

# Interessante Aufschlüsse

## Die UMTEC-Methode zur Bestimmung der Metallgehalte in MVA-Schlacken liefert exakte Ergebnisse

Von Rainer Bunge



Professor Dr. Rainer Bunge lehrt an der Hochschule für Technik Rapperswil (HSR) und ist Fachstellenleiter am Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC), Rapperswil/Schweiz

Abfälle wurden bis vor wenigen Jahren überwiegend aus der Schadstoffperspektive betrachtet und als umweltschädlich angesehen. Mittlerweile hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass Abfälle auch als Sekundärrohstoffe betrachtet werden können (Ressourcenperspektive). Die Separatsammlung stellt eine Möglichkeit dar, Wertstoffe aus Abfällen zu gewinnen. In diesem Fall führt der Konsument stark wertstoffhaltige Abfallfraktionen einer direkten Verwertung zu (etwa Altmetalle, Elektronikschrott oder Batterien). Dennoch verbleiben im Haus- und Gewerbemüll noch erhebliche Mengen an Wertstoffen, insbesondere Metalle. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Frage, wie viele Metalle in den Restabfällen enthalten sind, die zur Entsorgung gelangen, in welcher Form diese vorliegen, und in welchem Umfang sie potenziell zurückgewinnbar sind. Die meisten der hier verwendeten Betrachtungen beziehen sich auf die Schweiz. Die daraus abgeleiteten Ergebnisse lassen sich aber auf viele andere europäische Länder übertragen.

Keywords:

*Altmetalle, Eisen (FE), Hausmüll, Metallgehaltsbestimmung, Müllverbrennungsanlagen, MVA-Schlacke, Nichteisenmetalle (NE), Rostasche, Verbrennungsrückstände*

### 1 Stoffliche Zusammensetzung des Abfalls

In Abbildung 1 sind die Ergebnisse einer manuellen Verlesung von Schweizer Hausmüll dargestellt. Neben einzelnen Stücken aus Eisen (Fe = 1,1 Prozent) und Nichteisenmetallen (NE = 1,1 Prozent) wurden Metalle auch in Form von Verbundstoffen, zum Beispiel *übrige Verbundwaren* und *Elektronik* gefunden, ohne dass detailliert aufgeschlüsselt wurde, wie viel Metall welcher Art festgestellt wurde.

Ein präziseres Bild vom Metallinventar im Schweizer Haus- und Gewerbemüll ergibt sich aus der chemischen Zusammensetzung der Abfälle. Haushaltsabfälle sind sehr heterogen, sodass die Probenahme und Probenvorbereitung zur direkten chemischen Analyse extrem aufwendig wären.

Da in der Schweiz jedoch der gesamte nicht recycelbare Abfall verbrannt wird, und die Metalle als chemische Elemente in der Verbrennung nicht zerstört werden, kann aus der chemischen Analyse der Ver-

brennungsrückstände der Metallgehalt zurückgerechnet werden, der im ursprünglichen Abfall enthalten war. In den Tabellen 1 und 2 finden sich Daten zur chemischen Zusammensetzung, der Abfälle, die an zwei Schweizer Müllverbrennungsanlagen angeliefert wurden (aus der chemischen Analyse der Verbrennungsrückstände zurückgerechnet).

Die Unterschiede zwischen den Messwerten der beiden untersuchten MVA kommen vor allem durch Unterschiede bezüglich Menge und Zusammensetzung der Gewerbe- und Industrieabfälle zu Stande, die mit dem Hausmüll verarbeitet werden. So wird in der MVA Hinwil – im Vergleich zu anderen Schweizer MVA – deutlich mehr RESH (Shredderleichtfraktion aus der Aufbereitung von Auto und Elektroschrotten) verbrannt. Dies mag auch der Grund für die ungewöhnlich hohen Goldgehalte gewesen sein, die in Hinwil gemessen wurden (0,4 g/t MVA Hinwil im Vergleich zu etwa 0,2 g/t in typischen Haushaltsabfällen).

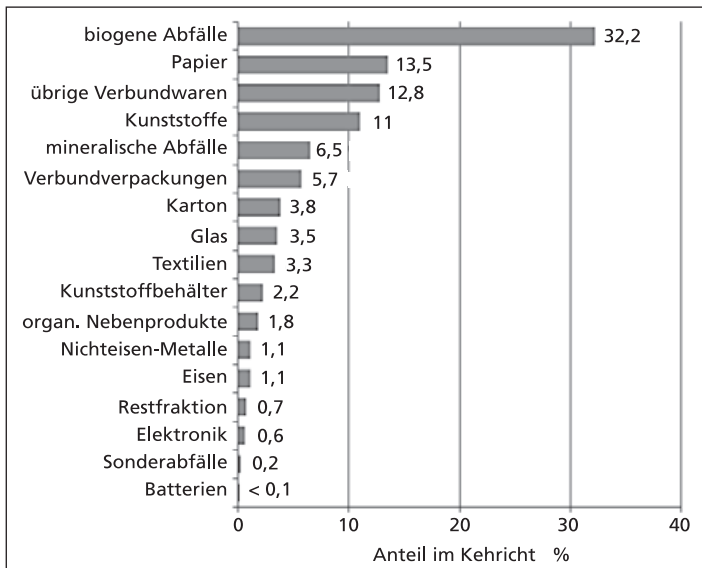


Abbildung 1: Zusammensetzung von Schweizer Hausmüll (Kehricht).  
Quelle: Bundesamt für Umwelt 2012 [1]

