

NE-Metallpotenzial in Rostaschen aus Müllverbrennungsanlagen

Ronald Gillner, Thomas Pretz, Elinor Rombach, Bernd Friedrich

Die NE-Metallseparation aus Rostaschen gewinnt, unter anderem durch die steigenden NE-Metallschrott-Preise der letzten Jahre, immer mehr an Bedeutung. Für die Bewertung des kurzfristig verfügbaren NE-Metallpotenzials reicht es jedoch nicht, den theoretischen, chemisch/analytischen NE-Metallgehalt von Rostaschen zu bestimmen. Vielmehr geht es darum, das Potenzial der in der großindustriellen Praxis technisch gewinnbaren NE-Metallanteile zu ermitteln. Für diesen Zweck wurden in der vorliegenden Ausarbeitung rd. 160 t Rostaschen aus drei unterschiedlichen Müllverbrennungsanlagen (MVA) im Technikumsmaßstab (Materialdurchsatz: 500 kg/h) mit auf dem Markt verfügbaren Techniken aufbereitet, wobei die Prozessführung entsprechend der Aufgabenstellung NE-

Metallseparation auf bestmögliche Ressourceneffizienz ausgerichtet wurde. Die dabei abgetrennten Metallfraktionen (NE-Leichtgut, NE-Schwergut) wurden anschließend hinsichtlich ihrer Integration in konventionelle Gewinnungsverfahren metallurgisch bewertet. Auf diese Weise konnte die gesamte Wertschöpfungskette, von der Rohstoffquelle Rostasche bis hin zum Rohmetall bzw. marktfähigen Zwischenprodukt, mit entsprechender Potenzialermittlung erarbeitet werden.

Schlüsselwörter:

Rostasche – Aufbereitung – NE-Metallpotenzial – Metallgewinnung

Non-ferrous metal potential in bottom ashes of waste incinerators

Due to the increasing non-ferrous scrap metal prices in recent years the non-ferrous metal separation from bottom ashes is becoming more and more important. For the assessment of readily available nonferrous-metal potential it is not enough to determine the theoretical, chemical NF-metal content of bottom ashes. Rather it is necessary to determine the potential of the NF-metal portions technically profitable in the industrial practice. To determine this, test results from different access levels are being considered. The technical possible maximum yield of NF-metals from bottom ash has been determined through experiments in a pilot scale plant (throughput: 500 kg/h). According to the task of the

NF-metal separation, the process control has been focused on the best possible resource efficiency. The separated metal fractions (NF-metal light fraction, NF-metal heavy fraction) were then evaluated in terms of their integration into conventional metallurgical extraction processes. In this way the entire value chain could be compiled, through the source of raw material bottom ashes up to the metal and/or marketable intermediate product with appropriate potential.

Keywords:

Bottom ash – Preparation – Nonferrous-metal potential – Extractive metallurgy

Potentiel des métaux non-ferreux dans les cendres résiduelles des incinérateurs de déchets

Potencial de metales no ferrosos dentro de cenizas de fondo de incineradores de desechos

This is a peer-reviewed article.

1 Einführung

Seit Inbetriebnahme der Abfallverbrennungsanstalt Bulkerdeich in Hamburg im Jahr 1896, der ersten Müllverbrennungsanlage Deutschlands, haben sich die Anforderungen an die thermische Abfallbehandlung stetig verändert. Ging es zunächst um die sichere Beseitigung potenzieller Krankheitserreger im Abfall, so galt es bereits nach einigen Jahren, zusätzlich eine Reduzierung der Rauch-, Ruß- und Geruchsbelästigungen zu erreichen [1]. Aufgrund der 1993 erlassenen TA Siedlungsabfall und des dadurch seit Mitte

2005 geltenden Deponierungsverbots für unbehandelte Siedlungsabfälle wuchs der Stellenwert der Abfallverbrennung in der Siedlungsabfallbehandlung. Dies spiegelt sich zum einen im kontinuierlichen Ausbau der Müllverbrennungskapazitäten bei relativ konstantem Siedlungsabfallanfall wider. Zum anderen sind zwischen 1993 und 2005 deutschlandweit rd. 6,3 Milliarden € in den Ausbau neuer MVA bzw. in die Erweiterung bestehender MVA investiert worden. So stieg die Behandlungskapazität in Deutschland pro Kopf von 115 kg/E·a im Jahr 1990 auf 216 kg/E·a im Jahr 2007 [2-5].

Die Inputzusammensetzung der einzelnen MVA unterscheidet sich grundsätzlich voneinander. Deutschlandweit besteht jedoch der Abfallinput zu 85 Ma.-% aus Hausmüll und separat erfassten, hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen [6]. Da bei den direkt angelieferten Abfällen einer MVA in der Regel keine mechanischen Vorbehandlungen stattfinden, fallen die Outputströme ausschließlich nach dem Verbrennungsprozess an. Hierzu gehören sowohl verschiedene Rückstände aus der Rauchgasreinigung, wie Filterstaub, Kesselasche, Filtersalz und beladene Aktivkohle, als auch die Rostasche als fester Rückstand der Verbrennung. Je nach Abfallzusammensetzung und eingesetzter Verfahrenstechnik macht diese Rostasche einen Anteil von 20 bis 35 Ma.-% des Materialinputs bzw. rd. 85 Ma.-% der Outputströme aus [7, 8]. Während in deutschen MVA im Jahr 2007 bei der Behandlung von rd. 17,8 Mio. t Siedlungsabfällen rd. 4,45 Mio. t Rostasche anfielen [6], stieg diese Menge im Jahr 2009 auf rd. 4,74 Mio. t Rostasche [7].

Stofflich setzen sich derartige Rostaschen aus (Erd-)Alkaliverbindungen, Chloriden, Silikaten und Sulfaten sowie Eisen- und Nichteisenmetallen (NE-Metalle) und deren Verbindungen zusammen. In der Literatur werden hierzu folgende Schwankungsbreiten angegeben [8, 9]:

- 1 bis 5 Ma.-% un- oder teilverbrannte Rückstände (zur Nachverbrennung),
- 7 bis 10 Ma.-% Fe- und NE-Metallschrott,
- 85 bis 90 Ma.-% mineralische Fraktion.

Die „mineralische Fraktion“, welche mengenmäßig am bedeutendsten ist, besteht größtenteils aus Glas, Keramik, Porzellan und Hausbrandasche, größeren Aschebrocken sowie bauschuttähnlichen Bestandteilen wie Steinen, Ziegeln und Beton. In der Stoffgruppe „un- oder teilverbrannte Rückstände“ finden sich z.B. Papier-, Kunststoff-, Holz- und Textilbestandteile wieder. Die Stoffgruppe „Fe- und NE-Metallschrott“ besteht vorwiegend aus Dosenschrott, Verschlusskappen, Aluminium (diverse Legierungen), Kupfer, Messing sowie diversen metallischen Produkten aus häuslichen Renovierungsarbeiten wie z.B. Wasserhähne und Werkzeugschlüssel.

