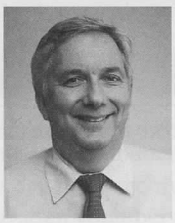
Reste in Schlacke und Asche

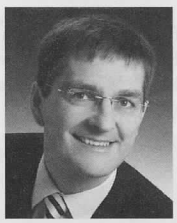
Beim Recycling von Metallen aus den Rückständen der Abfallverbrennung kommt es auf die Reinheit der Fraktionen an

Von Rüdiger Deike, Dominik Ebert, Daniel Schubert, Reza Ulum, Ragnar Warnecke und Martin Vogell



Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike
Leiter des Lehrstuhls Metallurgie der Eisen- und Stahlerzeugung am Institut für Metallurgie und Umformtechnik an der Universität Duisburg-Essen

Dipl.-Ing.(FH) Martin Vogell
C.C. Reststoff-Aufbereitung GmbH & Co. KG, Würzburg



Dr.-Ing. Ragnar Warnecke
ist Geschäftsführer der GKS-Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH

Reza M. Ulum
Master of Science
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Institut für Metallurgie und Umformtechnik, Universität Duisburg-Essen

Dipl.-Ing. Daniel Schubert
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Institut für Metallurgie und Umformtechnik, Universität Duisburg-Essen

Dominik Ebert
Bachelor of Engineering, Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Institut für Metallurgie und Umformtechnik, Universität Duisburg-Essen

Die Wirtschaftlichkeit von Recyclingprozessen zur Gewinnung von Metallen aus Rückständen der Abfallverbrennung hängt wesentlich von den Preisen ab, die für diese Metalle auf dem Markt erzielt werden. Entsprechende Recyclingkonzepte müssen deshalb eine Wirtschaftlichkeit auch dann garantieren, wenn die Preise für Metalle fallen. Müllverbrennungsschlacken ermöglichen Recyclingraten von mehr als 100 Prozent. In den Schlacken werden kleine Metallpartikel, die mit einer herkömmlichen Sortierung nicht zu erfassen sind, nahezu vollständig gesammelt. Diese Partikel können durch entsprechende Recyclingprozesse aus der Schlacke zurückgewonnen werden. In der Feinfraktion von Müllverbrennungsschlacken können Kupfergehalte vorliegen, die mit 0,3 bis 0,4 Prozent den Gehalten von armen Kupfererzen entsprechen. Damit kann die Müllverbrennungsschlacke im Sinne des Urban Mining zukünftig als eine kontinuierlich existierende Rohstoffquelle dienen. Wie sauber die einzelnen Fraktionen getrennt werden können, wird entscheiden, ob die mineralischen Restfraktionen einer höherwertigen Verwertung zugeführt werden können.

Die Studie von Dennis L. Meadows und Mitarbeitern (1973) über die *Grenzen des Wachstums* [1] hat die Menschen in den Industrienationen darauf aufmerksam gemacht, dass energetische und nicht energetische Rohstoffe nur in begrenztem Maße verfügbar sind. Als sich in den 1970er Jahren vor allem in USA, Europa und Japan die Industrie- zur Dienstleistungsgesellschaft wandelte, rückte dieses Wissen zunehmend in den Hintergrund. In dieser Phase stagnierten in vielen Bereichen die Wachstumsraten, was mit geringeren Energie- und Rohstoffverbräuchen einher ging. So verzeichnete beispielsweise die Weltrohstahlproduktion in der Zeit von 1970 bis 1995 (Abbildung 1) immer geringer werdende Wachstumsraten. Für den Zeitraum von 1990 bis 1995 kann sogar eine absolute Abnahme der Weltrohstahlproduktion festgestellt werden.

Diese Entwicklung der Weltrohstahlproduktion wird von Meadows et al. [3] in positiver Weise so interpretiert, dass bis dahin gültige exponentielle Wachstumstrends und damit einhergehende Rohstoffverbräuche prinzipiell gestoppt werden können. Dies könne als ein Beispiel dafür gesehen werden, dass eine hohe Lebensqualität auch mit einer geringeren Schädigung des Planeten aufrechterhalten werden kann, und dass „*... die Welt die Lektion langsam lernt*". [3].

In der Stahlindustrie wurden im Verlauf der Jahrzehnte neue Stahlqualitäten entwickelt, die qualitativ hochwertiger aber auch leichter sind und von daher mit einem geringeren Rohstoffeinsatz hergestellt werden können. Zudem zeichnet sich die Stahlindustrie weltweit durch relativ hohe Recyclingraten (im Durchschnitt 42 Prozent) [2] aus. Wird die Elektrostahlerzeugung (etwa 30 Prozent der gesamten Weltstahlproduktion) allein betrachtet, so handelt es sich hierbei um Prozesse mit Recyclingraten von nahezu 100 Prozent. Durch den fast ausschließlichen Einsatz von Schrott wird in diesen Prozessen nicht nur ein Recycling in nahezu geschlossenen Kreisläufen realisiert, vielmehr werden in den im höchsten Grade rohstoffeffizienten Produktionsprozessen in Kombination mit entsprechenden

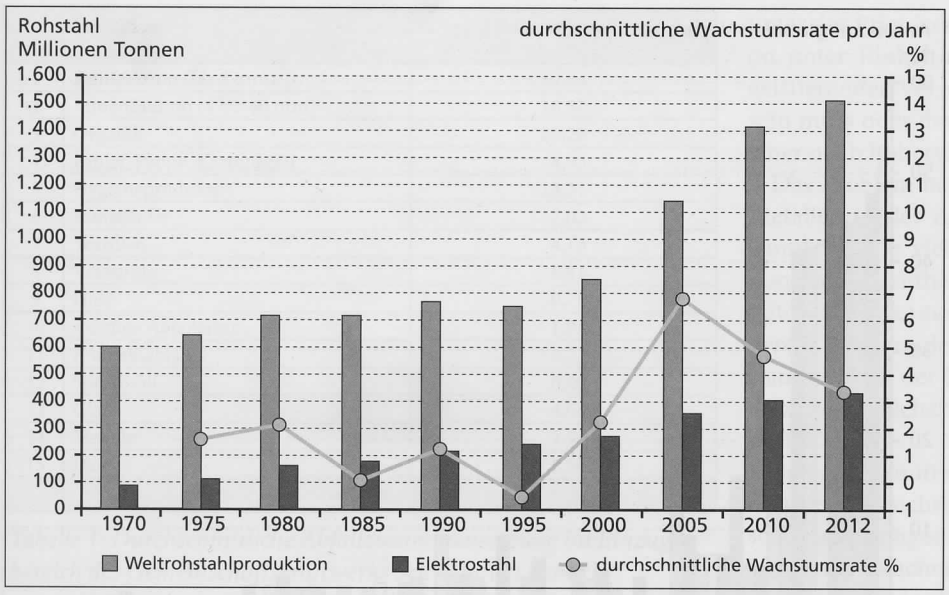


Abbildung 1: Die Entwicklung der Weltrohstahlproduktion (hellgrau) und der darin enthaltenen Elektrostahlproduktion (dunkelgrau) Quelle: World Steel Association 2012 [2]