Parameter		Hausmüll			Industrie- und Gewerbeabfälle		
		Durchschnittswert ± 2σ			Durchschnittswert ± 2σ		
		mg/kgWM					
Aluminium	Al	11.000	±	830	16.000	±	1.800
Calcium	Ca	18.000	±	1.400	31.000	±	2.500
Eisen	Fe	23.000	±	1.800	29.000	±	4.600
Kalium	K	2.100	±	150	2.900	±	200
Magnesium	Mg	2.500	±	190	2.500	±	220
Natrium	Na	4.600	±	590	5.500	±	480
Silizium	Si	21.000	±	2.800	26.000	±	2.100
Arsen	As	1,4	±	0,1	5,1	±	0,4
Cadmium	Cd	7,8	±	0,63	19	±	1,6
Chrom	Cr	140	±	13	210	±	48
Kupfer	Cu	910	±	100	900	±	180
Quecksilber	Hg	0,64	±	0,06	0,46	±	0,07
Nickel	Ni	51	±	4	83	±	29
Blei	Pb	400	±	43	880	±	83
Antimon	Sb	52	±	6	160	±	12
Zinn	Sn	97	±	22	110	±	22
Zink	Zn	1.100	±	100	3.100	±	280

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung von Hausmüll, Industrie- und Gewerbeabfällen aus der Abfallverbrennungsanlage Thurgau Quelle: Morf 2006 [3]

Metall		mg/kg	Metall		mg/kg	Metall		mg/kg
Silber	Ag	5,3	Indium	In	0,29	Lithium	Li	9
Gold	Au	0,4	Niob	Nb	2,5	Molybdän	Mo	8,6
Platin	Pt	0,059	Tantal	Ta	1,2	Nickel	Ni	120
Rhodium	Rh	0,000092	Wolfram	W	56	Rubidium	Ru	8,31
Ruthenium	Ru	0,0005	Aluminium	Al	17.000	Scandium	Sc	0,96
Gadolinium	Gd	0,75	Barium	Ba	749	Selen	Se	0,45
Neodym	Nd	7,26	Bismut	Bi	2,8	Strontium	Sr	130
Praseodym	Pr	1,9	Kupfer	Cu	2.230	Tellur	Te	0,085
Yttrium	Y	7,85	Cadmium	Cd	8,9	Thallium	Tl	0,079
Beryllium	Be	0,28	Chrom	Cr	180	Zinn	Sn	74
Cobalt	Co	11	Hafnium	Hf	2,6	Vanadium	V	11
Gallium	Ga	2,2	Eisen	Fe	32.000	Zink	Zn	1.600
Germanium	Ge	0,21	Blei	Pb	540	Zirconium	Zr	116

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung des Abfalls in der Abfallverbrennungsanlage Hinwil Quelle: Morf et al., 2013 [4]

Untersuchungen der Abfälle respektive der Verbrennungsrückstände in anderen europäischen Ländern haben in Bezug auf die darin vorliegenden Metallgehalte mit den Schweizer Verhältnissen vergleichbare Ergebnisse erbracht [2, 5].

## 2 Herkunft der Metalle im Abfall

Die Wertstoffe, die in der MVA-Schlacke gefunden wurden, stammen nur zum kleineren Teil aus metallischen Kleinteilen, die vom Konsumenten aus Bequemlichkeit nicht in die entsprechende Separatsammlung abgeführt wurden (zum Beispiel Münzen in Fremdwährung oder Büroklammern). Meist bestanden sie aus Metallteilen, die ursprünglich im Verbund mit anderen Materialien, insbesondere mit Kunststoffen vorgelegen haben (zum Beispiel Metallclips aus Kunststoff-Kugelschreibern). Ein großer Teil des Kupfers, das in der Schlacke gefunden wurde, deutet zum Beispiel auf eine Herkunft aus Kleinelektronik hin.

Durch die Separatsammlung von Haushaltsbatterien werden in der Schweiz etwa zwei Drittel der gesamten Batteriemenge recycelt. Das restliche Drittel gelangt in die MVA. Der überwiegende

Teil dieser Batterien wird mit der Schlacke ausgetragen, und zwar in Form von weitgehend intakten Batterien, die noch die ursprünglichen schwermetallhaltigen Inhaltsstoffe enthalten. Dies überrascht, da die Schwermetalle in relativ leicht flüchtiger Form vorliegen. Vermutlich entmischen sich die Batterien wegen ihres hohen spezifischen Gewichts auf dem Verbrennungsrost vom restlichen Abfall und gelangen deshalb nicht in den Hochtemperaturbereich im oberen Bereich des Materialbettes.

Die Korngrößenverteilungen der in Schlacke vorliegenden Metallstücke sind in Abbildung 2 dargestellt. Hieraus ist ersichtlich, dass 80 Prozent der NE-Metallstücke kleiner als 20 mm sind. Die gelegentlich beobachteten größeren NE-Metallstücke, wie zum Beispiel Türgriffe aus Messing, sind untypisch und spielen mengenmäßig praktisch keine Rolle. Anders beim Eisen: Knapp 20 Prozent der Eisenstücke in der Schlacke sind sogar größer als 100 mm. Viele Eisenstücke liegen als Schrauben, oder in Form von Möbelbeschlägen, vor. Es wird vermutet, dass diese Eisenstücke ursprünglich im Verbund mit Holz vorgelegen haben und erst durch die Verbrennung freigelegt wurden.

## 3 Charakterisierung der Rostasche hinsichtlich Wertstoffinhalt

Theoretisch ließen sich die Metalle direkt aus dem Abfall zurückgewinnen, was ja auch bei der *mechanisch-biologischen Aufbereitung* versucht wird. In der Praxis werden bei diesem Vorgehen, zumindest bei den Nichteisenmetallen, allerdings nur sehr geringe Rückgewinnungsgrade erzielt. Der Grund liegt vor allem in der oben diskutierten

Korngröße der Nichteisenmetalle (90 Prozent kleiner 30 mm) und deren innigem Verbund mit Kunststoffen und Textilien. Sehr viel wirkungsvoller ist die Rückgewinnung aus den Verbrennungsrückständen, die im Folgenden diskutiert wird.