2 Aufbereitung der Rostasche

Neben den Mindestanforderungen an die Aufbereitung von Rostasche aus MVA, die durch den Gesetzgeber definiert werden, ergeben sich aufgrund unterschiedlicher Verwertungsmöglichkeiten einzelner Stoffgruppen Anforderungen an die Aufbereitung der Rostasche. Diese Anforderungen werden in diesem Fall von der mengenmäßig bedeutendsten Stoffgruppe abgeleitet, der „mineralischen Fraktion“. Dies hatte insbesondere bei der Planung von Rostaschenaufbereitungsanlagen in der Vergangenheit die Folge, dass die Installation von NE-Metall-Separationstechnik eine untergeordnete Bedeutung hatte.

2.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Hinsichtlich der Behandlung der Rostasche aus MVA schreibt § 7 der 17. BImSchV eine ordnungsgemäße Verwertung, soweit technisch möglich und zumutbar, vor. Des

Weiteren sind Filterstäube und Kesselaschen getrennt von der Rostasche zu erfassen. Die Anforderungen an die Rostaschenaufbereitung sind in dem Merkblatt 19 „Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle“ von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) dargestellt [10]. Demnach dürfen Rostaschen aus MVA nur verwertet werden, wenn sie mindestens in die drei Stoffgruppen

- mineralische Anteile,
- unverbrannte Grobteile und
- Metallschrott

getrennt werden. Die Aufbereitung des mineralischen Anteils muss anschließend den Anforderungen des gewählten Verwertungsweges entsprechen. Dabei gilt es insbesondere, die Gehalte an Schwermetallen sowie an organischen und löslichen Stoffen zu minimieren. Aufgrund diverser Einflussmöglichkeiten auf die Rostaschenzusammensetzung und -qualität sind wesentliche technische Maßnahmen zur Verbesserung der Rostaschenqualität im LAGA Merkblatt 19 beschrieben. Dabei wird zwischen technischen Maßnahmen vor und während der Behandlung unterschieden. Im Hinblick auf die Metalle gilt es lediglich, die Eisenfraktion zu separieren. Bezüglich der NE-Metalle werden keine Angaben gemacht [13]. Allerdings können im Zuge der Verwertung der mineralischen Fraktion Anforderungen z.B. aus dem Bundes-Boden-Schutz-Gesetz bzw. in Zukunft durch die Ersatzbaustoffverordnung resultieren.

2.2 Rostaschenaufbereitung: IST Zustand

In der Praxis variiert die Aufbereitungstiefe der einzelnen Rostaschenaufbereitungsanlagen, wobei sich insbesondere Unterschiede im Bereich der Metallseparation, Windsichtung und Zerkleinerung finden. So ist z.B. in Nordrhein-Westfalen die Fe-Metallseparation durch Magnetsysteme in jeder Anlage obligatorisch, die technische Separation von NE-Metallen wird jedoch nur in sechs von zehn Anlagen realisiert [11]. Dabei ist anzunehmen, dass gröbere NE-Metalle in den meisten Anlagen durch eine händische Sortierung erfasst werden, während NE-Metalle in der Korngröße 0 bis 80 mm durch technische Verfahren abgetrennt werden müssen. Eine Mitgliederbefragung der „Interessengemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.“ (ITAD) ergab, dass im Jahr 2009 rd. 0,67 Ma.-% NE-Metallschrott aus der Rostasche separiert wurden, was einer Menge von rd. 32 000 t entspricht [7].

Stand der Technik bei der Separation von NE-Metallen aus Rostaschen ist die Wirbelstromscheidung. Diese Technik wurde zum Ende der 90er-Jahre in Rostaschenaufbereitungsanlagen in der Regel in einem einstufigen Verfahren integriert. Das heißt, dass die Wirbelstromscheider teilweise in einer relativ hohen Korngrößenbandbreite von 0 bis 80 mm eingesetzt werden (Abbildung 1).

Wirbelstromscheider sind Aggregate, die im Recyclingbereich zur selektiven Abtrennung von NE-Metallen wie Aluminium und Kupfer eingesetzt werden. Die Wirbelstromscheidung basiert darauf, dass in magnetischen

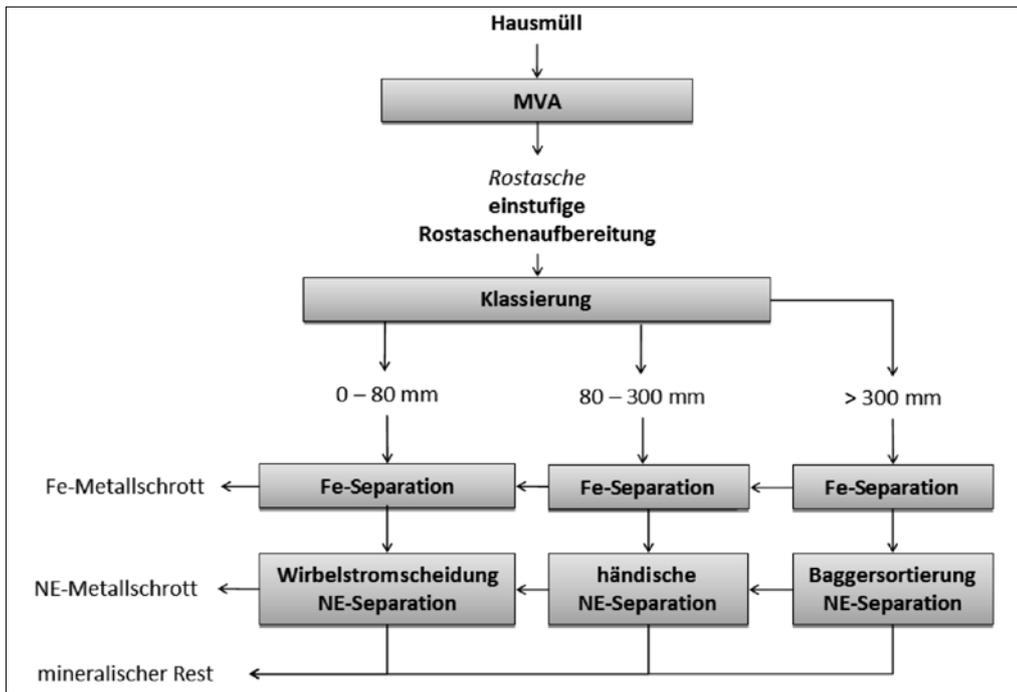


Abb. 1: Vereinfachte, schematische Darstellung einer einstufigen Rostaschenaufbereitung

Wechselfeldern nur in elektrisch gut leitfähigen Körpern eine Spannung induziert wird. Hierdurch kommt es zu einem Stromfluss auf in sich geschlossenen Pfaden, den so genannten Wirbelströmen. Die Wirbelströme bauen ein eigenes Magnetfeld mit zum Erregerfeld gleichgerichteter Polung auf. Die abstoßende Kraft der beiden Felder wird dazu verwendet, eine Trennung nicht magnetisierbarer Metallteile von schlecht leitfähigen Materialien durch Verlängerung der Wurfparabel zu bewirken. Eine faserverstärkte Kunststoffrommel, in der ein schnell umlaufendes Polrad eingebaut ist, wird als Kopftrommel eines Förderbandes verwendet. Das Polrad, welches je nach Anforderung konzentrisch oder exzentrisch achsparallel eingebaut ist, wird mit Permanentmagneten ausgerüstet, die mit wechselnder Polarität eingearbeitet sind. Das schnell laufende Polrad erzeugt in den NE-Metallen einen Wirbelstrom, dessen Magnetfeld zum induzierenden Feld gleichgerichtet ist.