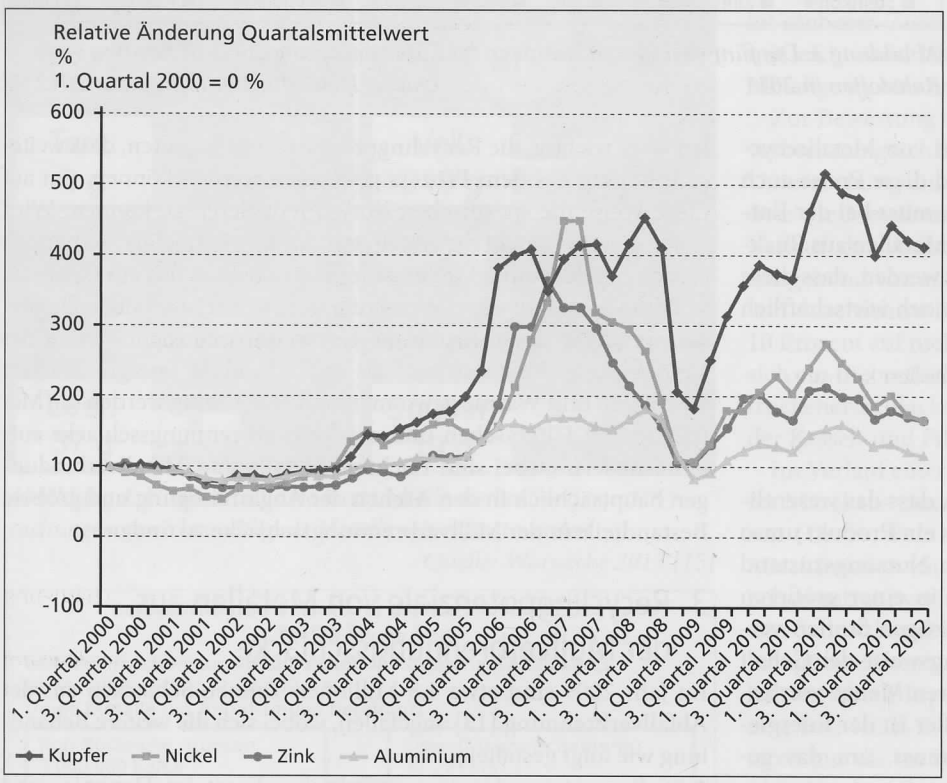


Abbildung 2: Die Entwicklung der Metallpreise (Quartalsmittelwerte)
Quelle: London Metals Exchange [7]

Werkstoffentwicklungen aus Schrott neue Produkte mit besseren Eigenschaften hergestellt.

Aus Abbildung 1 ist ebenfalls zu entnehmen, dass die Stahlproduktion seit der Jahrtausendwende wieder extrem angestiegen ist. Mit dem Beitritt zur WTO (Welthandelsorganisation) im Jahr 2001 begann Chinas Rückkehr in die Weltgemeinschaft und der Aufstieg zu einem Global Player [4] in den verschiedensten Bereichen wie auch in der Stahlindustrie. Nach Wagner und Huy [5] hat sich ein Strukturwandel auf der Konsumentenseite vollzogen, so dass die alte Faustregel, nach der 20 Prozent der Weltbevölkerung in Europa, Nordamerika und Japan 80 Prozent der Weltbergbauproduktion konsumiert haben, heute nicht mehr gilt. Mit den bevölkerungsreichen BRIC-Staaten (Brasilien, Russland, Indien und VR China) und anderen Schwellenländern sind heute über 50 Prozent der Weltbevölkerung an der Nachfrage nach Rohstoffen beteiligt [5].

Vor diesem Hintergrund und den daraus resultierenden drastischen Veränderungen in Hinblick auf die Verfügbarkeit von metallischen und mineralischen Rohstoffen wird das seit Jahrzehnten bekannte, prinzipielle Problem der begrenzten Rohstoffreserven in Europa wieder intensiv diskutiert.

Standen bei der Abfallverbrennung im Verlauf der bisherigen Entwicklung die Fragen des Schutzes der Umwelt, der Energiegewinnung aus den organischen Bestandteilen des Abfalls und der Verwertung der mineralischen Fraktion in Form der Müllverbrennungsschlacke 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 Müllverbrennungsschlacken zurückgewonnen werden können. Besonders unter dem Eindruck drastisch gestiegener Metallpreise in der jüngsten Vergangenheit ist die Metallgewinnung aus Rückständen der Abfallverbrennung interessant. Metalle eignen sich für diese Art des Recyclings, da sie heute schon mit sehr hohen Recyclingraten und entsprechenden Erfahrungen sowie in vielen Fällen ohne große Qualitätsverluste nahezu unbegrenzt wiederverwertet werden können.

1 Entwicklungen auf den internationalen Rohstoffmärkten

Die rasante wirtschaftliche Entwicklung in China führte zu einem starken Anstieg der Nachfrage nach Rohstoffen. In den vergangenen zehn Jahren erhöhten sich deshalb die Preise [6] für viele Metalle (Abbildung 2) in einem bis dahin nicht gekannten Maß, wobei sich die Märkte darüber hinaus zusätzlich durch eine extreme Volatilität auszeichnen. In einer Vielzahl der Fälle ist die Volatilität darauf zurückzuführen, dass im Gegensatz zur Vergangenheit heute in zahlreichen Bereichen die Märkte für Rohstoffe durch sehr unausgewogene Marktstrukturen gekennzeichnet sind.

Aus Abbildung 3 ist zu entnehmen, dass sich China in vielen Bereichen zu der größten rohstoffverbrauchenden Nation [8] entwickelt hat und damit eine dominierende Position einnimmt.

Marktstrukturen dieser Art sind dadurch gekennzeichnet, dass sich Entscheidungen im Verantwortungsbereich des größten Marktteilnehmers, etwa in Bezug auf Bedarf und Preisgestaltung, direkt und ohne große Verzögerungen auf alle anderen Marktteilnehmer auswirken.

Im Weiteren sind die Rohstoffmärkte auf der Angebotsseite sehr häufig durch oligopolistische und zum Teil sogar monopolistische Strukturen gekennzeichnet [9, 10], die ebenfalls erheblich zur Volatilität der Märkte beitragen.