Die Rostasche aus Müllverbrennungsanlagen besteht aus einem Gemisch von mineralischen und metallischen Bestandteilen. Der Massenanteil der Schlacke liegt bei etwa 22 Prozent der Masse des verbrannten Abfalls. Die in der Schlacke gemessenen Metallgehalte können also mittels Division durch 4,5 auf den Abfall zurückgerechnet werden. Zu beachten ist hierbei noch, dass einige Metalle wie Zink (Zn), Cadmium (Cd), Blei (Pb) und Quecksilber (Hg) auch in der Flugasche ausgetragen werden und bei einer Bilanzierung der Metallgehalte im Abfall aus den Verbrennungsrückständen ebenfalls einzubeziehen sind.

Die Metalle liegen entweder in elementarer Form vor, oder aber chemisch gebunden, zum Beispiel als Oxide. Wertstoffcharakter haben nur elementar vorliegende Metalle, denn nur diese lassen sich mit vertretbarem Aufwand wieder in den Stoffkreislauf rezyklieren. Elementare Metalle werden vor allem in den Fraktionen größer 2 mm gefunden, während die Metalle in den Feinkornfraktionen ganz überwiegend chemisch gebunden sind. Makroskopisch betrachtet liegen die Metalle entweder frei, oder im Verbund mit anderen Materialien, zum Beispiel in mineralischem Schlackenmaterial eingeschlossen, vor. Hierbei spielen zwei Mechanismen eine wichtige Rolle.

Erstens können die Metallstücke in gesinterten Schlackenbrocken oder erstarrten Schmelzen eingeschlossen sein (Abbildung 3). Etwa 15 Prozent der Schlacke werden in Form von solchen Stücken ausgebracht. Unsere Untersuchungen an trocken ausgetragener Schlacke haben ergeben, dass diese gesinterten Schlackenbrocken weniger Metallstücke beinhalten, als typischerweise im Schlackenmaterial durchschnittlich vorhanden sind.

Zweitens können die Metalle in Mineralen eingeschlossen sein, die sich nach dem Befeuchten der Schlacke neu gebildet haben (zum Beispiel durch puzzolanische Reaktionen). Von Bedeutung ist dieser Mechanismus beim Nassaustrag. Nach dem Kontakt mit Wasser reagiert die Schlacke, wobei sich das ursprünglich rieselfähige Material verfestigt, und die ursprünglich frei vorliegenden Metallstücke in die verfestigte Mineralmatrix eingeschlossen werden. Nach einigen Wochen sind diese Vorgänge weitgehend abgeschlossen und die Schlacke ist dann nicht mehr rieselfähig, sondern bildet ein zusammenhängendes Gefüge. Vor der Wertstoffrückgewinnung aus solcherweise verfestigten Schlacken wird das Schlackenmaterial zunächst zerkleinert und dadurch werden die Wertstoffe freigelegt (Abbildung 3 rechts).

Für eine Wertstoffextraktion im großtechnischen Maßstab sind vor allem Metallstücke von Bedeutung, die größer als etwa zwei Millimeter sind, denn nur diese lassen sich mit konventioneller Technologie trockenmechanisch (und damit einigermaßen kostengünstig) abtrennen. Unter Berücksichtigung zahlreicher eigener Untersuchungen und diverser externer Studien kommen wir zu einer Abschätzung der Metallgehalte in Schweizer MVA-Schlacke wie in Abbildung 4 dargestellt.

Zink kommt als reines Metall in der Schlacke nur untergeordnet vor (0,2 Prozent). Im Allgemeinen liegt Zink in der Schlacke legiert mit Kupfer vor, nämlich als Messing. MVA-Schlacke enthält etwa 0,4 Prozent Messing, welches zu rund 60 Prozent aus Kupfer und

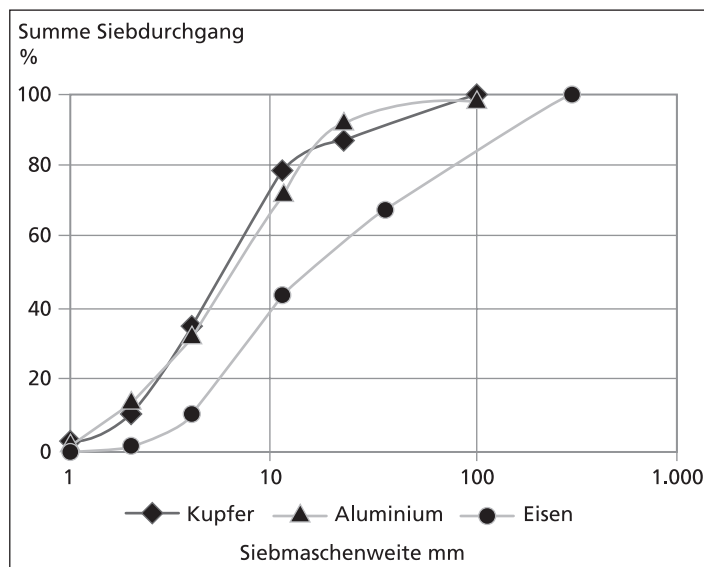


Abbildung 2: Korngrößenverteilung der Metallstücke. Die Eisenstücke in der Schlacke sind wesentlich größer, als die Nichteisenstücke (Kupfer und Aluminium)