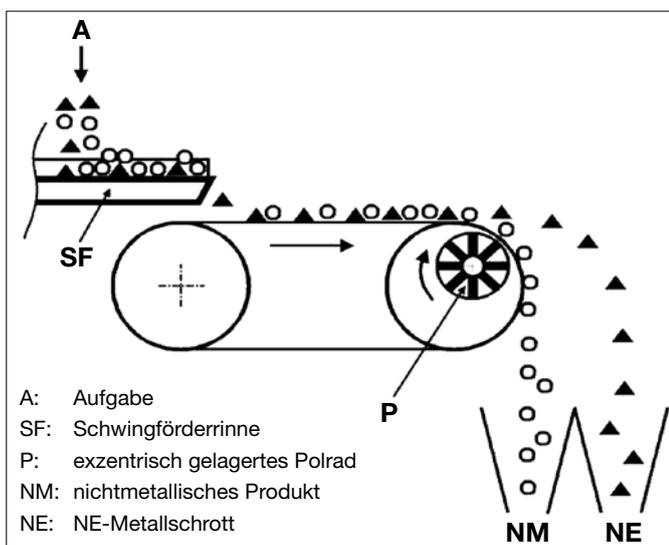


Abb. 2: Schematischer Aufbau eines Wirbelstromscheiders mit exzentrischem Polrad [12]

Durch diese Abstoßung ändert sich die Wurfparabel der NE-Metalle. Diese werden daher weiter als der Reststrom geworfen und können mit Hilfe eines Trennscheitels separat erfasst werden [13]. Der schematische Aufbau eines Wirbelstromscheiders ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Zusammensetzung der erzeugten NE-Metallschrotte aus Rostaschen variiert je nach Art des Inputs in die MVA, der Ofenführung und der Aufbereitung. Generell gilt jedoch, dass neben nichtmetallischen Bestandteilen NE-Metallpartikel partiell oder völlig aufgeschmolzen sein können und mit mineralischen Bestandteilen in Folge von Verschmelzung bzw. Versinterung im Verbund im NE-Metallschrott vorliegen [14]. Der Metallgehalt des NE-Metallschrottes kann zwischen 35 Ma.-% und 85 Ma.-% liegen. Eine mittlere Zusammensetzung lässt sich wie folgt zusammenfassen [6]:

- Aluminium 5 bis 70 Ma.-%
- Eisen 5 bis 11 Ma.-%
- Schwermetalle (Kupfer, Messing, etc.) 4 bis 15 Ma.-%
- VA-Stahl <6 Ma.-%
- Mineralik 15 bis 50 Ma.-%

3 Effizienzsteigerung der Rückgewinnung von NE-Metallen aus Rostasche

Die Bewertung des NE-Metallpotenzials aus Rostaschen wird im Folgenden auf Grundlage der technischen Separationsmöglichkeiten ermittelt. Für diesen Zweck wurden rd. 160 t Rostasche aus drei verschiedenen MVA mit dem Fokus der NE-Metallseparation gesondert aufbereitet. Anschließend wurde der separierte NE-Metallschrott weiter aufkonzentriert und metallurgisch bewertet.

3.1 Angepasste Wirbelstromscheidung der Rostasche

Beim Wirbelstromscheider ist ein enges Körnungsband bezüglich der Reinheit des NE-Metallprodukts von Vorteil.

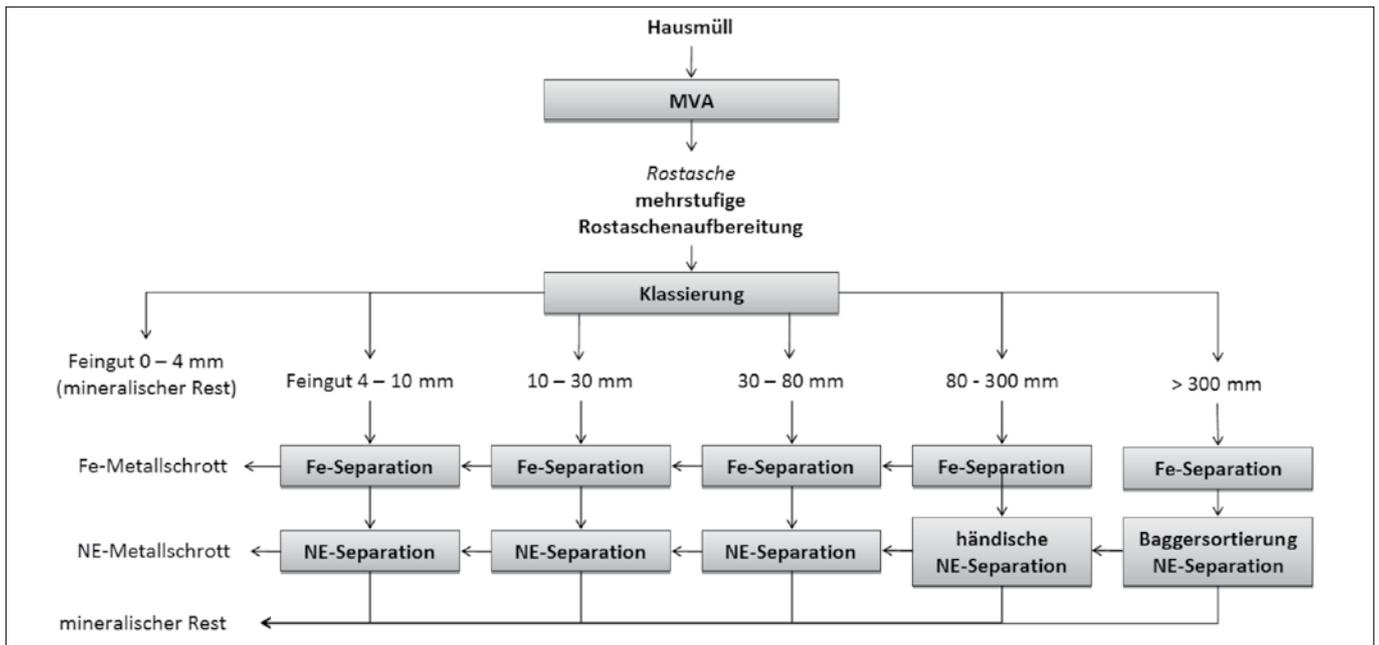


Abb. 3: Vereinfachte, schematische Darstellung einer mehrstufigen Rostaschenaufbereitung

Da ein Wirbelstromscheider die Abwurfparabel stromleitender Materialien verändert, ist für ein reines Produkt bei hohem Ausbringen eine gleichmäßige Abwurfparabel der nicht stromleitenden Materialien entscheidend. Eine gleichmäßige Abwurfparabel ist jedoch von der Korngröße jeder einzelnen Stoffgruppe abhängig, so dass sich eine Körnungsbandbreite von 1 : 3 (unteres Korn : oberes Korn) technisch und wirtschaftlich als optimal etabliert hat. Grundsätzlich wird mit der Wahl der Körnungsbandbreite die Höhe des Wertstoffausbringens und in dessen Konsequenz der Störstoffanteil im NE-Metallschrott beeinflusst [13]. Dies wiederum bedeutet, dass die Rostaschenaufbereitung mit einer mehrstufigen NE-Metallseparation ausgerüstet sein muss, um das vorhandene Potenzial an NE-Metallen aus Rostaschen nutzen zu können. In Ab-

bildung 3 ist das Grundprinzip einer mehrstufigen Rostaschenaufbereitung dargestellt.