In einer Studie, die im Auftrag der Europäischen Union erstellt wurde [11], wurden diejenigen Rohstoffe identifiziert, deren Verfügbarkeit für die EU von großer wirtschaftlicher Bedeutung ist. Der Studie zufolge wird das jeweilige Versorgungsrisiko nicht so sehr durch die tatsächliche physische Verfügbarkeit dieser Rohstoffe bestimmt, sondern vielmehr durch:

- die politische wirtschaftliche Stabilität in den Ländern, in denen die Rohstoffe gewonnen werden,
- den Grad der Konzentration der Produktion in einem Land oder einer Region,
- die Möglichkeit der Substitution durch andere Elemente und Verbindungen, und durch
- existierende beziehungsweise realisierbare Recyclingverfahren und -quoten.

Unter solchen Marktstrukturen können unversehens kurzfristige Preisveränderungen – in der Regel Preiserhöhungen, aber durchaus auch Preissenkungen – initiiert werden, deren Folgen nicht kalkuliert werden können.

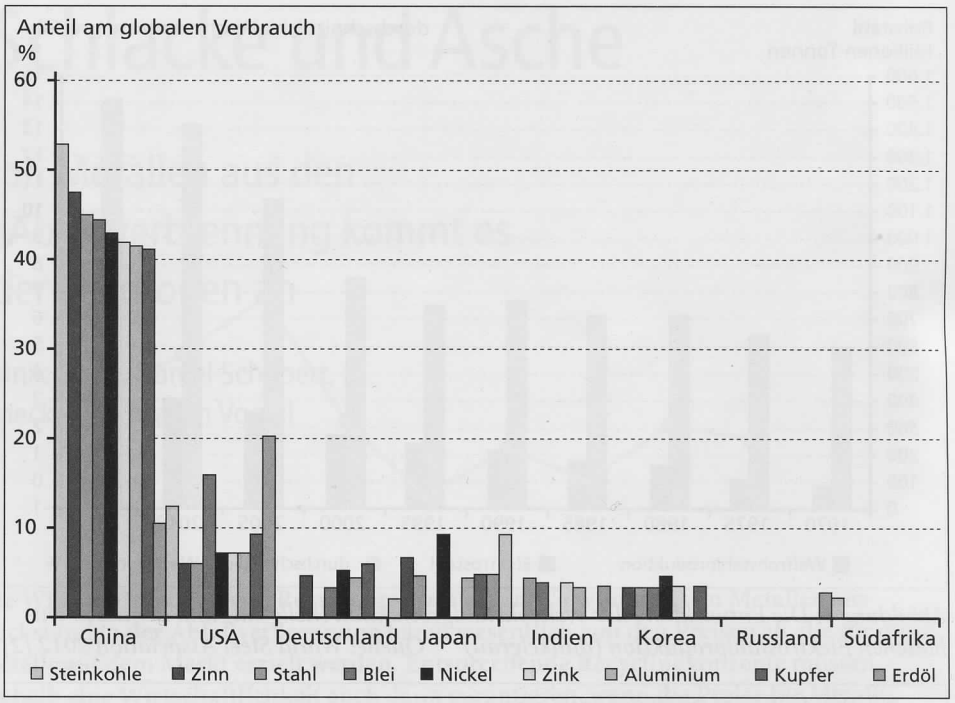


Abbildung 3: Die fünf wichtigsten Nationen im Zusammenhang mit dem Konsum von Rohstoffen in 2011 *Quelle: Deutsche Rohstoffagentur 2012 [8]*

Da die Metallpreise für die Wirtschaftlichkeit von Metallrecyclingprozessen von größter Wichtigkeit sind und diese Preise auch zukünftig weiterhin extrem volatil sein werden, muss bei der Entwicklung von Konzepten für das Recycling von Metallen aus Rückständen der Abfallverbrennung darauf geachtet werden, dass diese Prozesse auch in Phasen fallender Metallpreise noch wirtschaftlich betrieben werden können.

2 Charakteristische Merkmale von Recyclingprozessen

Die Analyse von Recyclingprozessen [12] zeigt, dass das wesentliche Problem beim Recycling darin besteht, dass ein Produkt umso mehr an Wert verliert, je stärker es in seinem Nutzungszustand und ganz besonders in seinem Abfallzustand in einer größeren Menge mit anderen gleich- oder verschiedenartigen Stoffen verteilt ist. Je geringer die Konzentration beziehungsweise der Gehalt eines Elementes oder Produktes in einer größeren Menge von anderen Elementen und Produkten ist, desto größer ist der Energie- und Kostenaufwand, der betrieben werden muss, um das gewünschte Element oder Produkt wiederzugewinnen.

Um ein Recyclingverfahren ökonomisch und ökologisch sinnvoll gestalten zu können, sollten die folgenden grundsätzlichen Bedingungen erfüllt sein:

- In den Reststoffen müssen möglichst hohe Konzentrationen des Stoffes/der Stoffe enthalten sein, die zurückgewonnen werden sollen.
- Die Reststoffe dürfen nur geringe Konzentrationen an störenden Begleitstoffen enthalten.
- Es sollte möglich sein, einfache und robuste Recyclingtechnologien anzuwenden.
- Die Sekundärprodukte sollten ohne Qualitätseinbußen verwendet werden können.

In der betrieblichen Recyclingpraxis werden diese Bedingungen jedoch selten zu 100 Prozent erfüllt sind. Somit steigt der technische und wirtschaftliche Aufwand eines Prozesses. In solchen Fällen ist es wichtig, die Recyclingprozesse so zu gestalten, dass weitere Produkte aus dem Prozess gewonnen werden können, um auf diese Weise die spezifischen Kosten reduzieren zu können. Wird unter diesem Aspekt die Abfallverbrennung betrachtet, so handelt es sich bei dem Abfall im angelieferten Zustand um ein Gemisch, in dem die metallischen Wertstoffe in einem relativ hohen Dispersionsgrad vorliegen. Durch die Decarbonisierung im Verlauf des Verbrennungsprozesses wird als erstes Produkt Energie in Form von Strom und Wärme gewonnen und gleichzeitig werden die Metalle in den Filteraschen und der Müllverbrennungsschlacke aufkonzentriert. Dabei sind flüchtige Metalle und Metallverbindungen hauptsächlich in den Aschen der Abgasreinigung und gröbere Bestandteile in der Müllverbrennungsschlacke zu finden.

