

Elektrodynamische Fragmentierung von MVA-Schlacken

– Zerlegung der Schlacken und Abscheidung von Chloriden und Sulfaten –

Severin Seifert, Volker Thome, Christof Karlstetter und Matthias Maier

1.	Einleitung.....	353
2.	Prinzip der Elektrodynamischen Fragmentierung.....	355
3.	Fragmentierung von MVA-Schlacke	357
4.	Untersuchungsmethoden zur Charakterisierung der fragmentierten Schlacke.....	358
5.	Ergebnisse	358
6.	Diskussion.....	363
7.	Ausblick.....	363
8.	Literatur.....	364

1. Einleitung

Der Hausmüll sowie anfallende Industrieabfälle enthalten zahlreiche Wertstoffe und wertvolle Rohstoffe, welche nach der Verbrennung in Müllverbrennungsanlagen (MVA) in Form von MVA-Schlacke größtenteils auf Deponien verbracht werden. Die MVA-Schlacke wird vor der Verwertung auf Deponien aufbereitet, jedoch können mit derzeitigen Methoden wie Magnetscheidung, Wirbelstromverfahren und Windsichtung nur etwa 10 % aus dem Schlackevolumen wiedergewonnen werden. Dabei werden vor allem magnetische Metalle, wie Grobschrott bzw. Eisenmetalle, und Nichteisenmetalle aus dem Schlackestrom abgetrennt, um diese zu recyceln und für neue Produkte zur Verfügung zu stellen (Bild 1).

Die Wiedergewinnung weiterer Wertstoffe ist gegenwärtig nur mit großem Aufwand möglich, da die einzelnen Bestandteile in einer silikatischen Matrix eingebunden und mit Aschen sowie Stäuben belegt sind. Besonders für die Fraktionen unterhalb von 6 mm gibt es kein wirtschaftliches Verfahren, um die übrigen Eisenmetalle und Nichteisenmetalle oder sogar andere wertvolle Rohstoffe zu gewinnen. Deshalb wird das restliche Schlackevolumen heutzutage überwiegend deponiert, als Deponiebaustoff verwendet



Bild 1: MVA-Schlacke nach Abtrennung von Grobschrott und Eisenmetallen durch Magnetscheidung (links), abgetrennter Grobschrott (rechts)



Bild 2: Mit silikatischer Matrix verbundene MVA-Schlacke

oder im Straßenunterbau sowie als Füllmaterial im Untertagebau eingesetzt. Eine Nutzung der Schlacke als Zementersatzstoff wie Hüttsand oder Flugasche ist aufgrund der Gehalte an metallischem Eisen und Aluminium sowie Chloriden und Sulfaten nicht möglich, obwohl diese durch die beim Verbrennungsprozess neu gebildeten Mineralien festigkeitsbildende Eigenschaften, ähnlich zementärer Systeme, aufweist.

In Deutschland werden jährlich ungefähr 5 Millionen Tonnen MVA-Schlacke produziert. Das Deponieren dieser Mengen hat zur Folge, dass in etwa 20 Jahren die Flächen dafür in der Bundesrepublik zur Neige gehen [1]. Deswegen werden neue und effizientere Aufbereitungsmethoden gesucht, um das Schlackevolumen zu reduzieren und gleichzeitig daraus höherwertige Materialien zu gewinnen.

In einem Forschungsvorhaben namens *Molecular Sorting* arbeitet das Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) gemeinsam mit weiteren Fraunhofer-Instituten im Rahmen eines durch die Fraunhofer-Gesellschaft geförderten Programms *Märkte von übermorgen* an innovativen Aufbereitungsverfahren für große Stoffströme. Dabei handelt es sich um eine methodenorientierte Technologie-Entwicklung mit dem Ziel, mittel- bis langfristig die Wieder- und Weiterverwertung von Werkstoffen durch neue, leistungsfähige Trennprozesse nach der Herstellung oder Nutzung von Produkten zu ermöglichen. In diesem Projekt werden neue Prozesse entwickelt und erprobt, die die Ressourceneffizienz steigern können. Diese werden zunächst für Altglas, Altholz, Metalllösungen, heiße Gase, Hybridbauteile sowie für MVA-Schlacken erforscht [2].

Eine vielversprechende Technologie für die Aufbereitung von MVA-Schlacke ist die Technik der elektrodynamischen Fragmentierung. Dabei werden mithilfe von ultrakurzen Hochleistungsimpulsen Verbundwerkstoffe selektiv in ihre Einzelbestandteile aufgetrennt. In geeigneten nachgeschalteten Sortierprozessen können dann diese Bestandteile in Stoffgruppen separiert und recycelt oder neuen Verwertungswegen zugeführt werden.

