Anionen Chlorid, Sulfat, Fluorid und Phosphat

in den Schlacken enthalten, die z.T. auch für die hohe Reaktivität der Schlacken verantwortlich sind. Für die konzeptionelle Entwicklung von Verfahren zur Rückgewinnung von Metallen aus HMV-Schlacke ist es besonders wichtig zu wissen, in welcher Struktur und in welchen Verbindungen die Metalle in HMV-Schlacken vorliegen.

4 Versuchsdurchführung

Vor diesem Hintergrund wurden jeweils fünf Proben einer aufbereiteten Feinschlacke (0-12 mm) und einer aufbereiteten Grobschlacke (12-32 mm) aus einem industriellen Aufbereitungsprozess entnommen und im Weiteren untersucht. Die Proben wurden nicht weiter zerkleinert sondern je vier Proben der Fein- und Grobschlacke wurden nass gesiebt. Zu Vergleichszwecken wurden jeweils eine Probe der Fein- und Grobschlacke trocken gesiebt. Aus jeder Kornfraktion erfolgte mittels eines Probenteilers die Probenahme für die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und verschiedene andere Untersuchungen.

Die Trennung der Proben in eine magnetische und eine nicht-magnetische Fraktion konnte mittels eines Permanentmagneten durchgeführt werden. Für die mikroskopische Untersuchung wurden Proben aus den zu untersuchenden Kornfraktionen entnommen, in Kunstharz eingebettet und lichtmikroskopisch im Auflicht untersucht. Einzelne Partikel wurden zusätzlich mit einem Digitalmikroskop aufgenommen, so dass 3D-Aufnahmen von den Partikeln aufgenommen werden konnte. Diese Vorgehensweise hatte gegenüber der konventionellen Mikroskopie den Vorteil, dass z.B. in einem Hohlraum tiefer liegende Partikel in gleichmäßiger Tiefenschärfe mit den entsprechenden unterschiedlichen Farben fotografiert werden konnten. Mit Hilfe dieser Aufnahmen war es bei den anschließenden REM-Aufnahmen möglich, die aufgrund ihrer unterschiedlichen Farben deutlich zu erkennenden Bereiche mit Hilfe entsprechender EDX-Untersuchungen gezielt zu analysieren. Durch Elementverteilungsanalysen auf ausgewählten Flächen, ergeben sich Einblicke in den Aufbau verschiedener Phasen.

Um die Frage der Entstehung der Magnetitschichten klären zu können, die häufiger in einer schalenartigen Struktur -mit mineralischen Partikeln und Hohlräumen im Inneren- gefunden werden konnten, wurden Versuche durchgeführt, in denen zwei Proben jeweils in einem separaten Al_2O_3 -Tiegel in einem Ofen auf Temperaturen von 850°C und 1000°C aufgeheizt und im Ofen wieder abgekühlt wurden. Bei diesen Versuchen war jeweils in einem Tiegel eine Probe aus einer reinen Schlacke und in dem anderen Tiegel befand sich eine Probe bei der die Schlacke mit Eisenpulver gemischt war. In beiden Tiegeln wurden die Temperaturen parallel kontinuierlich mit Thermoelementen gemessen und mit einem Messgerät entsprechend elektronisch aufgezeichnet, so dass die Messdaten für weitere Auswertungen zur Verfügung stehen.

5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Siebanalysen der Fein- und der Grobschlacken zeigen beim Aluminium (Al), dass es über alle Korngrößen mehr oder weniger gleichmäßig in einer Größenordnung von 40.000 ppm verteilt ist. Es gibt keinen wesentlichen Unterschied zwischen der Fein- und Grobschlacke, wobei möglicherweise ein Trend zu höheren Gehalten in der Grobschlacke zu erkennen ist.

Im Gegensatz dazu ist beim Silicium (Si) eine deutliche Abhängigkeit der Gehalte von der Korngröße zu erkennen. In den Korngrößen < 1 mm ist Silicium in deutlich geringeren Mengen (ca. 60.000 ppm) enthalten und in den Korngrößen > 1 mm steigt die Konzentration auf ca. 140.000 ppm an. In der Grobschlacke ist im Vergleich zur Feinschlacke ein weiterer deutlicher Anstieg zu erkennen. Sehr wahrscheinlich kann davon ausgegangen werden, dass die größeren Partikel so in die Müllverbrennungsanlage eingetragen, möglicherweise durch Stoß und Abrieb noch zerkleinert worden sind, aber nur begrenzt an chemischen Reaktionen teilgenommen haben.