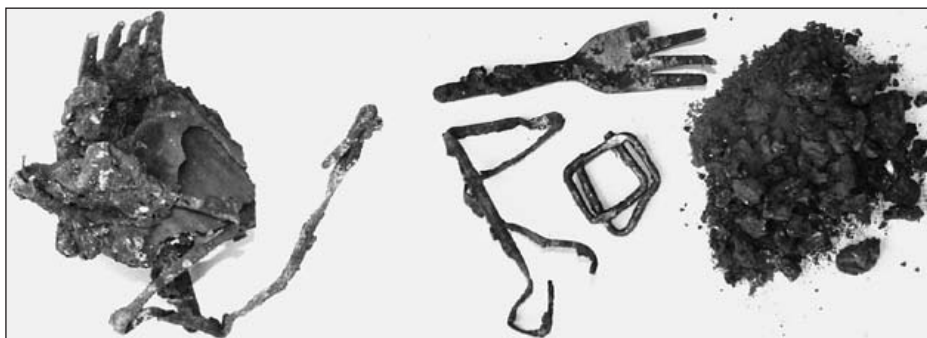


Abbildung 3: Metallstücke eingeschlossen in Schlacke (links). Die Metallstücke freigelegt und von der Schlacke separiert (rechts)

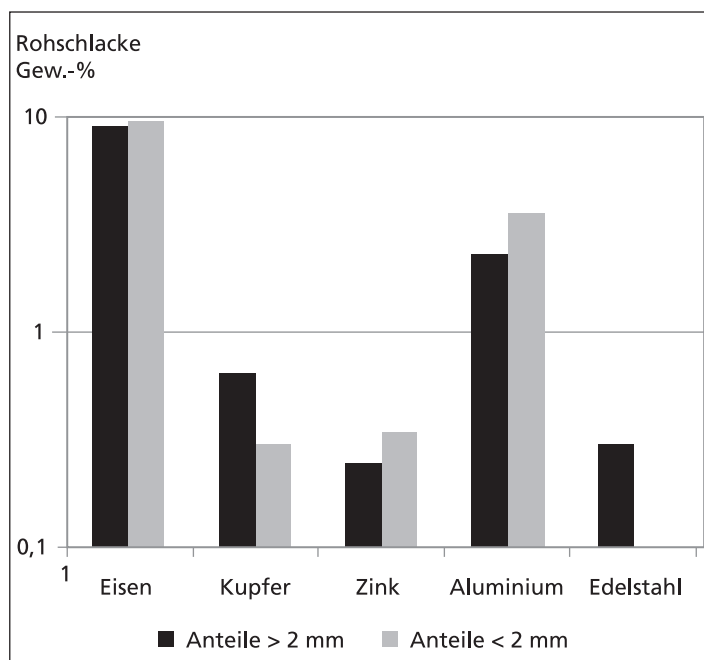


Abbildung 4: Durchschnittliche Gehalte an Metallen in Schweizer MVA-Schlacke (Schätzungen des Autors). Die Anteile größer 2 mm sind metallisch und durch eine trockenmechanische Aufbereitung grundsätzlich zurückgewinnbar. Die Anteile kleiner 2 mm sind bei Eisen und Aluminium überwiegend chemisch gebunden (meist als Oxide)



40 Prozent Zink besteht. In die Kupfer- und Zinkgehalte, die in Abbildung 4 dargestellt werden, sind bereits die Anteile eingerechnet, die aus Messing stammen. Der unmagnetische Edelstahl wird branchenüblich, obwohl chemisch ganz überwiegend aus Eisen bestehend, den NE-Metallen zugerechnet.

Edelmetalle finden sich ebenfalls in der Schlacke, zum Beispiel Gold mit etwa 1 Gramm pro Tonne. Die in der Fraktion größer 2 mm vorliegenden Edelmetalle stammen vorwiegend aus Schmuckstücken. In der Feinfraktion kleiner 2 mm stammt das Gold hingegen vorwiegend aus Elektronik. Das Gold in der Feinkornfraktion kommt sowohl in Form feinsten reiner Flitterchen vor, als auch im Verbund mit anderen Metallen, insbesondere Edelstahl (vergoldete elektrische Kontakte). Die Zurückgewinnung von Gold aus MVA-Schlacken ist bislang nicht kostendeckend. Allerdings vergütet die Metallhütte in der Regel den Edelmetallgehalt in dem NE-Konzentrat, das aus der Schlackenaufbereitung gewonnen wird. Zurzeit sind diverse Entwicklungen im Gange, die darauf zielen, zumindest teilweise das Gold aus den Verbrennungsrückständen zurückzugewinnen.

Insgesamt enthält Schweizer MVA-Schlacke rund 9 Prozent zurückgewinnbares Eisen und 3,5 Prozent zurückgewinnbare Nicht-eisenmetalle, davon mehr als die Hälfte Aluminium. Auf der Basis von 700.000 Tonnen Schlacke pro Jahr sind dies etwa 63.000 Tonnen zurückgewinnbares Eisen und 25.000 Tonnen zurückgewinnbare NE-Metalle. Tatsächlich zurückgewonnen werden in Schweizer Schlackenaufbereitungsanlagen rund 50.000 Tonnen Eisen (80 Prozent) und 9.000 Tonnen NE-Metalle (36 Prozent).

Der Wertinhalt der auf konventionelle Weise potenziell zurückgewinnbaren Metalle in der MVA-Schlacke beträgt pro Tonne etwa 60 EUR und teilt sich etwa folgendermaßen auf:

- Kupfer 40 Prozent
- Aluminium 35 Prozent
- Eisen 20 Prozent
- Edelstahl und andere 5 Prozent

Bei einem Rückgewinnungsgrad von rund 50 Prozent und einer Vergütung von knapp 80 Prozent des Wertstoffgehalts durch die Metallhütten ergibt sich ein Erlös von etwa 25 EUR pro Tonne verarbeiteter Schlacke.