In Technikumsversuchen des I.A.R. wurde die Rostaschenaufbereitung analog dem Schema der Abbildung 3 mit einem Durchsatz von 500 kg/h durchgeführt. Um die Unterschiede des NE-Metallschrottausbringens unterschiedlicher Verfahrenstechniken zu verdeutlichen, wird im Folgenden die NE-Metallseparation einer einstufigen und einer mehrstufigen Rostaschenaufbereitung miteinander verglichen [13].

In Abbildung 4 ist die Körnungslinie einer gemittelten Rostaschenprobe der Versuchsreihe abgebildet. Des Weiteren sind zwei mittels Wirbelstromscheider abgetrennte NE-Metallschrotte aus einer Rostaschenaufbereitung dargestellt. Die NE-Metallschrotte wurden dabei auf zwei

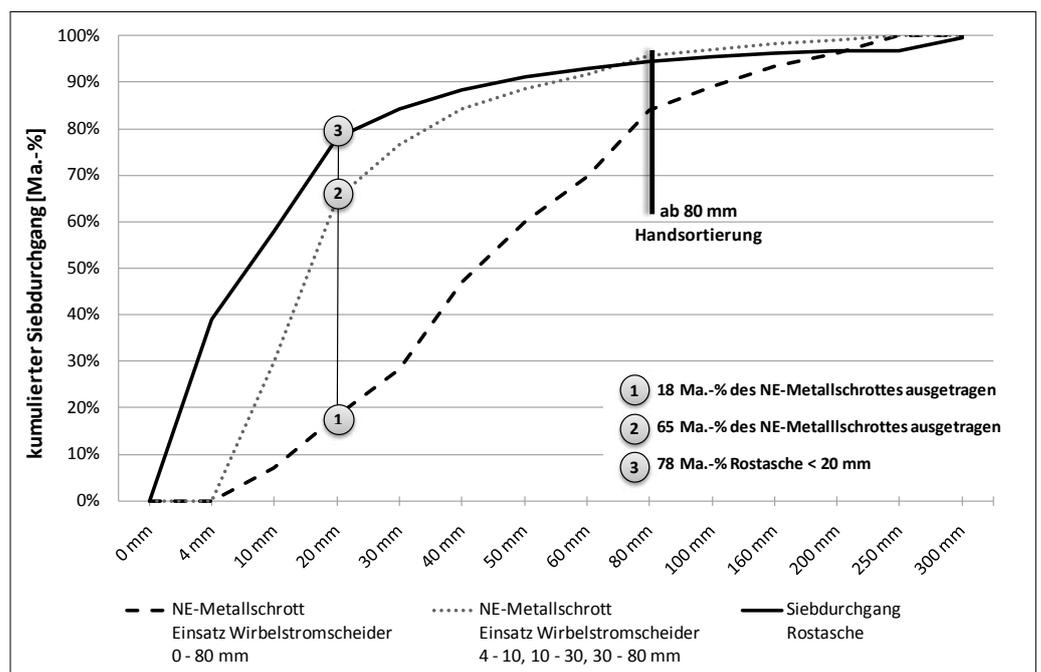


Abb. 4: Kumulierte Siebdurchgangskurven für Rostasche und zwei durch Wirbelstromscheidern erzeugte NE-Metallschrotte aus der Rostaschenaufbereitung [13]

unterschiedlichen Weisen aus der Rostasche separiert. Aufgegeben wurde zum Einen eine Körnung von 0 bis 80 mm (einstufige Rostaschenaufbereitung). Des Weiteren ist die Kornverteilung eines NE-Metallschrottes abgebildet, der aus einer vorklassierten Aufgabe gewonnen wurde (mehrstufige Rostaschenaufbereitung). Bei dem Vergleich wird deutlich, dass die Behandlung der Rostasche in einem engen Korngrößenspektrum, also in einem mehrstufigen Verfahren, eine gleichmäßigere NE-Metallschrottabtrennung gewährleistet. So enthält der abgetrennte NE-Metallschrott bei der Aufgabe der Körnung 0 bis 80 mm nur geringe Anteile der NE-Metalle der Korngröße 0 bis 10 mm, wohingegen bei der kornklassenoptimierten Wirbelstromscheidung ein in Summe um den Faktor 4 erhöhter Austrag dieses Korngrößenspektrums erfolgt.

Der in Abbildung 4 dargestellte kumulierte Siebdurchgang macht deutlich, dass durch eine Anpassung des Körnungsbandes ein erhöhtes NE-Metallschrottausbringen insbesondere in den Korngrößensklassen 4 bis 10 und 10 bis 30 mm möglich ist. Dadurch kann in Summe in diesen Korngrößensklassen ein um bis zu 90 % höheres Ausbringen erreicht werden, als bei der Separation eines weiten Körnungsbandes von 0 bis 80 mm. Hierdurch wird das Gesamt-NE-Metallschrottausbringen wesentlich erhöht, da die Korngrößen <20 mm etwa 80 Ma.-% der Rostasche ausmachen. Beim direkten Vergleich einer einstufigen und mehrstufigen Rostaschenaufbereitung ist im Untersuchungsrahmen eine Erhöhung des NE-Metallschrottausbrings von zu verzeichnen. Das bedeutet, dass der Anteil an NE-Metallschrott in der Rostasche von 0,67 Ma.-% auf 1,8 Ma.-% gesteigert werden könnte. Im Technikumsmaßstab wurde dabei ein NE-Metallgehalt im NE-Metallschrott von rd. 75 Ma.-% (direkt hinter dem Wirbelstromscheider) ermittelt, so dass für eine Übertragung dieser Werte auf einen industriellen Maßstab ein NE-Metallgehalt von rd. 70 Ma.-% angenommen wird (Fehlaustrag von mineralischer Fraktion ausgelöst z.B. durch Verschlechterung des Wirkungsgrades einer vorgeschalteten Klassierung).

Insgesamt zeigen die differenzierten Rostaschenuntersuchungen aus drei Rostaschenproben unterschiedlicher Herkunft sehr deutlich, dass ein verbessertes Ausbringen an NE-Metallen durch eine entsprechende Eingrenzung der Korngrößensklassen erreicht werden kann. Die Wahl der Korngrößensklassen steht dabei dem Verwertungszweck der mengenmäßig bedeutendsten Stoffgruppe „mineralische Fraktion“ nicht im Wege, sondern kann ggf. sogar zweckmäßig sein (z.B. bei einer Verwertung im Straßenbau).