Im Gegensatz dazu ist beim Zink (Zn) eine Anreicherung in den kleinen Kornfraktionen der Feinschlacke bis auf ein Niveau von 10.000 ppm zu erkennen, was darauf schließen lässt, dass es sich hierbei um Reaktionsprodukte aus dem Verbrennungsprozess handelt. Die Anreicherung der Zinkgehalte in den kleinen Fraktionen kann sehr wahrscheinlich damit erklärt werden, dass Zink aufgrund seiner geringen Verdampfungstemperatur (907°C) im Feuerraum gasförmig ist und auf diese Weise unter Reaktionen mit anderen Elementen (z.B. Sauerstoff, Schwefel) in der Schlacke hängen bleibt. In der Grobschlacke sind die Zinkgehalte im Vergleich zu den Gehalten in der Feinschlacke geringer, wobei sehr wahrscheinlich davon ausgegangen werden kann, dass mit den bestehenden Verfahren der Wirbelstromtrennung größere Partikel bereits entfernt worden sind.

Die Entwicklungen der Chlor (Cl)- und Schwefelgehalte (S) zeigen, dass die Chlorgehalte möglicherweise in den kleinen Kornfraktionen der Feinschlacke tendenziell etwas erhöht sind, dass sie aber mit steigender Korngröße mehr oder weniger gleichmäßig auf einem Niveau von ca. 6.000 ppm über die größeren Kornklassen verteilt sind. In etwa der gleichen Größenordnung befinden sich auch die Chlorgehalte in der Grobfraktion. Im Gegensatz dazu zeigen die Schwefelgehalte einen deutlichen Anstieg auf ca. 25.000 ppm mit kleiner werdenden Korngrößen in der Feinschlacke. In den Korngrößenklasse über 0,5-1 mm bewegen sich die Schwefelgehalte auf einem Niveau von ca. 7.000 ppm. In der Grobschlacke sind noch weiter fallende Gehalte zu erkennen.

Im Verlauf der Untersuchungen der kleinen Korngrößenfraktionen konnte festgestellt werden, dass diese zu nicht unerheblichen Anteilen magnetisch waren. Die im Weiteren durchgeführten Untersuchungen einzelner Partikel ergaben, dass sehr häufig Partikel identifiziert werden konnten, die aus einer äußeren Magnetitschale bestanden und im Inneren eher hohl waren, wobei in den Hohlräumen zum Teil mineralische Partikel mit einem überwiegenden Anteil an Sauerstoff, aber auch mit Gehalten an Schwefel und Chlor identifiziert werden konnten.

Die in Tab. 1 dargestellten Ergebnisse der EDX-Punktanalysen aus der Magnetitschicht (Abb.3) zeigen, dass sich neben dem Fe_3O_4 , im Wesentlichen Al_2O_3 , SiO_2 und CaO in dieser Schicht befinden.

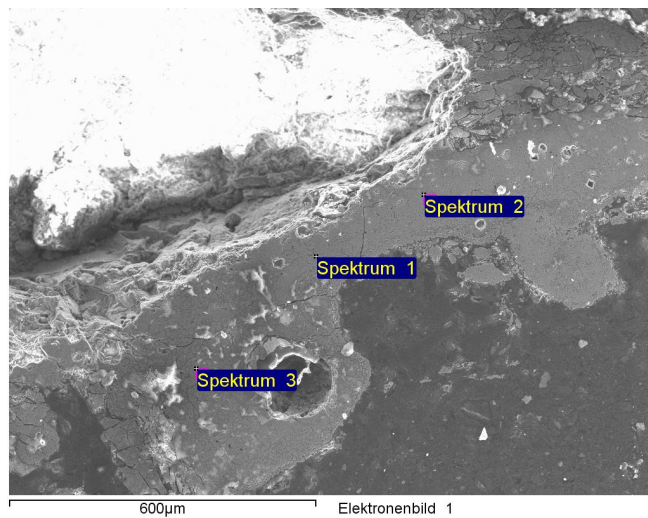


Abb. 3: REM-Aufnahme der äußeren Magnetitschicht mit im Inneren befindlichen mineralischen Partikeln [2].