2. Prinzip der Elektrodynamischen Fragmentierung

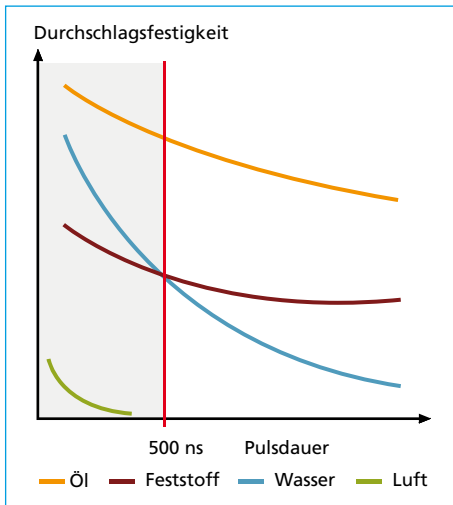


Bild 3: Elektrische Durchschlagsfestigkeit von verschiedenen Materialien in Abhängigkeit von der Pulsdauer der Entladung

Quelle: Bluhm, H.; Frey, W.; Giese, H.; Hoppé, P.; Schultheiß, C.; Sträßner, R.: Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, (2000), Nr. 5, S. 625-635, modifiziert

Das Verfahren der elektrodynamischen Fragmentierung beruht auf dem Prinzip, dass die Durchschlagsfestigkeit eines Materials gegenüber elektrischer Entladungen keine physikalische Konstante ist [3]. Diese ist abhängig von der Pulsdauer des elektrischen Schlages und somit umgekehrt proportional zur Leitfähigkeit der meisten Materialien (Bild 3).

Auf Basis dieses physikalischen Effektes ist es möglich einen elektrischen Impuls kontrolliert in eine festes Material zu zwingen. Dafür wird der zu behandelnde Festkörper unter Wasser zwischen zwei Elektroden platziert und eine Entladung mit einer Pulsdauer unterhalb von 500 ns abgegeben. Da die Durchschlagsfestigkeit von Wasser bei ultrakurzen Pulsen höher ist als die der meisten Materialien (Bild 3), verläuft der Impuls durch den Festkörper und nicht durch das umgebende Wasser, um zur Gegenelektrode zu gelangen. Eine

Impulsentladung durchläuft einen Festkörper entlang von Korngrenzen, da diese den Weg des geringsten Widerstandes darstellen. Die Ursache dafür sind die unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften der verschiedenen Phasen im Material. Beim Anlegen einer Spannung an die Elektroden entsteht zunächst in Abhängigkeit von der Elektrodenkonfiguration ein inhomogenes elektrisches Feld (Bild 4.1), was dazu führt, dass die Oberflächen der einzelnen Phasen unterschiedlich stark polarisiert werden. Diese Polarisation der Oberflächen ist wie ein Wegweiser für die später folgende elektrische Entladung.

Zusätzlich werden durch den Effekt der Elektrostriktion Spannungen im Festkörper erzeugt, welche die Auftrennung begünstigen. Durch die Abgabe von Impulsen entstehen zunächst mehrere energiearme Funkenentladungen (Bild 4.2), welche das Material ebenfalls vorschwächen. Sobald ein Impuls den Festkörper durchschlägt und die Gegenelektrode erreicht (Bild 4.3) kommt es zur Ausbildung eines Plasmakanals (Bild 4.4).

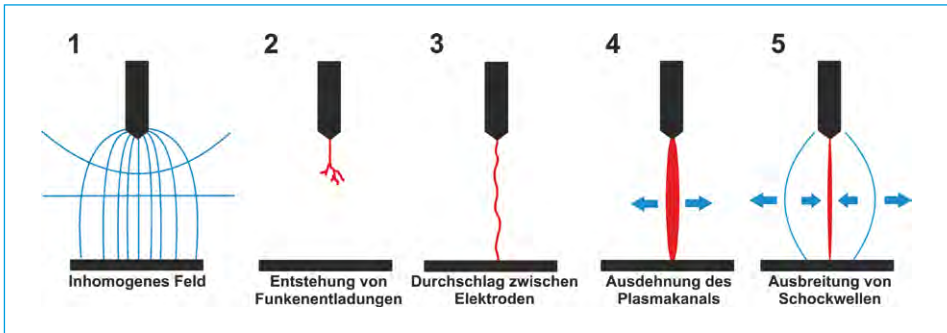


Bild 4: Schematische Darstellung einer elektrischen Entladung zwischen zwei Elektroden

Die Ausdehnung des Plasmakanals im Festkörper erzeugt eine Elektroexplosion mit einer Druckwelle von etwa 9 bis 10 GPa und kurzfristigen Temperaturen von 10^4 K. Die Druckwelle wird von der Gefäßwand reflektiert und generiert zusätzlich eine Kompressionswelle (Bild 4.5), welche die Freilegung der einzelnen Komponenten des Festkörpers verstärkt. Durch Abgabe von mehreren dieser gepulsten elektrischen Entladungen kann ein Verbundwerkstoff entlang seiner Korngrenzen selektiv aufgetrennt werden (Bild 5).