Neben dem häufig nur einstufigen Rostaschenaufbereitungsverfahren sind außerdem folgende Ursachen für die derzeit in der Praxis nur unvollständige Ausschöpfung des NE-Metallpotenzials aus Rostaschen bzw. in MVA behandelten Hausmüll zu nennen [13]:

- Oxidationsverluste während der Abfallverbrennung, z.B. Aluminiumfolie,
- Reduktion der Partikelgröße durch die Verbrennung, so dass einige NE-Metalle im Feingut 0 bis 4 mm vorliegen, welches aufbereitungstechnisch nicht erfasst wird.

3.2 Weitergehende Aufbereitung des separierten NE-Metallschrottes

Da Rostaschen in Deutschland in der Regel über einen Nassentschlacker aus dem Feuerraum der MVA geführt werden, sind die aus der Rostasche separierten NE-Metalle mit einer grauen, teils mineralischen Schicht überzogen. In Abbildung 5 ist NE-Metallschrott aus der zuvor beschriebenen NE-Metallschrottseparation abgebildet, wobei deutlich zu erkennen ist, dass keine blanken Metalloberflächen vorliegen.

Um die störenden Anhaftungen von den NE-Metallen zu entfernen, wurde der NE-Metallschrott zunächst in einer Prallmühle aufgeschlossen. Diese Aufschlusszerkleinerung sollte idealerweise die Korngröße der Metalle nicht herabsetzen, da es durch die dabei entstehende Oberflächenvergrößerung zu Oxidationsverlusten in der weitergehenden metallurgischen Behandlung (Schmelze) kommt, sondern lediglich Verbunde und mineralische Anhaftungen lösen. Aufgrund der spröden Stoffeigenschaften der mineralischen Anhaftungen und den duktilen Stoffeigenschaften der NE-Metalle konnte durch die gewählte Prallbeanspruchung ein sichtbarer Aufschluss erfolgen. In Abbildung 6 ist der NE-Metallschrott nach der Prallbeanspruchung



Abb. 5: NE-Metallschrott der Korngrößen 4 bis 10 mm nach Wirbelstromscheidung (20-fache Vergrößerung)



Abb. 6: NE-Metallschrott der Korngrößen 4 bis 10 mm nach weitergehender Aufschlusszerkleinerung durch eine Prallmühle (20-fache Vergrößerung)

abgebildet, wobei die mineralische Fraktion durch eine Siebung bei 2 mm abgetrennt wurde.

Die anschließende Bewertung ergab einen NE-Metallgehalt von rd. 90 Ma.-% aus dem aus Rostaschen erzeugten NE-Metallschrott bzw. eine deutliche Aufkonzentrierung der NE-Metallgehalte um weitere 20 %.

Eine möglichst vollständige und damit effektive Verwertung des NE-Metallschrottes kann nur durch eine weitergehende Trennung in ein NE-Schwergut und ein NE-Leichtgut realisiert werden. Vor dem Hintergrund der hier vorliegenden Untersuchungen ist dabei zu berücksichtigen, dass NE-Metallschrott aus Rostasche mit rd. 90 Ma. % in der Korngrößenklasse von 0 bis 30 mm vorliegt (vgl. Abbildung 4) und somit manuelle Sortiertechniken ausgeschlossen werden können.

Konventionell findet die weitergehende Aufbereitung in der Regel durch eine Schwertrübescheidung (Schwimm-Sink-Trennung) statt. Durch diese Form der Aufbereitung kann Aluminium von Schwermetallen wie Kupfer und Zink getrennt werden. Allerdings kann es bei dieser Form der Aufbereitung zu Fehlausträgen, z.B. durch in Metallteilen eingeschlossene Luft, Schwermetall-/Leichtmetallverbunde oder anhaftende Fremdbestandteile kommen. Des Weiteren erfordert die Schwertrübescheidung eine aufwändige Zusatzausrüstung zur Regenerierung der Trübe, also des Trennmediums. In ihrer Sortierung ist die Schwertrübescheidung limitiert, da die maximalen Trenndichten auf ungefähr 3,4 g/cm³ (mit sog. Ferrosilizium-Schwertrübe) begrenzt sind. Daher ist durch die Schwertrübescheidung lediglich die Separation in ein Leichtmetallgemisch (<2,7 g/cm³, Aluminium) und in ein Schwermetallgemisch (>3 g/cm³, Buntmetalle) möglich.

Als technische Alternative kommen sensorgestützte Sortiersysteme in Frage, wie sie z.B. in der Elektronikschrottaufbereitung zum Einsatz kommen. Für den Einsatz der notwendigen Identifikationssysteme müssen die typischen Charakteristika des NE-Metallschrottes aus Rostasche berücksichtigt werden (graue Färbung, Metalle weisen Oxidationsschicht auf, Anhaftungen von mineralischen Bestandteilen, etc.). Weitere Besonderheit des NE-Metallschrottes ist die Form der Metalle, die in der Regel als rollfähig bezeichnet werden kann. Erste Technikumsversuche des I.A.R. mit sensorgestützten Sortiergeräten (Röntgendetektion und kombinierte Sensorik) zeigen vielversprechende Ergebnisse. So ist bereits, neben der Sortierung in ein NE-Leichtgut und NE-Schwergut, auch eine teilweise differenzierte Sortierung des Gemisches möglich (Tabelle 1).

Tab. 1: Zusammensetzung des NE-Metallschrottes aus Rostaschen der Korngrößen 10 bis 30 mm

	Al [%]	Cu [%]	Zn [%]	Si [%]	Pb [%]	Fe [%]	Sn [%]	Ni [%]	Mn [%]
NE-Metallschrott nach mehrstufiger Rostaschenaufbereitung									
Gemisch*	69,5	14,1	5,3	1,0	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1
NE-Metallschrott nach mehrstufiger Rostaschenaufbereitung, Prallmühlenseparierung und sensorgestützter Sortierung									
NE-leicht	96,0	0,5	0,7	1,9	0,1	0,5	<0,1	<0,1	0,2
NE-schwer	2,8	69,4	24,8	0,1	1,8	0,3	0,4	0,2	<0,1
* Anteil an Mineralik: 29,8 %									

Im Folgenden sind die metallurgischen Bewertungsergebnisse der durch diese innovative Verknüpfung verschiedener Aufbereitungstechniken erzeugten Zwischenprodukte NE-Leichtgut und NE-Schwergut detailliert aufgeführt.