Werden die in der EDX-Analyse als Elemente angegebenen Gehalte der Metalle (Gew. %) in die o.g. Oxide umgerechnet, so ergeben sich daraus die in Tab. 1 aufgeführten theoretischen Sauerstoffgehalte in der Größenordnung von 27-30 Gew.%, die im Rahmen einer solchen Analyse relativ gut mit den gemessenen Sauerstoffgehalten zwischen 34,3 - 35,4% übereinstimmen.

Tab. 1: EDX-Punktanalysen in der Magnetitschicht

Spektrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ba	O theoretisch
Spektrum 1	8	35	0,5		4,2	9,7	0,3	0,4	0,3	0,5	7,4		0,6	30,8	2,4	30
Spektrum 2	2,6	35,4		0,4	1,3	7,1					4,8	0,2		48,1		29,5
Spektrum 3	8,8	34,3		0,3	1,3	6,1					4,5			44,8		27

Zur Klärung der Frage, wie sich mehr oder weniger dichte Magnetitschichten um die mineralischen Partikel herum gebildet haben könnten, wurden Versuche durchgeführt, bei denen eine reine nichtmagnetische Feinschlacke in der Kornfraktion 1- 2 mm und die gleiche Schlacke, allerdings gemischt mit 20%

Eisenpartikeln in zwei separaten Al_2O_3 -Tiegeln parallel auf Temperaturen von 850°C und 1000°C aufgeheizt wurden. Die anschließende metallographische Untersuchung der Proben gibt Hinweise darauf, wie es zu der schalenartigen Struktur des Magnetits in der Schlacke kommt. In Abb. 4 ist bei einer Probe, die auf 850°C aufgeheizt wurde, zu erkennen, wie die Oxidation des Eisens vom Prinzip her stattfindet.

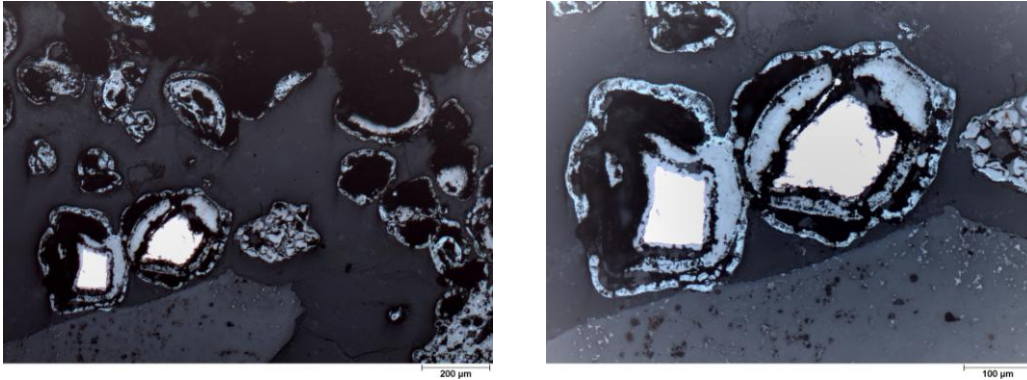


Abb.4: Die Bildung von Eisenoxidschichten bei einer Temperatur von 850°C (Eisenoxid = hellgrau, Eisen = weiß) [14].

Mit der Oxidation des Eisens zu Wüstit (Fe_{1-y}O) ist eine Volumenzunahme von 76% verbunden. Bei einem weiter konstanten Angebot an Sauerstoff oxidiert der Wüstit zu Magnetit, womit eine weitere Volumenzunahme von 19% verbunden ist. Durch die Oxidation des Eisens in Kombination mit der Volumenvergrößerung bilden sich über die Oxidationszwischenstufe Wüstit die Magnetitschalen aus. Durch die Volumenveränderungen werden Rissbildungen in den Oxidschichten hervorgerufen, die zu einer weiteren Oxidation des Eisens führen, so dass z.B. ein Eisenpartikel im Inneren der Schale durch die weitere Oxidation aufgezehrt wird, mit der Folge, dass sich in der Magnetitschale Hohlräume ausbilden. Durch das Wachstum der Oxidschichten stoßen diese zusammen und versintern miteinander, bzw. beginnen auch mit anderen oxidischen Partikeln zu versintern. Die EDX-Untersuchungen der mineralischen Fraktion zeigen, dass es sich bei den mineralischen Partikeln um Verbindungen mit einem relativ hohen Gehalt an Sauerstoff handelt.