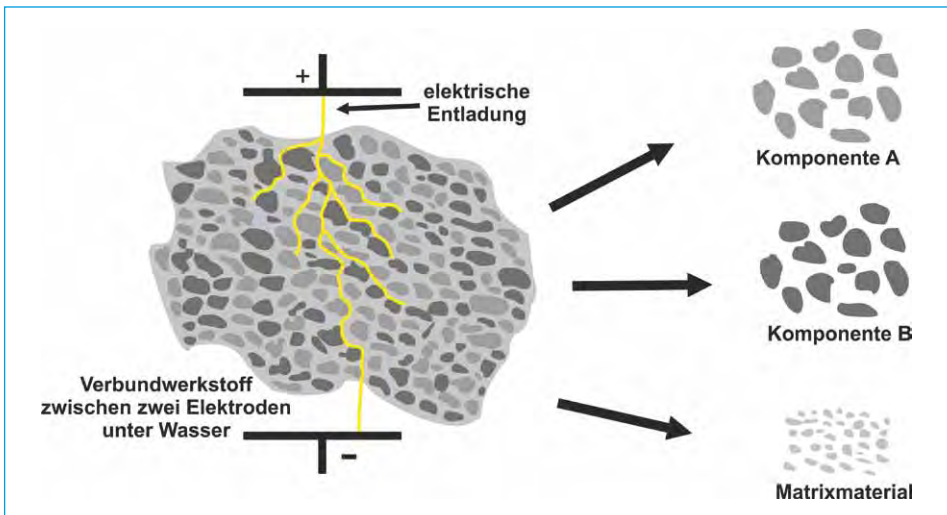


Bild 5: Prinzip der elektrodynamischen Fragmentierung eines Verbundwerkstoffes

Der entscheidende Vorteil der Fragmentierungstechnik gegenüber dem Brechen oder Mahlen von Verbundwerkstoffen ist die phasenreine Trennung. Während mechanische Verfahren die Kräfte im gesamten Material verteilen, bringt die elektrodynamische Fragmentierung die Trennenergie an den Korn- und Phasengrenzen auf. Im Ergebnis haften nach dem Brechen zahlreiche Nebenbestandteile am Material. Nach der Fragmentierung hingegen liegen die Bestandteile häufig getrennt voneinander vor.

Das Prinzip der elektrodynamischen Fragmentierung wurde vor 70 Jahren an der Universität Tomsk in Russland entdeckt [4]. Einige Jahre später wurde am Karlsruher Institut für Technologie in Zusammenarbeit mit den Wissenschaftlern aus Tomsk eine Fragmentierungsanlage mit einem Durchsatz von einer Tonne pro Stunde entwickelt und patentiert [5]. Das Herzstück einer solchen Anlage ist ein Hochspannungsgenerator, ein sogenannter Marx-Generator [6], welcher es ermöglicht sehr hohe Spannungen aufzubauen und diese in Form von ultrakurzen aber hochenergetischen Impulsen abzugeben. Für eine hohe Effektivität der Fragmentierungsanlage ist es dabei entscheidend, möglichst viele Entladungen in kurzer Zeit abzugeben. Dies erfordert wiederum ein schnelles Aufladen der Kondensatoren.

Heutzutage existieren großtechnische Fragmentierungsanlagen für verschiedene Industriezweige. Im Bergbau wird die Fragmentierungstechnologie z.B. dazu verwendet, um Wertminerale, wie Kupfererz, aus dem Nebengestein herauszulösen. Eine weitere Anwendung dieser Technik im Bergbau ist die Vorschwächung des abgebauten Gesteins. Damit wird beim späteren Mahlvorgang weniger Energie benötigt. Ebenso werden diese Anlagen beispielsweise für das kontaminationsfreie Mahlen von hochreinem Quarz zur Herstellung von Glasfaserkabeln eingesetzt.

3. Fragmentierung von MVA-Schlacke

In dieser aktuellen Arbeit wird die Anwendbarkeit der Fragmentierungstechnologie für das Recycling unterschiedlicher Verbundwerkstoffe, u.a. MVA-Schlacke, erforscht.



Bild 6: Laboranlage zur elektrodynamischen Fragmentierung am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)

Die nötigen Forschungsarbeiten können an einer Laboranlage zur Durchführung von elektrodynamischer Fragmentierung im Batch-Verfahren ausgeführt werden (Bild 6). Diese Anlage arbeitet mit einem 5-Liter-Prozessgefäß und einem Spannungsbereich von 90 kV bis 200 kV bei einer Frequenz von 5 Hz. Somit können innerhalb von einer Sekunde maximal fünf Impulse mit einer Energie von 10-100 J/cm und einer konstanten Entladungszeit von 150 ns abgegeben werden. Der Elektrodenabstand ist in dieser Anlage stufenlos zwischen 20 mm und 40 mm änderbar.