3 Recyclingpotenziale von Metallen aus der Müllverbrennungsschlacke

Im Jahr 2009 sind etwa 4,8 Millionen Tonnen Schlacken aus der Abfallverbrennung [13] angefallen, wobei sich die weitere Behandlung wie folgt gestaltete:

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

Um abschätzen zu können, ob es weitere Recyclingpotenziale für Metalle aus den Müllverbrennungsschlacken gibt, muss untersucht werden, wie die chemischen Zusammensetzungen der unterschiedlichen Kornfraktionen der mineralischen Fraktion variieren und in welcher Form die Metalle oder Legierungen, Oxide, Sulfide und Chloride in diesen Kornfraktionen vorliegen. Von der Beantwortung dieser Fragen hängt sehr wesentlich ab, mit oder in welchen potenziellen Prozessen die Metalle weiter verwertet werden können. Dabei steht die Nutzung dieser Recyclingpotenziale allerdings

	Fraktionen	Massenanteile Ma.-% f.
1	Feinfraktion (bis 8 mm)	10,84
2	Mittelfraktion (8 bis 40 mm)	16,31
3	Organik	25,20
4	Papier, Pappe, Kartonagen	4,93
5	Hygieneprodukte	13,21
6	Kunststoffe	7,03
7	Textilien	4,13
8	Verbunde	6,41
9	Holz	0,75
10	sonstige Abfallarten	1,94
11	Problemabfall	0,22
12	Sperrmüll	0,00
13	Glas	4,04
14	Metalle	2,34
15	Inertes	2,64
	Gesamt 100,00	

Tabelle 1: Durchschnittliche Abfallzusammensetzung im Einzugsbereich des Gemeinschaftskraftwerks Schweinfurt GmbH
Quelle: Warnecke/Deike/Ebert/Vogell 2012 [14]

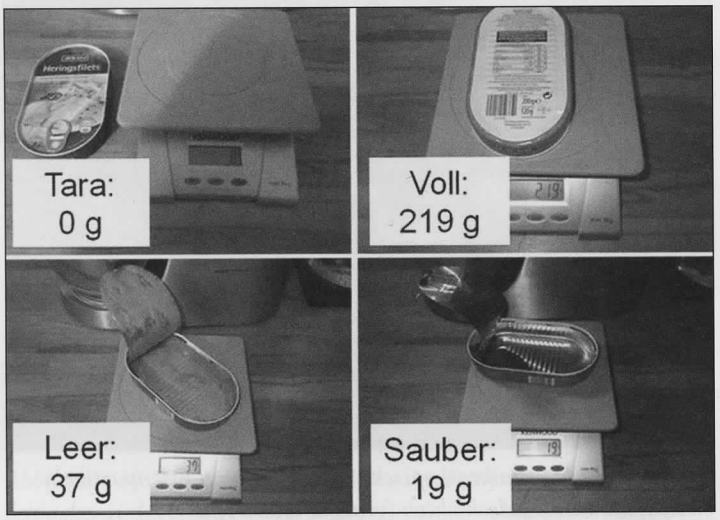


Abbildung 4: Nichtmetallische Bestandteile die bei Sortieruntersuchungen gewichtsmäßig als Metalle mit erfasst werden
Quelle: Warnecke 2013 [15]

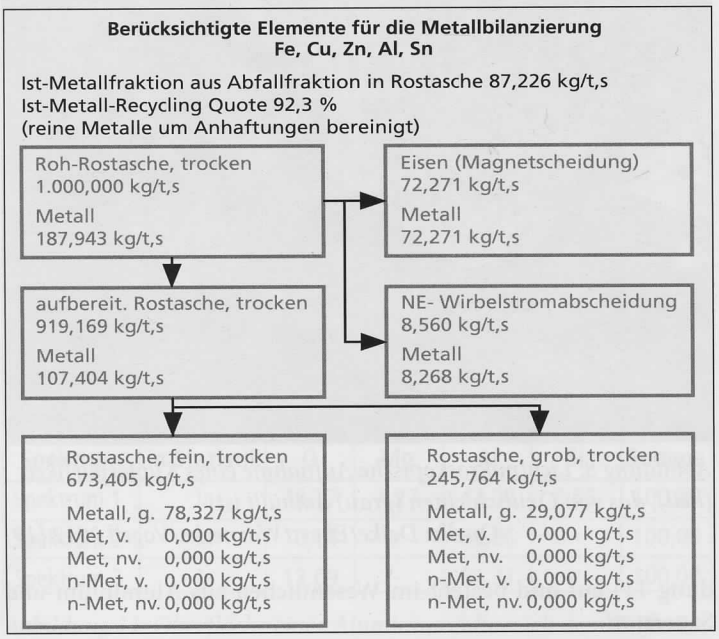


Abbildung 5: Metallgehalte von Müllverbrennungsschlacke und Ist-Recycling-Quote nach derzeitigem Stand der Technik
Quelle: Deike/Ebert/Warnecke/Vogell 2012 [18]

unter der Prämisse, dass die Verwertung der mineralischen Fraktion unter Einhaltung ihres bestehenden Kornaufbaus und ihrer existierenden Verwertungswege weiterhin unbedingt gewährleistet sein muss oder dass diese Fraktion unter Umständen idealerweise einer noch höherwertigen Nutzung zugeführt werden kann.

Das Problem bei der Bewertung von Recyclingpotenzialen von Metallen in der Abfallverbrennung besteht darin, dass nicht bekannt ist, wie viel Metall absolut im Input einer Abfallverbrennungsanlage enthalten ist. In der vorliegenden Studie wurde aufbereitete Schlacke aus dem Raum Würzburg untersucht, die unter anderem auch aus dem Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH stammte. Auf der Basis diverser Sortieruntersuchungen wurde ein durchschnittlicher Metalleintrag (Tabelle 1) von 2,34 Prozent ermittelt.

Bei der Ermittlung entsprechender Metallgehalte muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Metalle durch nichtmetallische Anhaftungen verunreinigt sind, die aber bei entsprechenden Sortieruntersuchungen nur bedingt berücksichtigt werden können. In Abbildung 4 ist exemplarisch dargestellt, in welcher Größenordnung sich Gewichtsdifferenzen bewegen können, wenn eine gebrauchte Metallverpackung mit Anhaftungen oder im absolut sauberen Zustand gewogen wird. Die Anhaftungen können somit leicht rund 100 Prozent (37 Gramm zu 18 Gramm) des reinen Metallgewichtes betragen.

Zur Bewertung von Recyclingpotenzialen von Metallen in Müllverbrennungsschlacken wurde im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung ein Bilanzierungsmodell (Abbildung 5) erstellt, mit dem die Metallströme in einer Abfallverbrennungsanlage und im Verlauf der Aufbereitung der Schlacke erfasst werden können. Ausgehend von einem Metall-Input in Abfallverbrennungsanlagen von durchschnittlich 2,34 Prozent Metall [16] auf den noch etwa 10 Prozent auf nichtmetallische Anhaftungen [17] entfallen, ergibt sich ein theoretischer Metallinhalt von 87,3 Kilogramm pro Tonne trockener Schlacke, wenn in erster Näherung die Metallgehalte in der Kessel- und Filterasche vernachlässigt werden.