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse der Untersuchungen, dass die magnetischen Anteile in den kleinen Korngrößen der Feinschlacke höher sind als in den größeren Korngrößenklassen. Diese Tendenz lässt sich wahrscheinlich aufgrund der Tatsache erklären, dass in den kleinen Kornfraktionen der magnetische Effekt im Wesentlichen auf den Magnetit zurückzuführen ist und da dieser zum Teil mehr oder weniger intensiv mit den mineralischen Partikeln versintert ist, sind diese ebenfalls in den magnetischen Fraktionen mit enthalten. Von daher lässt sich auch erklären, dass in den kleineren Korngrößenklassen trotz des höheren magnetischen Anteils die Eisengehalte niedriger sind. In den größeren Korngrößenklassen beruht der magnetische Effekt tendenziell mehr auf den Eisenpartikeln und da von denen zum Teil schon im Verlauf der Aufbereitung ein großer Teil entfernt worden ist, sind die magnetischen Fraktionen geringer, allerdings sind die Eisengehalte in ihnen höher.

Im Zusammenhang mit den Versuchen zur Oxidation des Eisens konnten ebenfalls metallographische Untersuchungen zur Oxidation von Kupferpartikeln durchgeführt werden. Die Abb. 5 zeigt in zwei

unterschiedlichen lichtmikroskopischen Vergrößerungen ein Kupferpartikel, das von einer Oxidschicht umgeben ist.

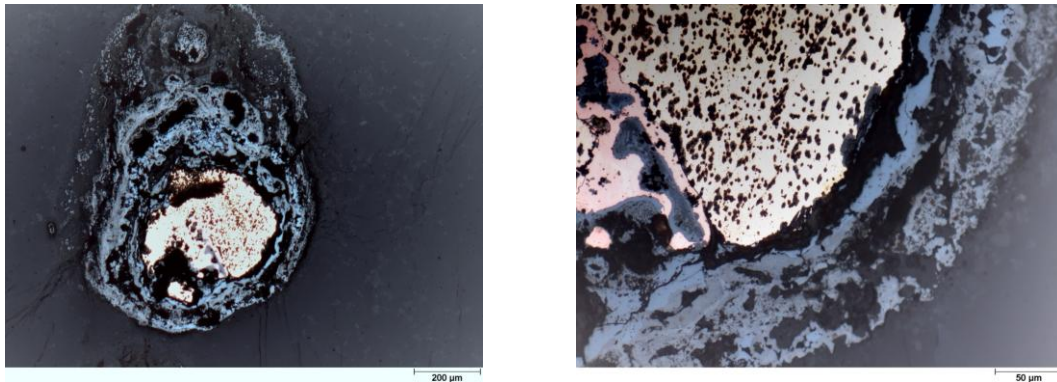


Abb. 5: Oxidation eines Kupferpartikels [14].

Hier ist ebenfalls die Bildung der Oxidschichten mit der Bildung von Hohlräumen verbunden. Des Weiteren ist auch hier zu erkennen, wie sich Oxidschichten in der Kupferphase bilden. Die Ergebnisse von EDX-Flächenanalysen zeigen, dass es sich bei der Kupferphase im Wesentlichen um Kupfer handelt, in dem sich kleinere Einschlüsse aus Schwefel befinden. Des Weiteren sind schwefelreiche Bereiche am unteren Rand des Partikels zu erkennen. Vor dem Hintergrund, dass Kupfer in der Natur in unterschiedlichster Art und Weise mit Schwefel vergesellschaftet vorkommt, ist hier die Verbindung zwischen Kupfer und Schwefel nicht überraschend. Aus der Flächenanalyse ist ebenfalls zu entnehmen, dass es sich bei der Oxidphase im Kupfer, im unteren linken Bereich im Wesentlichen um Aluminiumoxid (Al_2O_3) handelt.