Für die Versuche zur Aufbereitung von MVA-Schlacke konnten Proben von verschiedenen Müllverbrennungsanlagen in Deutschland fragmentiert werden. Dafür wurden die Schlacken direkt nach der Nassentschlackung entnommen und luftdicht gelagert, so dass die Behandlung an frischen und noch reaktiven Proben

erfolgen konnte. Von jeder Schlacke wurde jeweils eine Probenmenge von etwa 1 kg in das mit Wasser gefüllte Prozessgefäß gegeben. Um eine optimale Auftrennung der Komponenten zu erreichen, mussten die Fragmentierungsparameter, wie die Spannung, der Elektrodenabstand und die Anzahl der Impulse probenabhängig variiert werden. Nach der Fragmentierung erfolgte eine Klassierung der behandelten Schlacken in verschiedenen Fraktionen. Die anschließende Trocknung dieser Fraktion und Sortierung in Stoffgruppen führte zu einem ersten Überblick der erhaltenen Produkte. Zusätzlich konnte nach jedem Versuch eine Fraktion kleiner 125 µm aus dem Prozesswasser abfiltriert werden.

Ein Teil der frischen Schlackenproben wurde für vier Wochen unter Wasser gelagert. Dies sollte die in der konventionellen Aufbereitung übliche dreimonatige, feuchte Lagerung zur Alterung der Schlacke simulieren. Somit konnten die unterwassergelegerten Proben später mit den Produkten aus der Fragmentierung verglichen und bewertet werden.

4. Untersuchungsmethoden zur Charakterisierung der fragmentierten Schlacke

Zur Charakterisierung und Bewertung der unbehandelten und fragmentierten Schlacke wurden die Proben vor und nach der elektrodynamischen Fragmentierung hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung und des mineralogischen Phasenbestandes untersucht. Dafür mussten die gewonnenen Kornfraktionen sowie das Ausgangsmaterial aufgemahlen und für die jeweilige Messmethode präpariert werden. Für die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung kam ein Röntgenfluoreszenzspektrometer (RFA) zum Einsatz. Die Durchführung der mineralogischen Phasenanalysen erfolgten an einem Pulverröntgendiffraktometer (XRD), wobei die Auswertung der resultierenden Diffraktogramme sowohl qualitativ als auch quantitativ mittels Rietveld-Analyse [7] stattfand. Zur Ermittlung des röntgenamorphen Anteils in den Proben wurden die Messungen zusätzlich mit einem externen Standard (Zirkon) über die G-Faktor Methode ausgewertet [8].

5. Ergebnisse

Nach der elektrodynamischen Fragmentierung konnte bei allen untersuchten MVA-Schlacken eine Grobfraktion größer 2 mm gewonnen werden, welche 40 % bis 60 % des Gesamtvolumens der Schlacken beträgt. Diese Grobfraktionen wurden in Stoffgruppen sortiert, wodurch sich herausstellte, dass alle fragmentierten Schlacken qualitativ aus fünf Stoffgruppen bestehen (Bild 7).

Die Schlacken sind aus folgenden Stoffgruppen zusammengesetzt:

- Magnetische Metalle (z.B. Eisenmetalle und Messing)
- NE-Metalle (nichtmagnetisch)
- Steine und Keramiken



Bild 7: Die fünf Stoffgruppen einer ausgewählten fragmentierten MVA-Schlacke

- Gläser in verschiedenen Farben
- Schmelzprodukte mit neu gebildeten Mineralphasen in einer glasigen Matrix

Gegenüber herkömmlichen Aufbereitungsmethoden wie der Grobschrottabscheidung, der NE-Wirbelstromabscheidung und der Schlackensiebung werden die einzelnen Stoffgruppen durch die Fragmentierung sehr sauber aus der Schlackenmatrix freigelegt. Besonders die Metalle werden effektiv von Asche- und Schlackenresten befreit. Diese Reste befinden sich nach dem Prozess in der Feinfraktion kleiner 2 mm sowie im Filtrat, welches sich aus dem Prozesswasser abgesetzt hat.

Abhängig von der Herkunft der untersuchten Schlacken waren die genannten Stoffgruppen quantitativ in unterschiedlichen Volumenanteilen zu finden. Deshalb sollen im Folgenden die Untersuchungsergebnisse nur einer ausgewählten Schlacke aus einer Müllverbrennungsanlage in Deutschland dargestellt und diskutiert werden.

Um festzustellen in welchen Stoffgruppen sich die unerwünschten Schwermetalle, wie Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Quecksilber und Zink befinden, wurden die unbehandelte Schlacke, die nichtmetallischen Stoffgruppen und das Filtrat aus dem Prozesswasser mittels RFA analysiert. Das Balkendiagramm in Bild 8 zeigt, dass die Schwermetalle zu großen Teilen in das Filtrat abgetrennt werden und die anderen Stoffgruppen gegenüber der unbehandelten Schlacke nur geringe Gehalte an Schwermetallen

aufweisen. Einzig der hohe Chromgehalt im Glas, resultiert aus der großen Menge an Grünglas, welches sich in dieser Glasgruppe befindet. Die Schwermetalle Cadmium und Quecksilber sind in der ausgewählten Schlacke nur in sehr geringen Mengen von unter 1 ppm zu finden. Das Kupfer tritt zu großen Anteilen in den Schmelzprodukten sowie im Filtrat auf.