Im Verlauf einer konventionellen Schlackenaufbereitung werden im Mittel aus einer Tonne trockener Schlacke 72,3 Kilogramm Eisen (Grob-, Fein- und Dosenschrott) und 8,3 Kilogramm NE-Mischfraktion (Summe 80,5 Kilogramm) über Magnet- und Wirbelstromtrennverfahren recycelt und dem Wertstoffkreislauf über den Schrotthandel wieder zugeführt. Wird diese recycelte Metallmenge aus Eisen und NE-Metall zum durchschnittlichen Metallgehalt im Abfall-Input in Relation gesetzt, so ergibt sich bereits heute eine Ist-Metall-Recycling-Quote von 92,3 Prozent. Wenn im Weiteren nur die im Beispiel ausgewählten fünf Elemente Aluminium (Al), Kupfer (Cu), Eisen (Fe), Zinn (Sn) und Zink (Zn) betrachtet werden, kann auf der Basis von Röntgenfluoreszenzuntersuchungen (RFA) für die restliche trockene Schlacke ein theoretischer Metallgehalt von 107,4 Kilogramm ermittelt werden,

Diese Angabe ist im ersten Ansatz rein theoretischer Natur, da nicht bekannt ist, wie die Metalle tatsächlich in der mineralischen Fraktion vorliegen. Insbesondere beim Aluminium kann angenommen werden, dass ein Teil in Form von Aluminiumoxid (Al_2O_3) Bestandteil der mineralischen Phasen ist.

Unabhängig vom Aluminium ist aus Abbildung 5 zu entnehmen, dass es bei einer heutigen Ist-Recyclingquote von 92,3 Prozent in der Zukunft durchaus möglich ist, mit einer noch weitergehenden Rückgewinnung von Metallen aus der Müllverbrennungsschlacke eine Recyclingquote größer 100 Prozent, bezogen auf den durchschnittlichen Metall-Input von 2,34 Prozent (-10 Prozent Anhaftungen) zu erreichen. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass über die Schlacke, die das Ergebnis eines Aufkonzentrations-

prozesses im Verlauf der Abfallverbrennung ist, auch Metalle zurückgewonnen werden können, die in sehr fein verteilter Form vorliegen und sich durch Sortierungen des Abfalls, wie sie bei den Untersuchungen zur Analyse des Metalleintrags durchgeführt werden, nur bedingt erfassen lassen.

4 Das Oxidationsverhalten von Metallen

In der vorliegenden Untersuchung wurde insbesondere die Fraktion mit Korngrößen kleiner 2 Millimeter untersucht, der nach derzeitigem Stand der Schlackenaufbereitung nur ein untergeordneter Wert beigemessen wird. Im Hinblick auf Eisen wurden in dieser Fraktion sehr oft bestimmte Partikel (siehe Abbildung 6) identifiziert. Diese Partikel bestehen aus einer umhüllenden Schicht aus Eisenoxid an der Oberfläche, die überwiegend aus Magnetit ($Fe_3 O_4$) besteht und einem inneren Kern, in dem sich mineralische Partikel unterschiedlicher Zusammensetzung befinden können, wobei die Kerne dieser Partikel auch durchaus hohl sein können.

Diese Strukturen entstehen dadurch, dass die Bildung von Eisenoxid mit einer Volumenvergrößerung verbunden ist. Durch das Wachstum der Oxidschichten entstehen Risse in diesen Schichten, so dass der Oxidationsprozess des Eisens ein kontinuierlich stattfindender Prozess ist, der so lange stattfindet, bis das Eisen vollständig aufgezehrt ist. In Abbildung 7 ist ein Ausschnitt während des Oxidationsprozesses von zwei Eisenpartikeln dargestellt.

Es ist deutlich zu erkennen, wie es im Verlauf des Oxidwachstums zur der Ausbildung der schalenartigen Strukturen der Eisenoxide kommt. Im unteren Teil des Bildes 7 ist zu erkennen, wie die Eisenoxide mit einem mineralischen Partikel versintern.

Da die Eisenoxidphasen zu einem großen Teil aus Magnetit bestehen, können sie über magnetische Verfahren aus der Feinfraktion der Müllverbrennungsschlacke abgetrennt werden.

Im Vergleich zum Eisen zeigen oxidierte Kupferpartikel (Abbildung 8) eine ähnliche Struktur.

Die Kupferpartikel sind ebenfalls von porösen und durchbrochenen Oxidschichten umhüllt, so dass der Oxidationsprozess des Kupfers bei hohen Temperaturen ebenfalls ein kontinuierlich ablaufender Prozess ist. Die Elementverteilung (Abbildung 9) zeigt, dass das Kupferpartikel im Wesentlichen aus Kupfer besteht, wobei im Inneren punktförmige Schwefelanreicherungen zu identifizieren sind. Des Weiteren sind Schwefelanreicherungen auf der Oberfläche des Partikels zu erkennen. Die das Kupferpartikel umgebenden Oxidschichten bestehen im Wesentlichen aus Kupferoxiden, wobei allerdings im linken unteren Bildbereich deutlich die Ausbildung von Aluminiumoxid zu erkennen ist.

Im Vergleich zum Eisen und Kupfer verläuft der Oxidationsprozess des Aluminiums nicht kontinuierlich sondern endet, wenn sich die erste dünne Aluminiumoxidschicht gebildet hat. Aluminiumoxid ist ein dichtes Oxid und verhindert den weiteren Zutritt von Sauerstoff, so dass der Oxidationsprozess nicht weiter ablaufen kann. Von daher enthalten Aluminiumkörner in der Feinfraktion im Inneren immer noch metallisches Aluminium (Abbildung 10). Die das Aluminium umhüllende und damit schützende Aluminiumoxidschicht ist allerdings so dünn, dass sie mit dem Lichtmikroskop nicht zu identifizieren ist.

Wie Aluminiumfolien zeigen, die in gezielten Versuchen auf Temperaturen deutlich über den Schmelzpunkt aufgeheizt werden, schmilzt das Aluminium, aber durch die umhüllende Schicht aus $Al_2 O_3$ (Schmelzpunkt 2.054 Grad Celsius) findet keine Tropfenbildung statt. Nach der thermischen Behandlung weist die Oberfläche der Aluminiumfolie eine *zerknitterte* Struktur (Abbildung 11) auf und besteht im Wesentlichen aus Aluminium und Sauerstoff.