6 Recyclingpotenziale von Metallen in MV-Schlacke

Zur Bewertung von Recyclingpotenzialen von Metallen in HMV-Schlacken wird im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten ein Bilanzierungsmodell erstellt, mit dem die Metallströme in einer Müllverbrennungsanlage und im Verlauf der Aufbereitung der Schlacke erfasst werden sollen. Das entwickelte Modell basiert dabei auf der in **Abb. 6** dargestellten Vorgehensweise und kommt z.B. zu Ergebnissen wie sie in **Abb. 7** dargestellt sind, wenn man davon ausgeht, dass aus der aufbereiteten Schlacke noch die Elemente Aluminium, Eisen, Kupfer, Zink und Zinn (ausgewählt durch das Setzen eines Hakens) zurückgewonnen werden können.

Aus entsprechenden Sortieruntersuchungen des Müll-Inputs in Müllverbrennungsanlagen ist festgestellt worden, dass in Bayern [15] im Durchschnitt 2,34% Metall in eine Müllverbrennungsanlage eingetragen werden, wobei von diesen 2,34% noch ca. 15% auf nichtmetallische Anhaftungen an den aussortierten Metallen entfallen, so dass die wirkliche reine Metallmenge mit 1,989% (*Metallgehalt im Müll-Input*) angenommen werden kann. Beim Verbrennungsprozess fallen aus 1 t Müll 241,4 kg trockene Schlacke an. Somit ergibt sich ein theoretischer Metallinhalt von 82,38 kg pro t trockener Schlacke (Abb.7), wenn in 1. Näherung die Metallgehalte in der Filterasche vernachlässigt werden.

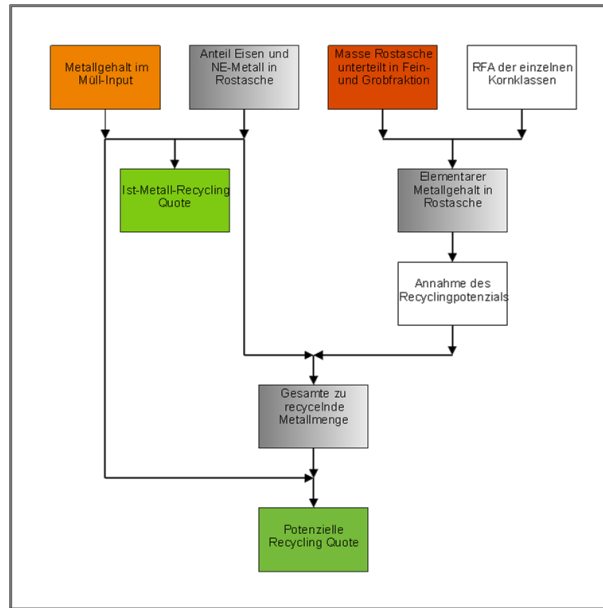


Abb. 6: Schema zur Berechnung von potenziellen Recyclingquoten.

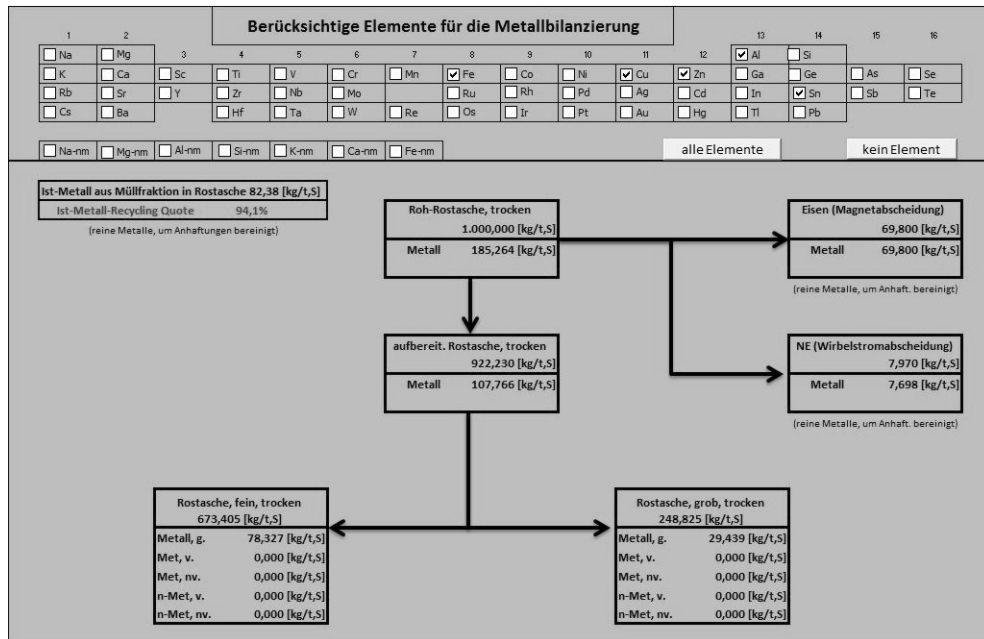


Abb. 7: Modell zur Berechnung von potenziellen Recyclingquoten aus HMV-Schlacken.