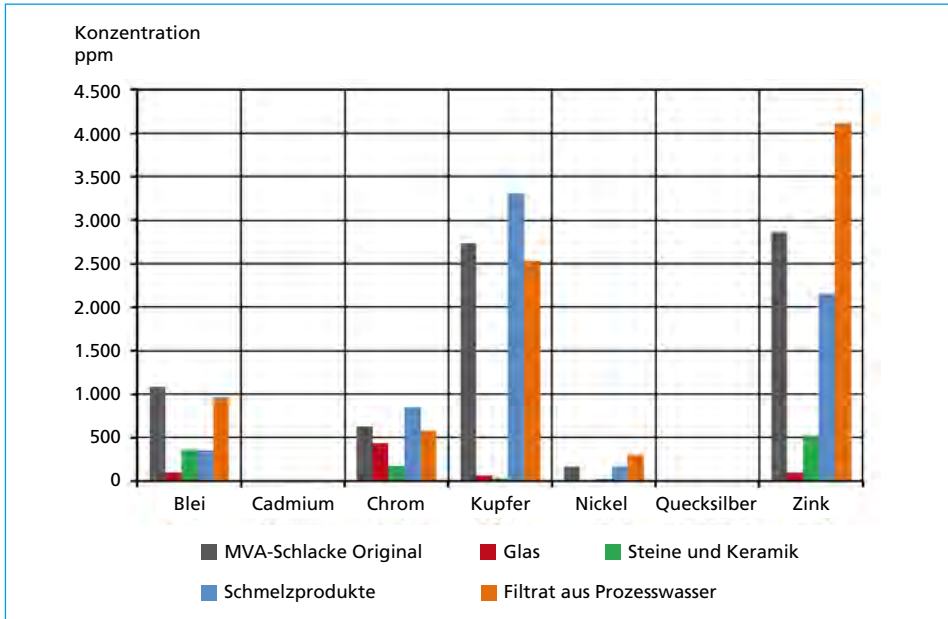


Bild 8: Metall- und Schwermetallgehalte in der originalen MVA-Schlacke, in den einzelnen Stoffgruppen und im Filtrat aus dem Prozesswasser

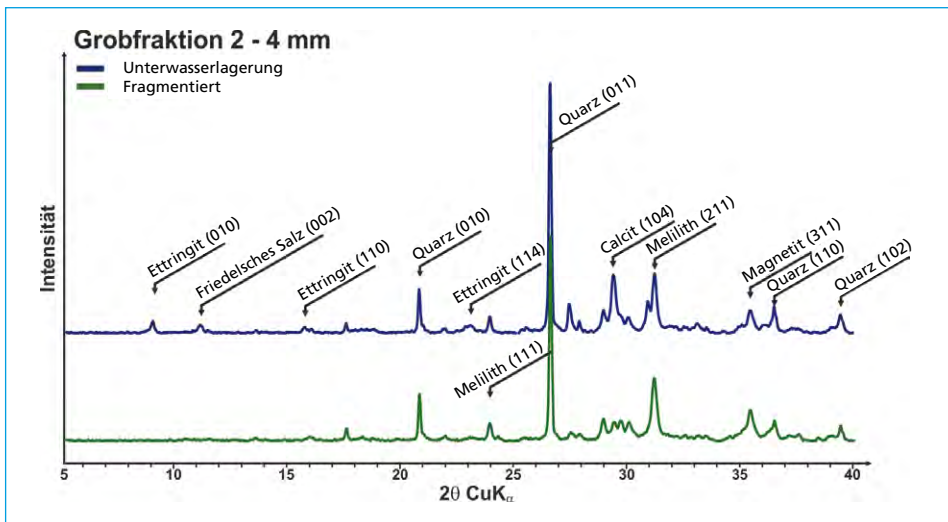


Bild 9: Vergleich der Diffraktogramme der fragmentieren und unter Wasser gelagerten Schlacke (Grobfraktion)

Die Bilder 9 und 10 zeigen den Vergleich der Phasenzusammensetzungen aus den XRD-Messungen der verschiedenen Kornfraktionen der fragmentierten Schlacke und den Messungen der abgetrennten Fraktionen aus der unter Wasser gelagerten Probe. Daraus ist ersichtlich, dass durch den Fragmentierungsprozess sowohl Sulfate als auch Chloride in Lösungen gehen. Diese werden mit dem Prozesswasser ausgewaschen und fallen im abgesetzten Filtrat mit sekundären Hydratphasen wie Ettringit, Friedelsches Salz und Bassanit bzw. Gips aus (Bild 11). Ettringit – $(\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26 \text{H}_2\text{O})$ – kristallisiert dabei aus aluminathaltigen und sulfathaltigen Lösungen. Das Friedelsche