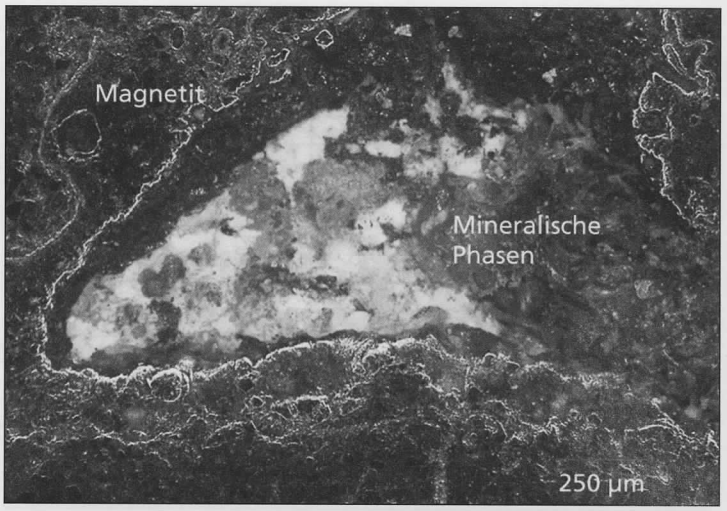


Abbildung 6: Magnetitschicht ($Fe_3 O_4$) die mineralische Partikel umhüllt *Quelle: Deike/Ebert/Warnecke/Vogell 2012 [19]*

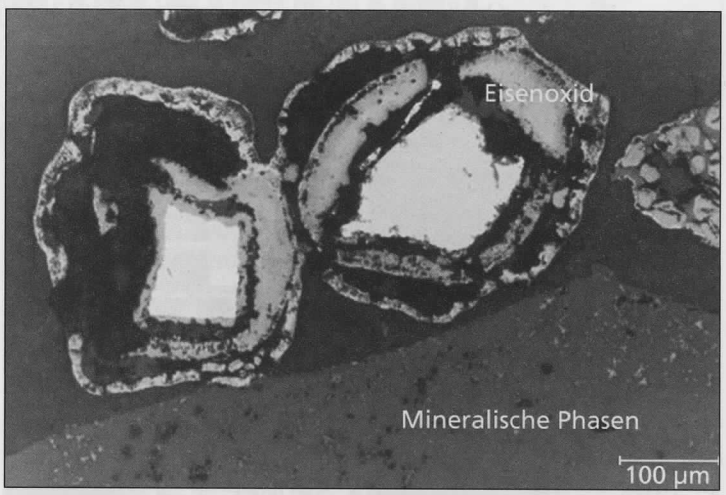


Abbildung 7: Lichtmikroskopische Aufnahme von Eisenpartikeln (weiß), die von Oxidschichten (grau) umhüllt sind
Quelle: Deike/Ebert/Warnecke/Vogell 2012 [19]

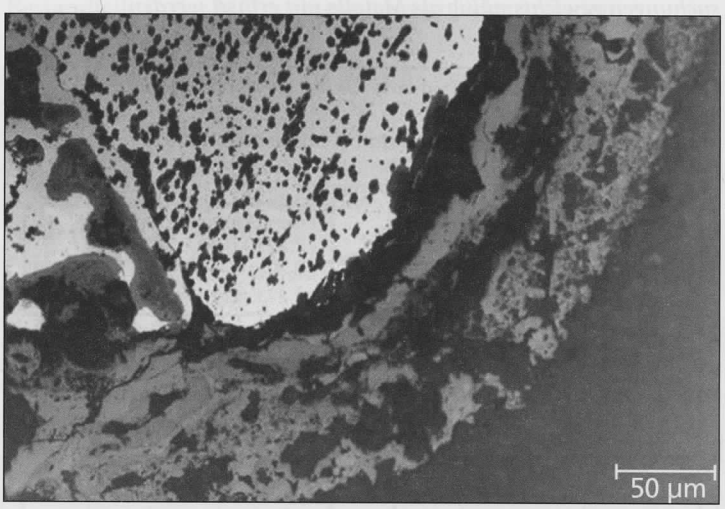


Abbildung 8: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Kupferpartikels (hell), das von Oxidschichten (grau) umhüllt ist
Quelle: Deike/Ebert/Warnecke/Vogell 2012 [19]

In Abbildung 11 ist außerdem ein dunkler Bereich zu erkennen, in dem zusätzlich ein höherer Magnesiumgehalt analysiert werden konnte. Von daher ist davon auszugehen, dass während des Auf-

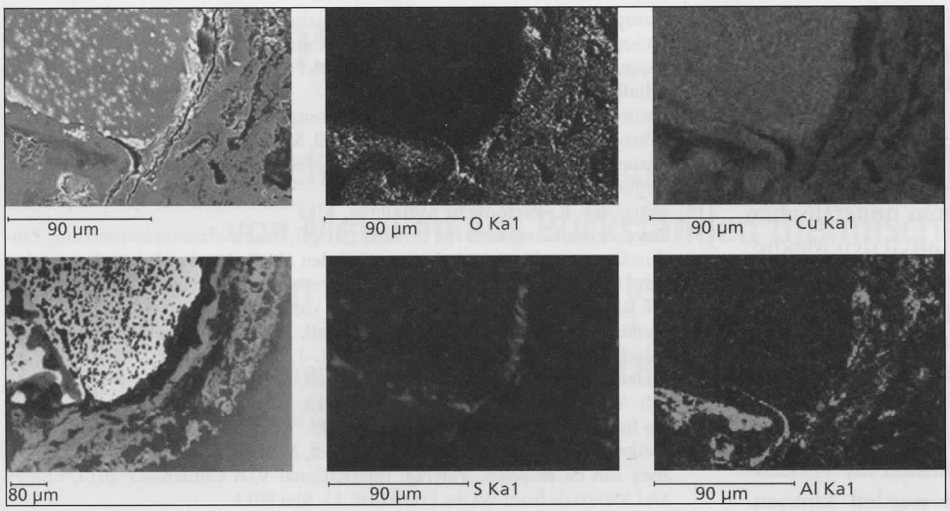


Abbildung 9: EDX-Mapping eines Kupferpartikels und der darum herum existierenden Oxidschichten Quelle: Deike/Ebert/Warnecke/Vogell 2012 [19]

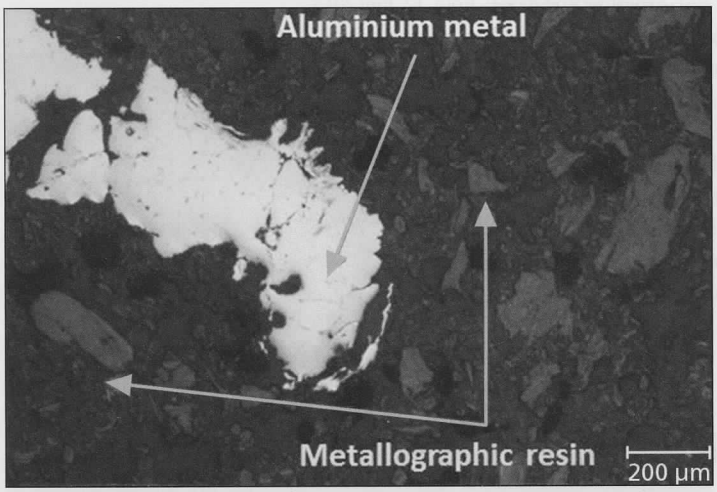
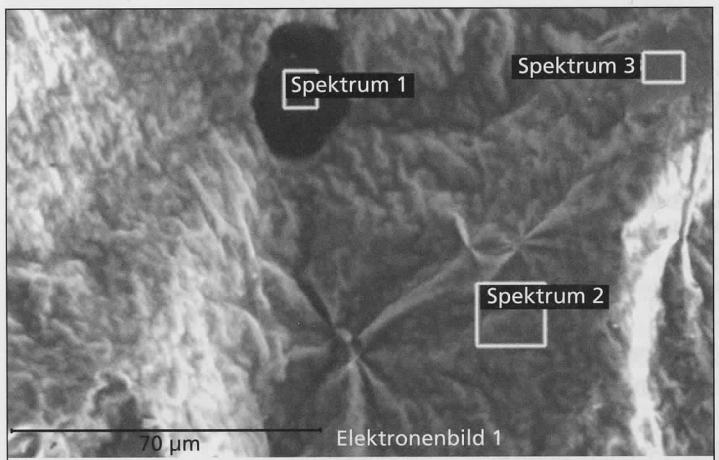