3.3 Metallurgische Verwertung von NE-Metallschrott aus Rostaschen

Um die Möglichkeiten einer technisch effizienten Nutzbarmachung der abgetrennten Metallfraktionen (NE-Leichtgut, NE-Schwergut) durch metallurgische Prozesstechnik auszuloten, wurden am IME erste erfolgversprechende Schmelzversuche in einem Labor-Vakuuminduktionsofen (Maßstab: <5 kg) durchgeführt. Zur Ermittlung der spezifischen Metallausbeuten wurde in Tongrafitteglern unter Argon-Schutzgas gearbeitet und die erzeugten Metallphasen nach vollständigem Aufschmelzen in Stabkochen vergossen. Für eine Bewertung der Recyclingfähigkeit des Al-reichen Leichtgutes wurden zusätzlich Probeschmelzen unter handelsüblichem Schmelzsalz mit ca. 1,5 Massen-% CaF₂-Zugabe bei einem Salzfaktor von eins durchgeführt. Ergänzt wurden diese Arbeiten durch einen ersten Orientierungsversuch zum Koaleszenzverhalten der feinkörnigen Aluminium-Partikel in Salzschnmelzen (Maßstab: <50 g).

3.3.1 NE-Leichtgut

Eine metallurgische Verwertung des NE-Leichtgutes mit einem Aluminiuminhalt oberhalb von 95 % dürfte innerhalb der konventionellen Aluminiumrecyclingindustrie möglich sein. Sowohl Art als auch Menge der enthaltenen Verunreinigungen liegen im tolerierbaren Bereich. Die im Labor unter Salzzusatz ermittelte Al-Schnmelzausbeute liegt im Mittel bei 91 % und damit um etwa 10 % höher als die unter gleichen Bedingungen ermittelte Al-Schnmelzausbeute ohne Salzzusatz (83 %, Abbildung 7). Dieses

	mittlere Gehalte der Al-Umschnmelzproben [%]		
	ohne Salz	mit Salz	
Al	95,9	93,8	
Si	2,3	2,5	
Zn	0,8	1,4	
Cu	0,6	1,4	
Fe	0,4	0,5	
Mn	0,1	0,2	
Mg	n.b.	0,1	
Pb	0,1	0,1	
mittlere Al-Schnmelzausbeute η_{Al}			
	83 %	91 %	

Abb. 7: Ergebnisse der Umschnmelzversuche von NE-Leichtgut

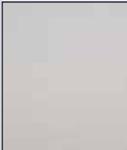
Kornklasse	<2,5 mm	2,5-4,5 mm	4,5-6 mm	6-7 mm	>7 mm	Σ
Inputmaterial (NE-Leichtgut)						
Anzahl	40	8	9	8	2	67
Gewicht	0,504 g	0,524 g	1,839 g	2,765 g	0,961 g	6,593 g
Aussehen						
Outputmaterial (nach Tastversuch zum Koaleszenzverhalten)						
Anzahl	15	0	0	0	3	18
Gewicht	0,212 g	0 g	0 g	0 g	6,010 g	6,222 g
Aussehen						

Abb. 8:
Durch Salzkonfektionierung erzielter Effekt der Koaleszenz von Al-Partikeln

Ergebnis prädestiniert einen Einschmelzprozess in einem industriellen Salzbadofen, durch den in der Praxis je nach Ausgangsmaterial, Ofentyp und Salzfaktor Al-Schmelzausbeuten zwischen 85 und 95 % erzielt werden.

Um dies zu untermauern, sind weitere Untersuchungen erforderlich. Insbesondere wegen des hohen Feinanteils des NE-Leichtguts ist zu prüfen, inwieweit sich die Al-Schmelzausbeute durch angepasste Vorbehandlungsschritte (Agglomeration) oder durch Variation der Schmelzsalzzusammensetzung im Prozess selbst weiter optimieren lässt. In diesem Zusammenhang sei auf aktuelle Grundlagenuntersuchungen des IME in einem widerstandsbeheizten Labor-Tiegelofen (Maßstab: <50 g und 500 g) sowie in einem Technikums-Drehtrommelofen (Maßstab: 25 kg) hingewiesen, die sich mit der Verbesserung der Koaleszenz von Al-Tröpfchen durch Salzoptimierung beim Aluminiumrecycling beschäftigten [15, 16]. So konnte nachgewiesen werden, dass beim Umschmelzen bestimmter Schrottlegerungstypen neben der Schmelztemperatur und der Haltezeit insbesondere die Zusammensetzung des verwendeten Schmelzsalzes (Fluoridinhalt und -bindung) ein Zusammenfließen der in der Schlacke feinverteilten Al-Partikel beeinflusst. Durch die erzielbare teils sehr deutliche Vergrößerung der Tropfendurchmesser kann der Absatzvorgang flüssiger Al-Partikel innerhalb der Salzschlacke beschleunigt oder sogar erst ermöglicht werden, wodurch sich letztlich auch die Al-Schmelzausbeute erhöht. Diese positive Einflussnahme konnte in einem ersten Tastversuch mit NE-Leichtgut generell bestätigt werden (Abbildung 8).

3.2.2 NE-Schwergut

Wegen der inhomogenen Verteilung verschiedener Legierungspartikel (z.B. Messing, Kupfer) innerhalb des NE-Schwergutes zeigten die Umschmelzversuche dieser Buntmetall-reichen Fraktion (Summe Cu+Zn >90 %) leicht voneinander abweichende Ergebnisse. So führte ein sinkendes Cu/Zn-Verhältnis durch die beobachtete gesteigerte Zinkabdampfung bei gleichem Schlackenanteil zu einer leichten Verminderung der Metallausbeute (Tabelle 2).

Tab. 2: Ergebnisse der Umschmelzversuche von NE-Schwergut

	Gehalte der Buntmetall-Umschmelzproben in [%]	
	Cu/Zn ca. 2,5	Cu/Zn ca. 3
Cu	68,7	72,3
Zn	26,0	22,6
Pb	2,0	1,2
Al	1,9	2,9
Fe	0,6	0,2
Sn	0,4	0,3
Ni	0,2	0,2
Si	0,03	0,15
Metallausbeute $\eta_{\text{Buntmetall}}$: 78 %		Metallausbeute $\eta_{\text{Buntmetall}}$: 81 %

Auf Basis der vorliegenden Untersuchungen dürfte das NE-Schwergut für eine Integration in konventionelle Kupferhütten geeignet sein. Bedingt durch den relativ hohen metallischen Anteil in Verbindung mit Zinkgehalten um 25 % bietet sich hierfür beispielsweise der Sekundärkupferkonverter vom Typ Peirce-Smith oder der TBRC (Top Blown Rotary Converter) an. In beiden Fällen werden i.d.R. um 95 % des Kupfers im Kathodenkupfer sowie um 60 % des Zinks in einem marktfähigen Mischoxidstaub ausgebracht. Wegen der Feinkörnigkeit des NE-Schwergutes ist für dessen Recycling eine angepasste Chargiermethode erforderlich. So ist bekannt, dass durch Lanzensysteme, die unmittelbar in das Schmelzbad eintauchen, Verstaubungsverluste von staubförmigen Sekundärrohstoffen deutlich vermindert werden können.

Vor dem Hintergrund zukünftiger Ressourcenknappheit wurden ausgewählte Umschmelzproben zusätzlich auf strategische Spurenmetalle untersucht. Sicherlich lassen die entsprechenden Ergebnisse aus Tabelle 3 aufgrund der geringen Probenmengen in Verbindung mit der Inhomogenität des NE-Schwergutes nur bedingt Rückschlüsse auf das entsprechende Recyclingpotenzial zu. Allerdings scheint bei nachgewiesenen Silbergehalten in der Größenordnung um bis zu 0,5 % eine Verwertung auch unter prozess-ökonomischen Gesichtspunkten interessant.