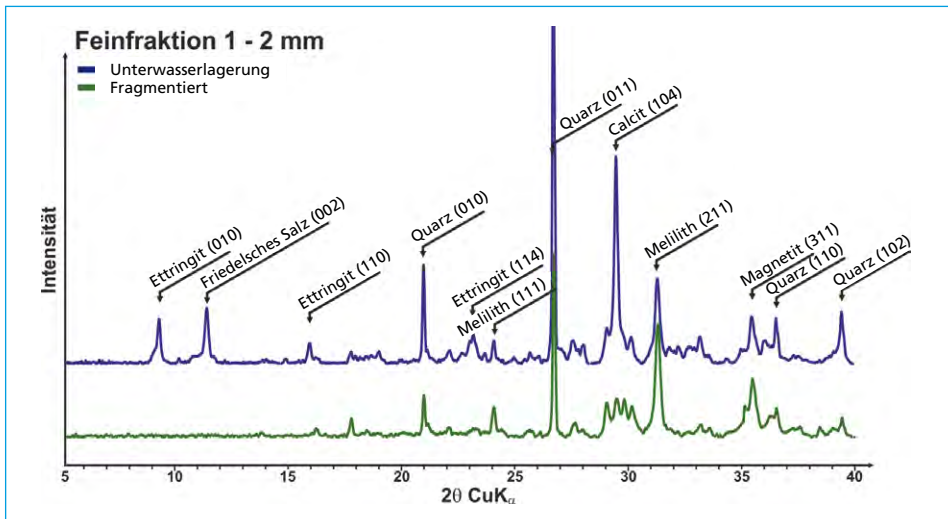


Bild 10: Vergleich der Diffraktogramme der fragmentieren und unter Wasser gelagerten Schlacke (Feinfraktion)

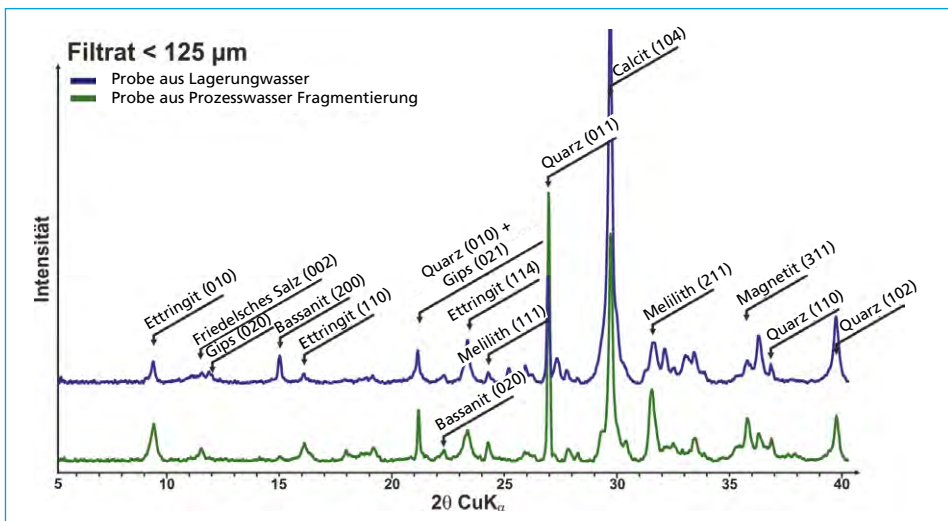


Bild 11: Vergleich der Diffraktogramme der Filtrate aus dem Prozesswasser der Fragmentierung und dem Wasser der gelagerten Schlacke

Salz – $(\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{Cl},\text{OH}) \cdot 2 \text{H}_2\text{O})$ – bildet sich in Gegenwart von chloridhaltigen Lösungen [10]. In der Grob- und Feinfraktion der fragmentierten Schlacke sind diese Hydratphasen nicht nachweisbar (Bilder 9 und 10). Hingegen konnten in den unter Wasser gelagerten Proben unabhängig von der Korngröße in allen Fraktionen Ettringit und Friedelsches Salz sowie andere Hydratphasen detektiert werden.

Die Stoffgruppe der Schmelzprodukte wurde bei allen untersuchten Schlacken ausführlicher charakterisiert. Die mineralogische Phasenzusammensetzung der Schmelzprodukte wurde dabei mit Hilfe der quantitativen Rietveld-Verfeinerung unter Verwendung eines externen Zirkonstandards ermittelt (Bild 12).

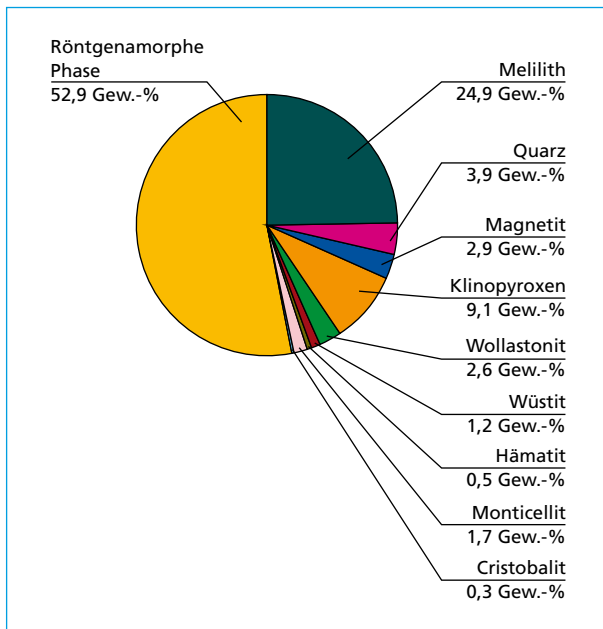


Bild 12:

Phasenzusammensetzung der Schmelzprodukte aus einer MVA-Schlacke

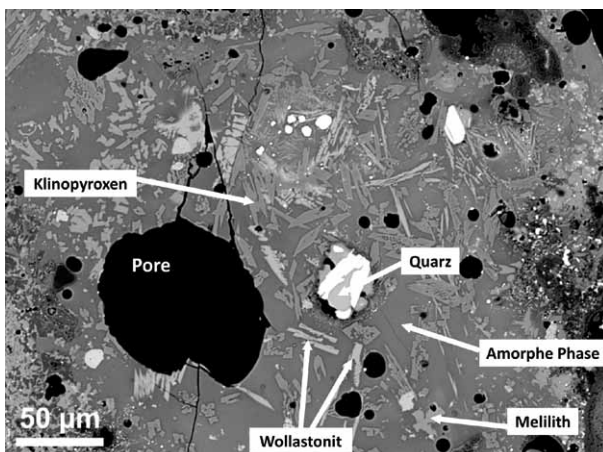


Bild 13:

REM-Aufnahme eines Schmelzproduktes

Die Schmelzprodukte bestehen zu etwa 50 Gew.-% aus neu gebildeten kristallinen Phasen, wie z.B. Melilith (Ca-Mg-Silikate), Quarz (SiO_2), Magnetit (Fe-Oxid), Klinopyroxen (Ca-Mg-Silikat) und Wollastonit (CaSiO_3). Diese liegen in einer glasigen und damit röntgenamorphen Matrix vor. In der REM-Aufnahme eines Anschliffes konnten diese neu gewachsenen Phasen ebenfalls wiedergefunden werden (Bild 13).

6. Diskussion

Nach heutigen Forschungs- und Entwicklungsstand kann mithilfe der Technologie der elektrodynamischen Fragmentierung der Massenstrom MVA-Schlacke um 50 bis 60 Volumenprozent reduziert werden.

Die hier aufgeführten Ergebnisse belegen, dass durch die elektrodynamische Fragmentierung MVA-Schlacken erfolgreich in deren einzelne Bestandteile separiert werden können. Diese unterteilen sich in der Grobfraction größer 2 mm in ein Gemenge von magnetischen Metallen, NE-Metallen, Glas, Keramik bzw. Steine und teilamorphen Schmelzprodukten. Besonders die metallischen Bestandteile können effektiv von der Schlackematrix befreit und anschließend durch Magnet- und Wirbelstromabscheider abgeschieden werden. Auch in den Feinfraktionen kleiner 2 mm ist eine Abtrennung der Metalle möglich. Damit erhöht sich die Rückgewinnungsrate von Metallen im Vergleich zu herkömmlichen Aufbereitungsmethoden. Weiterhin können andere Produkte wie Keramik und Gläser separiert werden, was das zu deponierende Schlackevolumen zusätzlich reduziert.

Zudem können die unerwünschten Schwermetalle, welche sich zu großen Anteilen in den Aschen befinden, mithilfe der Fragmentierung in der Grobfraction abgereichert werden. Durch das Abtrennen der Aschen von den übrigen Bestandteilen konzentrieren sich die Schwermetalle im Filtrat aus dem Prozesswasser auf. Die für bestimmte Anwendungen schädlichen Chloride und Sulfate im Prozesswasser gehen in Lösung und können somit in der Flüssigphase abgeschieden werden. Durch neue und höherwertige Verwertungsmöglichkeiten der gewonnenen Produkte könnten sich weitere Stoffkreisläufe schließen, was einem echten Recyclingprozess näher kommt.

7. Ausblick

In weiteren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten soll sich die Fragmentierungstechnologie für den Recyclingsektor etablieren. Dies beinhaltet im Wesentlichen das Upscaling des Verfahrens auf einen kontinuierlichen Durchsatz von 20 Tonnen pro Stunde. Weiterhin werden noch zusätzliche Peripheriegeräte benötigt, wie zum Beispiel eine geeignete Prozesswasseraufbereitung, um den Prozess im kontinuierlichen Betrieb zu ermöglichen. Diese soll vor allem das Abscheiden von Chloriden und Sulfaten aus dem Prozesswasser effektiver ermöglichen.