Im Verlauf der heute schon durchgeführten Schlackenaufbereitung werden im Mittel aus einer 1 t trockener Schlacke 69,8 kg Eisen und 7,698 kg NE-Metall (Summe 77,50 kg) über Magnet- und Wirbelstromtrennverfahren recycelt und dem Wertstoffkreislauf wieder zugeführt. Diese Menge entspricht nach Abb. 6 dem Anteil Eisen und NE-Metall in der Rostasche. Wird diese bereits heute recycelte Metallmenge zum Metallgehalt im Müll-Input in Relation gesetzt, so ergibt sich bereits heute eine Ist-Metall-Recycling-Quote von 94,1% (Abb.7).

Referent: Rüdiger Deike, Universität Duisburg-Essen | Vortrag: Möglichkeiten des Recyclings von HMV-Schlacke

Gemäß Abb. 6 lässt sich aus der *Masse Rostasche unterteilt in Fein- und Grobfaktion* und entsprechenden Röntgenfluoreszenzanalysen (*RFA der einzelnen Kornklassen*) ein *elementarer Metallgehalt in der Rostasche* ermitteln. Dieser Metallgehalt entspricht in Abb.7 der theoretischen Menge Metall (107,766 kg) die noch in der aufbereiteten trockenen Schlacke enthalten ist.

Im Weiteren muss jetzt durch entsprechende detaillierte Untersuchungen ein Recyclingpotenzial (*Annahme des Recyclingpotenzials* in Abb. 6) ermittelt werden. Da die Metalle in der Schlacke nicht alle metallisch vorliegen -wie z.B. Aluminium, dass zwar auch metallisch aber auch oxidisch in Form von Al_2O_3 vorliegt -, können die Metalle unter realen Bedingungen nicht vollständig zurückgewonnen werden. Die aus der aufbereiteten Schlacke unter realen Bedingungen noch zu recycelnden Metallmengen ergeben in Summe mit der Menge an Eisen und NE-Metall die bereits heute schon im Rahmen der Aufbereitung gewonnen werden, die *gesamte zu recycelnde Metallmenge* in Abb. 6. Wird diese Metallmenge in Relation zu der Metallmenge im Müll-Input gesetzt, so ergibt sich die potenzielle Recyclingquote.

Aus Abb. 7 ist zu entnehmen, dass es bei einer heutigen Ist-Recyclingquote von 94,1% in der Zukunft durchaus möglich ist, mit einer noch weitergehenden Rückgewinnung von Metallen aus der HMV-Schlacke eine Recyclingquote größer 100% zu erreichen. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass über die Schlacke auch Metalle, die in sehr fein verteilter Form vorliegen, potenziell zurückgewonnen werden können. Diese Metalle in fein verteilter Form, lassen sich durch Sortierungen des Mülls, wie sie im Rahmen von Untersuchungen zur Analyse des Metalleintrags durchgeführt werden, nur bedingt erfassen. Potenzielle zukünftige weitergehende Recyclingmaßnahmen sind allerdings unter der Prämisse zu bewerten, dass die Verwertung der mineralischen Fraktion weiterhin uneingeschränkt gewährleistet sein muss.

7 Zusammenfassung

Es ist heute in modernen Gesellschaften zur Maxime gesellschaftlichen Handelns geworden ist, den eigenen Zivilisationsmüll so weit wie möglich nicht mehr zukünftigen Generationen zu überlassen sondern ihn selbst und zeitgleich unter anderem in Müllverbrennungsanlagen zu verwerten. Vor dem Hintergrund drastisch gestiegener Metallpreise in den letzten 10 Jahren sind Recyclingprozesse heute eventuell wirtschaftlich zu betreiben, die in der Vergangenheit nicht wirtschaftlich betrieben werden konnten.