Tab. 3: Mittlere Nebenmetallgehalte der Umschmelzproben von NE-Schwergut

Cr [%]	Co [%]	Ag [%]	Mo [%]	Sb [ppm]	Se [ppm]	Au [ppm]	Nb [ppm]	Te [ppm]	Pd [ppm]
<3	<1,5	<0,5	<0,5	<150	<100	<50	<50	<10	<5

3.4 Rostasche als potenzielle Ressource für NE-Metalle

Durch die konventionelle Aufbereitung von Rostasche wurden im Jahr 2009 deutschlandweit rd. 32 000 t NE-Metallschrott aus Rostaschen separiert [7]. Bei einer Aufrüstung dieser Aufbereitungsanlagen mit mehrstufiger NE-Metallseparationstechnik ist mit einem NE-Metallschrottpotenzial von rd. 85 000 t pro Jahr zu rechnen. Der NE-Metallgehalt wird dabei, unter Berücksichtigung der Übertragung der Untersuchungsergebnisse auf einen industriellen Maßstab, mit rd. 70 Ma.-% angesetzt (Ergebnisse im Technikumsmaßstab < 80 Ma.-%). Dieses Potenzial bezieht sich auf Rostaschen, die nach dem Verbrennungsprozess von Hausmüll in der MVA einem Nassentschlacker zugeführt werden. Aktuelle Ergebnisse bei der Aufbereitung von trockener Rostasche weisen jedoch ein noch besseres Ausbringen und höhere Reinheiten auf [17]. Des Weiteren wird in dieser Potenzialermittlung der Feinkornanteil 0 bis 4 mm nicht berücksichtigt. Somit ist ein NE-Metallschrottpotenzial von 85 000 t/a in Deutschland als untere Grenze anzusehen, das aus aufbereitungstechnischer Sicht, mit der auf dem Markt zur Verfügung stehenden Technik, gut nutzbar ist. Die Umsetzung einer aufwändigeren Verfahrenstechnik wird durch die seit 2009 wieder ansteigenden Preise für NE-Metallschrott gefördert. Dies bestätigt auch die Interessensgemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen (ITAD), die in einer aktuellen Umfrage eine verstärkte Investitionsbereitschaft im Bereich der Rostaschenbehandlung beobachtet [18].

Der durch mehrstufige Wirbelstromscheidung erzeugte NE-Metallschrott kann durch eine weitergehende Aufbereitung in einer Prallmühle von mineralischen Anhaftun-

gen gereinigt werden, so dass eine Aufkonzentrierung der NE-Metalle durch eine selektive Zerkleinerung mit nachgeschalteter Absiebung der mineralischen Fraktion auf rd. 90 Ma.-% realisiert werden kann. Durch eine anschließende sensorgestützter Sortierung konnte der aufkonzentrierte NE-Metallschrott in ein NE-Schwergut und ein NE-Leichtgut getrennt werden. Dabei ist in den Technikumsversuchen ein Verhältnis von rd. 70 Ma.-% Leichtgut und 30 Ma.-% Schwergut ermittelt worden. Auf der Basis erster Laborschmelzversuche mit diesen Aufbereitungsprodukten sollte es in der großindustriellen Praxis möglich sein, durch konventionelle Metallgewinnungsverfahren rd. 90 % des Al-Inhaltes, rd. 95 % des Cu-Inhaltes und über 55 % des Zn-Inhaltes in Form hochwertiger Metallprodukte auszubringen. Zusammen mit den Daten aus deutschen Müllverbrennungsanlagen lässt sich hieraus für das Jahr 2009 ein NE-Metallpotenzial der enthaltenen Hauptmetalle von insgesamt über 51 500 t/a abschätzen (Abbildung 9).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Aufbereitung von Rostaschen aus Müllverbrennungsanlagen (MVA) wird maßgeblich vom Verwertungsweg deren Hauptkomponente, der mineralischen Fraktion, geprägt. Lag in der Vergangenheit der Fokus der mechanischen Aufbereitung auf einer entsprechenden Konfektionierung der Rostasche in kornklassenspezifische Schüttgüter, wie sie in der Bauwirtschaft als Baumaterial Anwendung finden, wird aufgrund der ansteigenden Metallschrottpreise die technische Aufmerksamkeit zunehmend auf das Nichteisenmetallpotenzial (NE-Metallpotenzial) der Rostasche gelegt.

Gegenstand dieser Ausarbeitung ist die Aufbereitung von Rostasche aus drei unterschiedlichen MVA. Ziel der mechanischen Aufbereitung war es dabei, das NE-Metallpotenzial mit technischen Aggregaten zu ermitteln, wie sie in der Abfallwirtschaft derzeit eingesetzt werden. Der im Technikumsmaßstab unter effizienzoptimierten Bedingungen separierte NE-Metallschrott wurde durch eine nachgeschaltete innovative sensorgestützte Sortierung in ein NE-

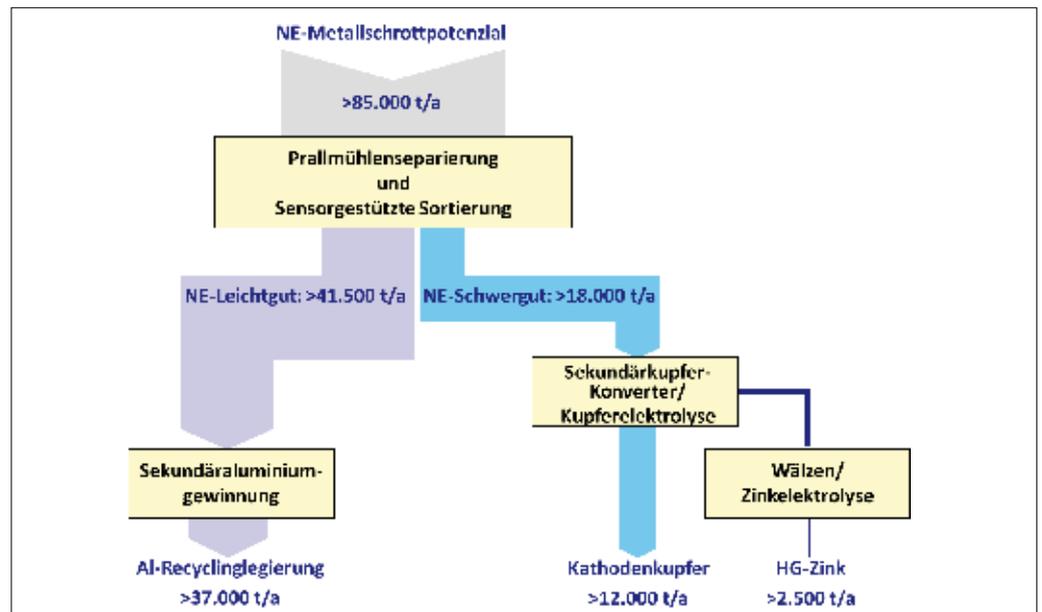


Abb. 9: Ermitteltes NE-Metallpotenzial aus Rostaschen deutscher MVA (Datenbasis 2009)