Abbildung 10: Aluminiumpartikel aus der Feinfraktion mit Schlackeneinlagerungen aber keiner lichtmikroskopisch erkennbaren Aluiniumoxidschicht

Quelle: Deike/Ebert/Warnecke/Vogell 2013 [20]



Spektrum	in Statistik	O	Mg	Al	Si	Summe
Spektrum 1	Ja	48,17	4,27	47,00	0,56	100,00
Spektrum 2	Ja	16,14	-	83,86	-	100,00
Spektrum 3	Ja	13,69	-	86,31	-	100,00

Abbildung 11: Oberfläche einer Aluminiumfolie nach dem Aufheizen auf eine Temperatur über den Schmelzpunkt von Aluminium (660 Grad Celsius)

Quelle: Deike/Ebert/Schubert/Ulum/Warnecke/Vogell 2013[21]

heizvorganges Reaktionen zwischen dem Aluminium und Metallen stattfinden, die in den aufgetragenen Farben enthalten sind.

5 Mögliche Verwertungswege für die Metalle aus der Müllverbrennungsschlacke

Ergebnisse von Trennversuchen (Abbildung 12) zeigen, dass die Korngrößenfraktion 0,5 bis 1 Millimeter zu 11 bis 24 Prozent aus schweren Partikeln mit einer Dichte von mehr als 3.000 Kilogramm pro Kubikmeter (kg/m³) und zu etwa 76 bis 89 Prozent aus Partikeln mit einer Dichte von weniger als 3.000 kg/m³ bestehen. Die schwere Fraktion besteht dabei zu etwa 48 bis 63 Prozent aus magnetischen und zu etwa 37 bis 52 Prozent aus nichtmagnetischen Partikeln.

Exemplarische Aufnahmen von Partikeln dieser verschiedenen abgetrennten Fraktionen sind in Abbildung 13 dargestellt. Hier ist

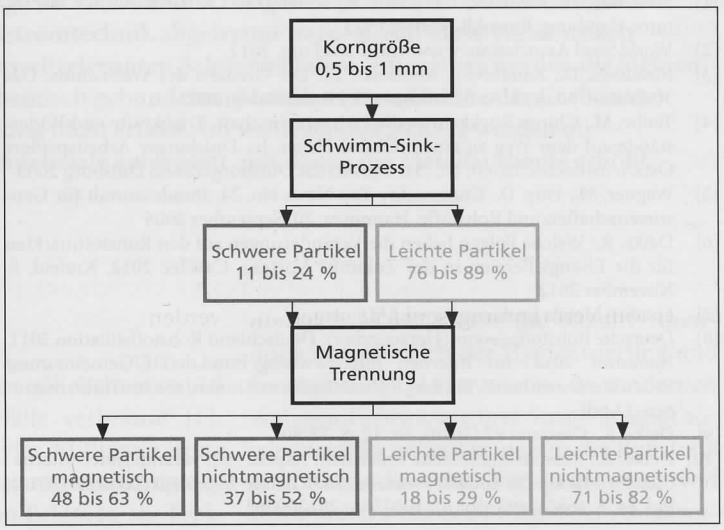


Abbildung 12: Ergebnisse von Trennversuchen einer nassausgetragenen Müllverbrennungsschlacke

Quelle: Deike/Ebert/Schubert/Ulum/Warnecke/Vogell 2013[21]

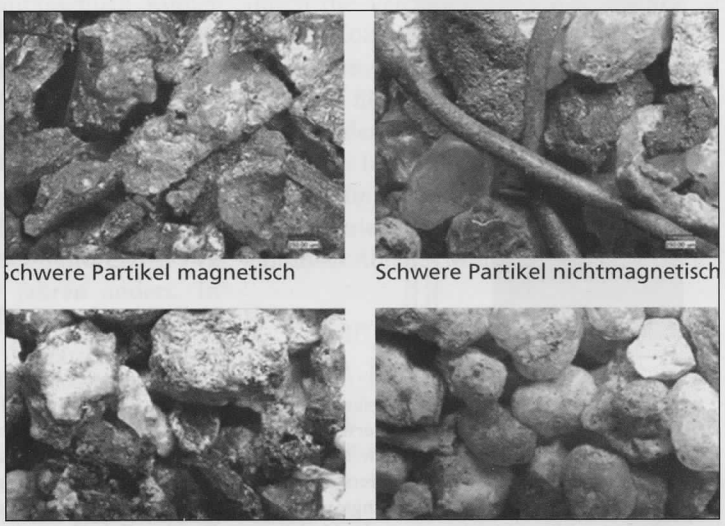


Abbildung 13: Ergebnisse von Trennversuchen einer nassausgetragenen Müllverbrennungsschlacke

Quelle: Deike/Ebert/Schubert/Ulum/Warnecke/Vogell 2013[21]

deutlich zu erkennen, dass in der nicht magnetischen schweren Fraktion noch Reste von Kupferdrähten enthalten sind. Im Gegensatz hierzu lässt die Form der schweren magnetischen Partikel vermuten, dass es sich hierbei im Wesentlichen um Eisenoxid handelt. Die Tatsache, dass selbst in der leichten Fraktion noch 18 bis 29 Prozent magnetische Partikel enthalten sind, lässt vermuten, dass durch die Versinterung von Magnetit mit anderen mineralischen Phasen Agglomerate entstanden sind, die zwar durch den Magnetit noch magnetisch sind, aber durch die anhaftenden mineralischen Phasenbestandteile eine Dichte von weniger als 3.000 kg/m³ aufweisen. Im Gegensatz dazu scheint die nichtmagnetische leichte Fraktion überwiegend aus mineralischen Bestandteilen zu bestehen.

Die prinzipielle wirtschaftliche Verwendung der unterschiedlichen Fraktionen hängt davon ab, in welcher Reinheit die Fraktionen in großtechnischen Prozessen dargestellt werden können. Sollte dies wirtschaftlich realisiert werden können, existieren metallurgische Prozesse in der Eisen- und Stahl- sowie NE-Metallindustrie, mit denen diese Fraktionen einer Verwertung und einer Rückführung in den Wertstoffkreislauf zugeführt werden können.