Unter Umständen sind heute Abfallstoffe, wie z.B. die mineralische Fraktion der HMV-Schlacke hinsichtlich der Metallgewinnung interessant, was sie in der Vergangenheit nicht war. Unter dem Aspekt weitere Recyclingpotenziale für Metalle aus den HMV-Schlacken abschätzen zu können, ist zu klären, wie die unterschiedlichen Kornfraktionen der mineralischen Fraktion hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung variieren und in welcher Form die Metalle in diesen Kornfraktionen vorliegen. Die Ergebnisse der vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass in den kleinen Kornfraktionen höhere Metallgehalte vorliegen.

Sollte es mit einer intelligenten und effektiven Aufbereitungstechnik möglich sein, noch weitere Metallmengen aus der HMV-Schlacke zurückzugewinnen zu können, so erscheint es zukünftig durchaus möglich im Rahmen der Müllverbrennung Recyclingquoten für Metalle größer 100% erreichen zu können,

da über die Schlacke auch Metalle, die in sehr fein verteilter Form vorliegen, potenziell zurückgewonnen werden können. Diese Metalle in fein verteilter Form, werden durch Sortierungen des Mülls, wie sie im Rahmen von Untersuchungen zur Analyse des Metalleintrags durchgeführt werden, nur bedingt erfasst und dementsprechend ist der gemessene Metalleintrag geringer als der tatsächlich Eintrag von Metallen über den Müll.

Wenn auch nicht alle Metalle aus der mineralischen Fraktion der HMV-Schlacke zurückgewonnen werden können, so lässt sich dennoch ein Recyclingpotenzial abschätzen. Allerdings sind zusätzliche wirtschaftliche Recyclingmaßnahmen unter der Prämisse zu bewerten, dass die Verwertung der mineralischen Fraktion weiterhin uneingeschränkt gewährleistet sein muss. Des Weiteren spielen die zukünftigen Metallpreise eine sehr wesentliche Rolle, wobei mittelfristig, wenn auch mit erheblichen temporären Schwankungen, sehr wahrscheinlich davon ausgegangen werden kann, dass die Metallpreise weiter steigen werden, da die Weltbevölkerung in Asien und anderen bevölkerungsreichen Schwellenländern in einem zunehmenden Maße an dem Konsum von Rohstoffen beteiligt ist und zukünftig auch weiterhin sein wird.

8 Literatur

- [1] De. Meadows, Do. Meadows, E. Zahn, P. Milling; *Die Grenzen des Wachstums*, Hamburg, Rowohlt Verlag, 1973.
- [2] Deike, R.; Ebert, D.; Warnecke, R.; Vogell, M.: *11. VDI Fachkonferenz Feuerung und Kessel-Belege und Korrosion in Großfeuerungsanlagen*, Bremen, 13.06.12
- [3] Wagner, M.; Huy, D.: *Commodity Top News No.24*, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
- [4] London Metals Exchange, www.LME.com.
- [5] Deike, R.: *4th International Cupola Conference*, Dresden, 14.-15.06.2012
- [6] World Steel Association, www.world-steel.org, 2012
- [7] L.Fey, *Turbulenzen am Stahlmarkt*, www.dbresearch.de, 19.07.2010
- [8] Deike, R.: *Giesserei-Rundschau*, 58 (5/6), S. 116-123, 2011
- [9] Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.de
- [10] Beck, R.; Kröger, W.: *Bayerische Landesamt für Umweltschutz*, 2005
- [11] Lichtensteiger, T.: *Geowissenschaften* 14, S.173-179, 1999
- [12] Riedel, H.: *VGB PowerTech* 84, S.42-48, 2004

Referent: Rüdiger Deike, Universität Duisburg-Essen | Vortrag: Möglichkeiten des Recyclings von HMV-Schlacke

- [13] Pfrang-Stotz, G.; Reichelt, J.: Müll und Abfall 5, S.262-268, 1999
- [14] Deike, R.; Ebert, D.: *6th CEWEP Congress 2012*, Würzburg, 06.-07.09.2012
- [15] LfU (Hrsg.): Restmüllzusammensetzung, Einflussfaktoren, Abhängigkeiten von lokalen abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen (EFRE-Ziel-2-Gebiete in Bayern). Augsburg, 2009