Mit *unkonventionellen Mitteln* zusätzlich erschließbar sind noch folgende Metallpotenziale:

- Münzen etwa 8 EUR/Tonne Schlacke
- Gold etwa 30 EUR/Tonne Schlacke

## 4 Charakterisierung der zurückgewonnenen Metallfraktionen

Metallstücke werden durch die mechanische Aufbereitung chemisch/physikalisch praktisch nicht verändert und werden so gewonnen, wie sie in der Schlacke vorliegen. Da Eisen und Kupfer bei MVA-typischen Temperaturen (um 900 Grad Celsius) nicht schmelzen, werden diese Metalle in ihrer ursprünglichen Morphologie in der Schlacke ausgebracht.

Anders beim Aluminium: Der Schmelzpunkt von Aluminiumlegierungen liegt bei rund 600 Grad Celsius. Massige Aluminiumstücke schmelzen unter den Bedingungen der Müllverbrennung, fließen als Schmelze durch das Gutbett auf den Rost, erstarren dort zu bizarr geformten Nuggets, und werden so mit der Schlacke ausgebracht (Abbildung 5 links). Unsere Untersuchungen in einem Muffelofen deuten darauf hin, dass bei Temperaturen knapp über dem Schmelzpunkt von Aluminium eine Schicht von etwa 5-15 Mikrometer Dicke oxidiert. Massige Aluminiumstücke sind von



Abbildung 5: Aluminium-Nuggets (links) und Messingstücke (rechts) aus MVA-Schlacke (Trockenaustrag)

einem Verlust durch Oxidation also praktisch nicht betroffen, während Aluminiumfolien überwiegend verbrennen. Bei Aluminiumdosen, mit einer Wandstärke von etwa 100 Mikrometer, würden rund 20 Prozent des Aluminiums oxidiert (jeweils 10 Mikrometer auf der Innen- und Außenseite).

In Tabelle 3 sind die Resultate einer Untersuchung von 46 zufällig ausgewählten Aluminiumstücken (8-25 mm) dargestellt. Die Aluminiumstücke wurden chemisch untersucht und den branchenüblichen Legierungsgruppen zugeordnet. Überraschend ist die hohe Qualität des Aluminiums, das in der Schlacke angetroffen wurde. Bei rund einem Drittel handelt es sich um Reinaluminium, welches vorwiegend für Verpackungen eingesetzt wird. Andere wichtige Aluminiumanteile kommen vermutlich aus dem Getränkebereich, zum Beispiel in Form von Schraubdeckeln (8XXX) und Getränkedosen (3XXX, 5XXX). Die Mischprobe aus Aluminiumschrott aus MVA ergab eine Ausbeute von 92,3 Prozent Aluminium. Die Zusammensetzung ist sehr gut geeignet als Ausgangsprodukt für Gusslegierungen.

Messing, dessen Schmelzpunkt bei Temperaturen knapp über 900 Grad Celsius liegt, wird überwiegend in der ursprünglichen Form ausgebracht (Abbildung 5 rechts), aber gelegentlich auch, wie beim Aluminium, in Form von *Nuggets*.

Ähnlich wie bei Aluminium findet auch bei Eisen eine oberflächliche Oxidation der Metallstücke statt, sodass die aus der Schlacke gewonnenen Eisenstücke nicht *blank* vorliegen, sondern mit einer dunkelgrauen Zunderschicht überzogen sind.

Beim konventionellen *Nassaustrag* können sich die Metalle zwischen dem Zeitpunkt des Austrages aus dem Ofen und dem Zeitpunkt der Schlackenaufbereitung noch verändern. Da die Schlacke hierbei durch einen mit Wasser gefüllten Siphon aus dem Ofen ausgebracht wird, enthält sie knapp 20 Prozent Wasser, was zur Korrosion der Metalle führen kann. Diese betrifft vor allem Eisen und Aluminium. Eisenstücke rosten an der Oberfläche und Aluminium korrodiert bei den in der Schlacke vorherrschenden alkalischen Bedingungen unter Wasserstoffentwicklung zu Aluminiumhydroxid. Allerdings schreitet die Korrosion in aufgehäufter Schlacke nicht sehr weit voran. Auch Schlacken, die nach mehr als zehn Jahren aus Deponien ausgegraben werden, enthalten noch fast die gesamten ursprünglichen Metallanteile, wobei Aluminiumstücke

Legierungen EN	Beispiele	Anteil %
1XXX	Reinaluminium > 99 %	28
2XXX	Schrauben, Nieten	2
3XXX	Mantel Getränkedosen	17
4XXX	Druckguss	0
5XXX	Deckel Getränkedosen	11
6XXX	Verkehrszeichen, Schrauben	9
7XXX	hochfeste Produkte, Skistöcke	2
8XXX	Flaschendeckel, Weithalsverschluss	22
Aluguss	Töpfe, Pfannen	9

Tabelle 3: Qualität von Aluminium aus Schlacke

allerdings mit einer etwa 1 mm dicken, weißen Hydroxidschicht überzogen sind.