Literatur

[1] Meadows, D.; Meadows, D.; Zahn, E.; Milling, P.: Die Grenzen des Wachstums.Hamburg: Rowohlt, Verlag, 1973
[2] World Steel Association, www.world-steel.org, 2012
[3] Meadows, D.; Randers, J.; Meadows, D.: Die Grenzen des Wachstums. Das 30-Jahre-Update, 2. Aufl., Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 2007
[4] Taube, M.: Chinas Rückkehr in die Weltgemeinschaft. Triebkräfte und Widerstände auf dem Weg zu einem Global Player. In: Duisburger Arbeitspapiere Ostasienwissenschaften, Nr. .51. Universität Duisburg-Essen, Duisburg 2003
[5] Wagner, M.; Huy, D.: Commodity Top News No. 24. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 20. September 2005
[6] Deike, R.: Welche Folgen haben die Veränderungen auf den Rohstoffmärkten für die Eisengießereien in der Zukunft? Vortrag, CastTec 2012. Krefeld, 8. November 2012
[7] London Metals Exchange, www.LME.com
[8] Deutsche Rohstoffagentur (Herausgeber): Deutschland Rohstoffsituation 2011. Hannover 2012. Im Internet: http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-13.pdf
[9] Deike, R.: Giesserei 97 (2010), Nr. 12, S. 72-80
[10] Deike, R.: Ressourceneffizienz unter dem Aspekt sich verändernder internationaler Märkte für Industriemetalle. In: Chemie Ingenieur Technik (2012), Vol. 84, S. 1685-1693, doi: 10.1002/cite.201200063
[11] European Commission: Critical Raw Materials for the EU. http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/documents, 2010
[12] Esser, R: Thermodynamische Aspekte der Abfallverwertung. In: AbfallwirtschaftsJournal, vol 4, pp.227-238, 1992.
[13] Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.de
[14] Warnecke, R.; Deike, R.; Ebert, D.; Vogell, M.: 17. Internationaler Erfahrungsaustausch für Betreiber thermischer Abfallbehandlungsanlagen *Dreiländertreffen*. Linz, 14.-16. Oktober 2012
[15] Warnecke, R.: Persönliche Mitteilung, 2013
[16] Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.): Restmüllzusammensetzung, Einflussfaktoren, Abhängigkeiten von lokalen abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen (EFRE-Ziel-2-Gebiete in Bayern). Augsburg 2009
[17] Dr. Riedel, LfU Bayern: Pers. Mitteilung von 2012
[18] Deike, R.; Ebert, D.; Warnecke, R.; Vogell, M.: 24. VDI Fachkonferenz Thermische Abfallbehandlung. Würzburg, 11.-12. Oktober 2012
[19] Deike, R.; Ebert, D.; Warnecke, R.; Vogell, M.: Metal Recycling from bottom ash. Vortrag, 6th CEWEP Congress 2012. Würzburg, 6.-7. September 2012. Im Internet: http://www.cewep.eu/m_997
[20] Deike, R.; Ebert, D.; Warnecke, R.; Vogell, M.: Metals in bottom ash and how they can be recycled. Vortrag, International VDI Conference 2013, Energy and Materials from Waste. Frankfurt, 15. Mai 2013
[21] Deike, R. Ebert, D.; Schubert, D.; Ulum, R, Warnecke, R.; Vogell, M.: Das Verhalten von Metallen in MV-Schlacken unter Hochtemperaturbedingungen und die Folgen für ihre Rückgewinnung. Vortrag, 12. VDI Fachkonferenz Feuerung und Kessel, Köln, 12. Juni 2013

Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike
Universität Duisburg-Essen
Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Institut für Metallurgie und Umformtechnik (IMU)
Lehrstuhl Metallurgie der Eisen- und Stahlerzeugung
Friedrich-Ebert-Straße 12 · D-47119 Duisburg
Tel. 0203.379-3455 · Fax -379-3464
eMail: ruediger.deike@uni-due.de · Internet: http://www.uni-due.de/mus

Dipl.-Ing.(FH) Martin Vogell
C.C. Reststoff-Aufbereitung GmbH & Co. KG Würzburg
Nördliche Hafenstr. 3a · D-97080 Würzburg
Tel. 0931.9 11 75 · Fax -9 11 76
eMail: Vogell.CCRA@online.de · Internet: http://www.cc-gruppe.com/_de/u10.aspx

Dr.-Ing. Ragnar Warnecke
GKS-Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH
Hafenstr. 30 · D-97424 Schweinfurt
Tel. 09721.6580-120 · Fax -6580-160
eMail: ragnar.warnecke@gks-sw.de · Internet: http://gks-sw.de

Anzeige

Bernhard Weller, Marc-Steffen Fahrion, Thomas Naumann (Hrsg.)

Gebäudeertüchtigung im Detail für den Klimawandel

Verletzbarkeitsanalysen im Gebäudebestand, Klimaanpassung für Wohngebäude, Klimaanpassung für Nichtwohngebäude

Band 4 der Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes **REGKLAM** – Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden

156 Seiten. DIN A4. Broschur. Zahlreiche Abbildungen und Tabellen, 77 davon in Farbe. Preis: 42,00 Euro.

ISBN: 978-3-944101-04-0. RHOMBOS-VERLAG, Berlin 2013

Das Projekt REGKLAM wird vom BMBF gefördert – Förderkennzeichen FKZ 01LR0802.

Auf der Grundlage des in Heft 3 beschriebenen Wissensstandes zu veränderten Einwirkungen auf Gebäude und des diesbezüglichen Anpassungsbedarfs beinhaltet Heft 4 praxisrelevante Erkenntnisse zur konkreten Klimaanpassung von Gebäuden. Die Ziele liegen jeweils in der Vermeidung unerwünschter Schäden oder Beeinträchtigungen für die Nutzer. In diesem Zusammenhang fokussieren die Autoren einerseits die bereits verfügbaren bzw. in Entwicklung befindlichen Untersuchungsmethoden zur Analyse der Verletzbarkeit von Gebäuden gegenüber definierten Einwirkungen und andererseits bau- und haustechnische Lösungsansätze zur systematischen Verringerung dieser Verletzbarkeit. Die Auswahl der vier betrachteten Einwirkungsarten Sommerhitze, Überflutung, Starkregen und Hagel resultiert aus den bisherigen Ergebnissen zu zukünftig veränderten Klimaeinwirkungen in der Modellregion Dresden. Dabei legen die Autoren darauf Wert, dem Leser potenzielle Konsequenzen am Gebäude sowie typische Schwachpunkte bestimmter Gebäudetypen aufzuzeigen.

➤ http://www.rhombos.de/shop/buecher/gebaudeertuchtigung-im-detail-fur-den-klimawandel.html

www.rhombos.de