Schwer- und NE-Leichtgut getrennt. Für die Ermittlung eines daraus resultierenden realistischen NE-Metallpotenzials wurde eine metallurgische Bewertung der so erzeugten Aufbereitungsprodukte durchgeführt. Basis dieser Betrachtungen sind die Ergebnisse erster Schmelzversuche im Labormaßstab sowie Betriebsdaten der infrage kommenden großtechnisch zur Verfügung stehenden Metallgewinnungsverfahren. Die Übertragung der ermittelten Ergebnisse auf den Rostaschenanfall in Deutschland für das Jahr 2009 zeigt, dass von einem NE-Metallschrottpotenzial von mindestens 85 000 t/a ausgegangen werden kann. Nach derzeitigem Stand der Technik sollten hiervon über 60 Ma.-% und damit mehr als 51 500 t/a in Form qualitativ hochwertiger Endprodukte (NE-Metallpotenzial: Aluminium-Recyclinglegierung, Kathodenkupfer, HG-Zink) metallurgisch darstellbar sein. Insgesamt zeigen die vorliegenden Ergebnisse bereits jetzt, dass bei einer derzeit technisch möglichen Ausschöpfung des verfügbaren NE-Metallpotenzials bisher eher unbeachtete Materialien wie Rostasche aus Müllverbrennungsanlagen einen durchaus beachtenswerten Beitrag zur Rohstoffversorgung leisten können.

Vor dem Hintergrund einer zukünftig drohenden Ressourcen- und Energieverknappung sind weitere Untersuchungen geplant, die auch Aufschluss über erzielbare Energieeinsparungseffekte liefern sollen. Darüber hinaus soll die hier getroffene Annahme, dass nachgewiesene strategische Nebenmetalle des NE-Schwergutes (Edelmetalle, Kobalt, Selen, Tellur, etc.) die betrachtete NE-Metallpotenzialbilanz weiter positiv beeinflussen, durch geeignete theoretische und praktische Untersuchungen manifestiert werden.

Literatur

- [1] BÜCHNER, H.-P. (2007): Evolutionäre Anlagenentwicklung auf Basis von Erfahrungen. – In Thomé-Kozmiensky, K. & Beckmann, M.: Energie aus Abfall (Bd. 2, S 713); Neuruppin; TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky.
- [2] ALWAST, H. (2005): Analyse und Darstellung der durch die TA Siedlungsabfall und die Ablagerungsverordnung ausgelösten Investitionen sowie Arbeitsplatzeffekte. – Forschungsbericht 204 34 301, UBA-FB 000807; Dessau: Umweltbundesamt.
- [3] Statistisches Bundesamt (2007): Umwelt Abfallentsorgung 2005, Fachserie 19 Reihe 1. – Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- [4] BÖLLHOFF, C. & ALWAST, H. (2006): Wie lange noch müssen Restabfälle und Ersatzbrennstoffe zwischengelagert werden? – In: Thomé-Kozmiensky, K., Versteyl, A. & Beckmann, M (Hrsg.): Zwischenlagerung von Abfällen und Ersatzbrennstoffen; Neuruppin (TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky).
- [5] PRETZ, T. & GILLNER, R. (2006): Entwicklung der modernen Recyclingtechnik. – In: RECYCLING magazin 22.2006 (ISSN 1433-4399).
- [6] EdDE (2010): Energieeffizienzsteigerung und CO₂-Vermeidungspotenzial bei der Müllverbrennung - Technische und wirtschaftliche Bewertung. – Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten, Technische Universität Dresden. Köln: Entsorgungsgemeinschaft der deutschen Entsorgungswirtschaft e.V. – EdDE.
- [7] ITAD (2010): Interessensgemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V. – <http://www.itad.de/de/itad/reststoffe/index.html> (abgerufen am 21.7.2010).
- [8] FAULSTICH, M. (1995): Rückstände aus der thermischen Behandlung. – In: K. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Verfahren und Stoffe in der Kreislaufwirtschaft: 500-544. Berlin (EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik).
- [9] SCHOPPEMEIER, W. (1988): Erfahrungen mit der Entsorgung, Aufbereitung und Verwertung fester Verbrennungsrückstände aus der Hausmüllverbrennung. – Müll und Abfall 3: 104-112.
- [10] LAGA. (1994): LAGA Merkblatt 19 „Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle“. – Länderarbeitsgemeinschaft Abfall.
- [11] LANUV NRW (2010): AIDA – Informationsplattform Abfall in NRW. (U. u. -W. Landesamt für Natur, Herausgeber) – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen – <http://www.abfall-nrw.de/aida/> (abgerufen am 26.07.2010).
- [12] PRETZ, T. (2010): Recyclingtechnologien, Vorlesungsunterlagen, Institut für Aufbereitung und Recycling der RWTH Aachen University.
- [13] GILLNER, R. (2011): Nichteisenmetallpotential aus Siedlungsabfällen in Deutschland. – Dissertation; Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredlung, Band 40, ISBN 978-3-8440-0002-3.
- [14] SCHMELZER, G. (1997): Untersuchungen zur Aufbereitung von Rostschlacken der Müllverbrennung als Vorstufe zur Verglasung und zum Recycling metallischer Inhaltsstoffe (Bd. 1). – Aachen; Verlag Mainz. Wissenschaftsverlag, Aachen.
- [15] BESSON, S. et al. (2011): Improving Coalescence in Al-Recycling by Salt Optimazation. – Proc. of EMC 2011, June 26-29, Düsseldorf, Germany; Vol. 3: 759-774; Clausthal-Zellerfeld (GDMB Informationsgesellschaft).
- [16] SYDYKOV, A. (2004): Eigenschaften und Ausbeuteeinfluss von NaCl/KCl-basierten Schmelzsalzen des Al-Recyclings. – Dissertation IME der RWTH Aachen University (2004).
- [17] ZAR (2010): Ausbeute aus der Trockenschlacke. – Daniel Böni.
- [18] SPOHN, C. (2011): Stellungnahme bei der 14. Mitgliederversammlung der Interessensgemeinschaft der thermischen Abfallverbrennungsanlagen in Deutschland e.V.

((Akad.Titel?)) Ronald Gillner
Hydro Aluminium Rolled Products GmbH
Georg-von-Boeselager-Str. 21
53117 Bonn
Deutschland
ronald.gillner@hydro.com

((Akad.Titel?)) Thomas Pretz
IAR Lehrstuhl für Aufbereitung und Recycling fester Abfallstoffe der RWTH Aachen
Wüllnerstr. 2
52056 Aachen
Deutschland
pretz@ifa.rwth-aachen.de
Dr.-Ing. Elinor Rombach
Prof. Dr.-Ing. Bernd Friedrich
Beide:
IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling – Institut und Lehrstuhl der RWTH Aachen
Intzestr. 3
52056 Aachen
Deutschland
erombach@metallurgie.rwth-aachen.de
bfriedrich@ime-aachen.de