Die Qualität der Metallkonzentrate, die aus MVA-Schlacke gewonnen und schließlich in Metallhütten abgeführt werden, hängt weitgehend von den Prozessschritten ab, die der Schlackenaufbereitung nachgeschaltet sind. Wie oben erörtert, liegen die Metalle häufig eingeschlossen in dem mineralischen Matrixmaterial vor. Insbesondere den zurückgewonnenen Eisenstücken haften, trotz einer vorgängigen Zerkleinerung des verfestigten Schlackenmaterials, noch substantielle Mengen an mineralischem Material an. Solcher MVA-Schrott muss vor der Abgabe an eine Stahlhütte zunächst gereinigt werden. Wichtig ist auch die Entfernung von Kupfer, welches in Form von elektrischen Spulen um einen magnetischen Eisenkern in den Eisenschrott gelangt. Wünschenswert ist auch, dass Batterien aus dem Eisenschrott abgetrennt werden, denn Stahlwerke sind meist nicht mit einer Abgasreinigung zur Abtrennung von Zink, Kadmium und Quecksilber ausgerüstet.

In der Schweiz nicht in Frage kommt eine baustoffliche Verwertung der mineralischen Anteile von MVA-Schlacke, aus der die Metallstücke durch trockenmechanische Aufbereitung weitgehend entfernt wurden. Hierfür sind auch nach der Aufbereitung die Schwermetallgehalte noch viel zu hoch. Eine Einschleusung dieser Schwermetalle in den Baustoffkreislauf würde bei dem in der Schweiz praktizierten Bauschuttrecycling zu einer sukzessiven Akkumulation der Schwermetalle in der Bausubstanz führen. Anders in Deutschland, den Niederlanden und anderen Ländern. Dort wird die Schlacke – nach entsprechender Vorbehandlung – im Straßenbau eingesetzt. In diesem Fall ergibt sich ein Zielkonflikt betreffend die Extraktion der Metalle. Zum Aufschluss auch kleiner Metallstücke muss die Schlacke vor der Metallabtrennung zerkleinert werden. Allerdings ist feinkörniges mineralisches Material für den Straßenbau unbrauchbar.

## 5 Bestimmung der Metallgehalte in MVA-Schlacken

Die Bestimmung der Metallanteile in Abfällen ist, sofern die Metalle in gediegener Form vorliegen, schwierig und wird in den meisten Labors falsch durchgeführt. Die von uns entwickelte *UMTEC-Methode* zur Bestimmung der Metallgehalte in MVA-Schlacken ist zwar aufwendig, führt aber zu korrekten Ergebnissen. In diesem Abschnitt wird unsere Methode in stark gekürzter Form vorgestellt.

Von großer Bedeutung ist zunächst die Abschätzung der zu verarbeitenden Probenmasse. Diese orientiert sich an der maximalen Größe der Metallstücke, die in dem Material vorliegen,  $d_{\max}^+$ . Ebenfalls Einfluss auf die zu ziehende Probenmasse hat die Dichte des Metalls  $\rho^+$ , dessen Anteil bestimmt werden soll, sowie der Gehalt an diesem Metall in der Schlacke  $\omega$ .

Bei der Probenahme bahnt sich ein iteratives Problem an: Um die Probenmasse zu berechnen, die für eine Metallgehaltsbestimmung notwendig ist, wird eben dieser Metallgehalt benötigt. Ersatzweise wird daher der zu bestimmende Metallgehalt grob abgeschätzt und daraus die Probenmasse bestimmt. Diese ergibt sich aus folgender Formel (siehe auch Abbildung 6):

$$M_{\min} \approx \frac{25 \rho^+}{\omega} d_{\max}^+{}^3$$

$M_{\min}$	minimal zu ziehende Probenmasse (kg)
$d_{\max}^+$	der Durchmesser des größten zu erwartenden Metallstückes (m)
$\rho^+$	die Dichte des zu bestimmenden Metalls (kg/m <sup>3</sup> )
$\omega$	der Massenanteil an diesem Metall in der Schlacke (-)

*Beispiel: Eine Schlacke (0-32 mm), die mittels Wirbelstromscheidung aufbereitet wurde, soll auf den Aluminiumgehalt untersucht werden. Typischerweise enthalten Schlacken  $\omega = 2$  Prozent Aluminium in stückiger Form (Dichte 2,7 g/cm<sup>3</sup>). Bei einer konventionellen Wirbelstromscheidung werden hiervon etwa 50 Prozent im Konzentrat ausgetragen – die restlichen 50 Prozent verbleiben im Rückstand, der folglich ungefähr  $\omega = 1$  Prozent Aluminium enthält. Somit errechnet sich die zu ziehende Probenmasse zu  $M = 25 \times 2700 \times 0,032^3 / 0,01 = 221$  kg. Unter der zusätzlichen Annahme, dass bei der Wirbelstromscheidung vorzugsweise die größeren Aluminiumstücke abgeschieden wurden und im Rückstand nur noch Aluminiumstücke kleiner als 16 mm vorliegen, reduziert sich die Probenmasse auf 27 Kilogramm.*

*Beispiel: für eine Schlacke mit 1 Prozent Aluminiumstücken < 16 mm werden 10 kg abgelesen. Die tatsächlich zu ziehende Probe muss folglich 27 Kilogramm umfassen ( $\rho_{Al}=2,7$  g/cm<sup>3</sup>).*

Die Methode zur Metallgehaltsbestimmung in MVA-Schlacken beruht auf dem Prinzip der *selektiven* Zerkleinerung (Abbildung 7). Hierbei wird ausgenutzt, dass bei mechanischer Beanspruchung die spröden mineralischen Schlackenbestandteile *selektiv* pulverisiert werden, während die Metalle allenfalls verformt werden. Erfolgt nach der Druckbeanspruchung des Materials (im Brecher) eine anschließende Absiebung, so rieselt das pulverisierte mineralische Schlackenmaterial durch die Siebmaschen, während die Metallstücke, praktisch frei von Anbackungen und anderen mineralischen Komponenten, auf dem Sieb liegen bleiben (Abbildung 8). Die nach der Riffelteilung ermittelten Metallanteile kleiner 8 mm werden massenproportional zum Teilungsfaktor (Abbildung 7:  $M_{\text{total}}/M_{0-8}$ ) den Metallanteilen größer 8 mm zugeschlagen. Essenziell für korrekte Resultate ist, dass die gesamte Probenmasse verarbeitet wird, die nach der obigen Formel bestimmt wurde.

Erfasst werden mit der UMTEC-Methode nur Metallstücke größer 2 mm, also solche, die mittels konventioneller trockenmechanischer Sortierung potenziell zurückgewonnen werden können. Nicht erfasst werden Metallanteile, die kleiner sind als 2 mm sowie solche, die in chemischen Verbindungen, zum Beispiel Oxyden, vorliegen. Sofern diese Metallgehalte von Interesse sind, können sie durch eine konventionelle chemische Analyse bestimmt werden.

Eisen- (FE) und Nichteisenmetalle (NE) werden anhand der magnetischen Eigenschaften getrennt (Abbildung 8). Ferromagneti-

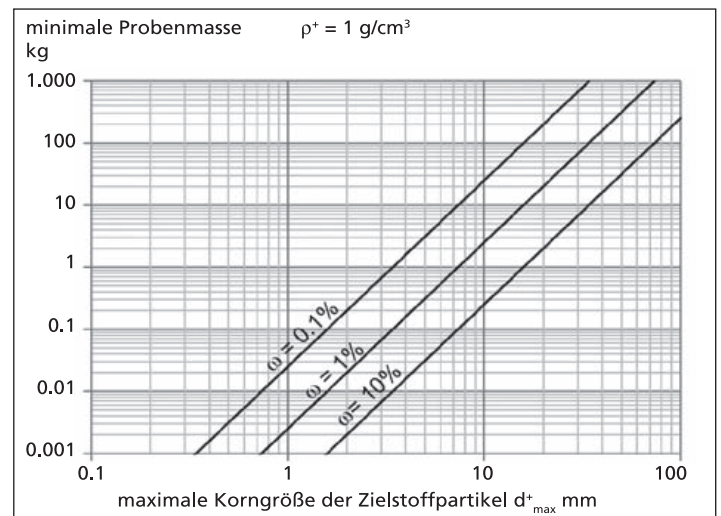


Abbildung 6: Die minimal zu ziehende Probenmasse für repräsentative Proben von MVA-Schlacke. Die an der y-Achse abgelesene Probenmasse muss noch mit der Dichte des zu bestimmenden Metalls in g/cm<sup>3</sup> multipliziert werden und ergibt die tatsächlich zu ziehende Probenmasse

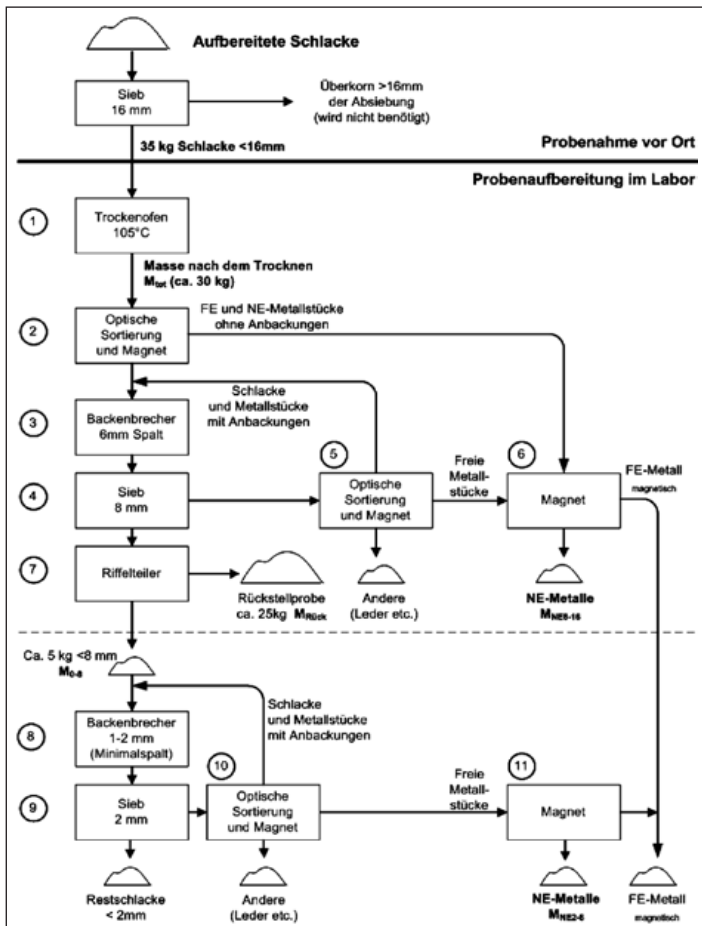


Abbildung 7: Bestimmung der Gehalte an gediegenen Metallstücken im Rückstand von aufbereiteter MVA-Schlacke gemäß UMTEC-Methode



Abbildung 8: Die auf dem Sieb liegenden gebliebenen Metallstücke (flachgedrückt) werden mittels Magneten getrennt in eine magnetische Fraktion (links) und eine nicht magnetische Fraktion (rechts)

sche Bestandteile werden als FE Metall klassifiziert, und zwar unabhängig davon, ob sie tatsächlich Eisen enthalten. Nichteisenmetalle, die im engen Verbund mit Eisen vorliegen (zum Beispiel elektrische Spulen mit Kupferdraht auf Eisenkernen) werden ebenfalls als magnetisch klassifiziert. Alle nichtmagnetischen Metalle werden als NE-Metalle klassifiziert, auch wenn diese Eisen enthalten, zum Beispiel in Form von unmagnetischen Chrom-Nickel-Stählen. Die Nichteisenmetalle werden durch verschiedene Methoden (zum Beispiel Schwimm/Sink-Sortierung in Natrium-Polywolframat-Lösung, selektive Anfärbung und anschließende manuelle Auslese) in die einzelnen Metallfraktionen unterteilt (Aluminium, Kupfer, Messing, Zink, andere).

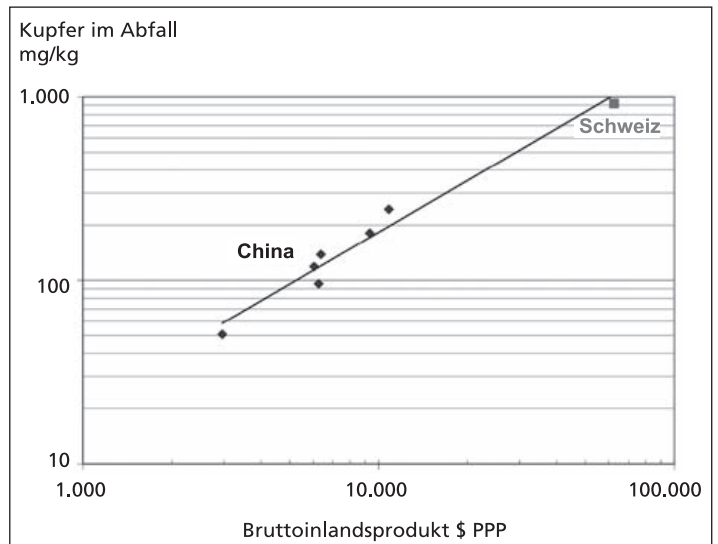


Abbildung 9: Je wohlhabender eine Region, umso mehr Kupfer findet sich in deren Abfall (Quelle: Solenthaler/Bunge2003 [6])

## 6 Blick in die Zukunft

In einem Projekt im Jahr 2003 untersuchten wir die Schlacken verschiedener chinesischer MVA auf deren Gehalte an Kupfer und rechneten daraus die Kupfergehalte im Abfall zurück. Diese Daten wurden, wie in Abbildung 9 gezeigt, gegen das Bruttoinlandsprodukt der entsprechenden Region aufgetragen. Ebenfalls dargestellt sind die Daten für die Schweiz. Die gute Korrelation deutet darauf hin, dass man den Kupfergehalt im Abfall als Leitparameter für den Entwicklungsgrad einer Region verwenden kann. Er bildet den Grad der *Elektronisierung* ab und kann damit auch als Indiz für den Wohlstand dieser Region herangezogen werden. Mit zunehmendem Wohlstand werden in Zukunft global in den Abfällen nicht nur die Gehalte an Kupfer, sondern auch an den anderen Metallen zunehmen.

### Literatur

- [1] Bundesamt für Umwelt (BAFU): Erhebung der Kehrrichtzusammensetzung, Bern 2012. Im Internet: <http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/33597.pdf>
- [2] Meinfelder, T.; Richers, U.: Entsorgung der Schlacke aus der thermischen Restabfallbehandlung; Forschungszentrum Karlsruhe; Wissenschaftliche Berichte FZKA 7422, Juli 2008
- [3] Morf, L.: Chemische Zusammensetzung verbrannter Siedlungsabfälle. Untersuchungen im Einzugsgebiet der KVA Thurgau. Umwelt-Wissen Nr. 0620. Bundesamt für Umwelt, Bern, S. 104, 2006
- [4] Morf et al.: Precious metals and rare earth elements in municipal solid waste – Sources and fate in a Swiss incineration plant. Waste Management, Volume 33, Issue 3, Pages 634-644, March 2013
- [5] Mostbauer, P.; Böhm, K.: Grundlagen für die Verwertung von MV-Rostasche. Teil A: Entwicklung des Österreichischen Behandlungsgrundsatzes. Teil B: Aufbereitungstechnik und Innovationen. Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Wien 2010. Im Internet: [http://www.bmlfuw.gv.at/dms/lmat/umwelt/abfall-ressourcen/behandlung-verwertung/behandlung-thermisch/Studien/BOKU\\_Grundsatz\\_Teil\\_A\\_Rostasche.pdf](http://www.bmlfuw.gv.at/dms/lmat/umwelt/abfall-ressourcen/behandlung-verwertung/behandlung-thermisch/Studien/BOKU_Grundsatz_Teil_A_Rostasche.pdf), [http://www.bmlfuw.gv.at/dms/lmat/umwelt/abfall-ressourcen/behandlung-verwertung/behandlung-thermisch/Studien/BOKU\\_Grundsatz\\_Teil\\_B\\_Rostasche.pdf](http://www.bmlfuw.gv.at/dms/lmat/umwelt/abfall-ressourcen/behandlung-verwertung/behandlung-thermisch/Studien/BOKU_Grundsatz_Teil_B_Rostasche.pdf)
- [6] Solenthaler, B.; Bunge R.: Müllverbrennung in China; Müll und Abfall 11; p. 593 ff., 2003

### Kontakt

#### Professor Dr. Rainer Bunge

Hochschule für Technik Rapperswil (HSR)  
 Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC)  
 Oberseestraße 10 · CH-8640 Rapperswil  
 Tel.: 0041-55-222-48.62 · Fax: 0041-55-222-48.61  
 eMail: [rbunge@hsr.ch](mailto:rbunge@hsr.ch) · Internet: <http://www.hsr.ch> · <http://www.umtec.ch/>