Ebenso besteht die Notwendigkeit geeignete Techniken zur maschinellen Sortierung der Glas- und Keramikfraktionen zu finden, um diese anschließend gesonderten Verwertungswegen zuzuführen. Zudem soll für die sehr metallreiche Feinfraktion kleiner

2 mm zukünftig ein effektives Aufbereitungsverfahren entwickelt werden. In weiteren Projekten soll der Frage nachgegangen werden, ob sich hydraulische reaktive Mineralphasen aus MVA-Schlacken gewinnen lassen. Die Einordnung der MVA-Schlacke in ein Rankin-Diagramm im Bild 14 zeigt, dass sich die chemische Zusammensetzung der MVA-Schlacke zwischen der Zusammensetzung eines Portlandzementes und der von Steinkohleflugaschen befindet. Demnach ist es denkbar bestimmte Bestandteile der fragmentierten MVA-Schlacke, nach Beseitigung der genannten unerwünschten Stoffe, für die Herstellung von Bauprodukten einzusetzen.

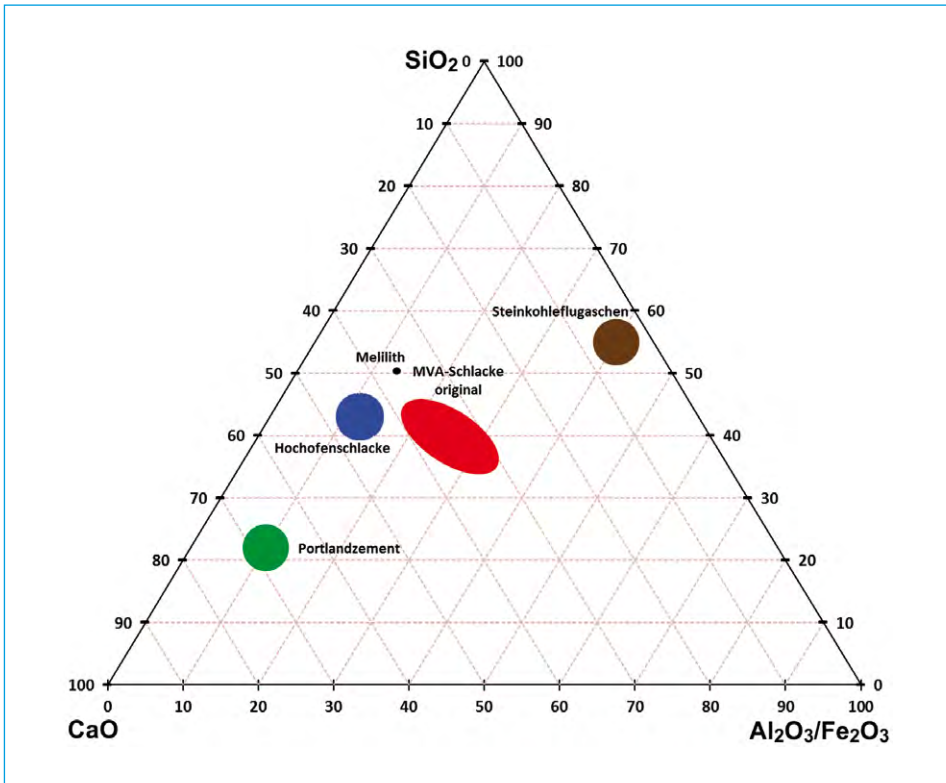


Bild 14: Einordnung der MVA-Schlacke in ein Rankin-Diagramm

8. Literatur

- [1] Alwast, H.; Riemann, A.: Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacke aus Abfallverbrennungsanlagen, Studie des Umweltbundesamtes, 2012
- [2] Seitz, R. et al.: Molecular Sorting – Szenarien für die Welt von Übermorgen, Broschüre der Fraunhofer-Gesellschaft, München, 2012
- [3] Bluhm, H.; Frey, W.; Giese, H.; Hoppé, P.; Schultheiß, C.; Sträßner, R.: Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, (2000), Nr. 5, S. 625-635

- [4] Sjomkin, B.W.; Ussow, A.F.; Kurets, V.I.: Grundlagen der elektrischen Impulszerstörung von Materialien. Russische Akademie der Wissenschaft Forschungszentrum Kola, Forschungsinstitut für physikalische-technische Probleme der Elektroenergiewirtschaft des Nordens, Polytechnische Universität Tomsk, Ed.: Tussow, N.P., 1995, S. 249
- [5] Hoppe, P. et al.: Prozessreaktor und Betriebsverfahren für die elektrodynamische Fragmentierung. Paten Nr. EP1673172, FZK GmbH, Karlsruhe, 2008
- [6] Marx, E.: Versuche über die Prüfung von Isolatoren mit Spannungstößen, Elektrotechnische Zeitschrift, Vol. 45, (1925), S. 652-654
- [7] Rietveld, H. M. : A profil refinement method for nuclear and magnetic structures , Journal of Applied Crystallography, Vol. 2, (1969), Nr. 2, S.65-71
- [8] O'Conner, B. H.; Raven, M. D.: Application of Rietveld Refinement Procedure in Assaying Powdered Mixtures, Powder Diffraction, Vol. 3, (1988), Nr. 1, S. 2-6
- [9] Jansen, D.; Bergold, S. T.; Götz-Neunhoeffer, F.; Neubauer, J.: The hydration of alite: a time-resolved quantitative X-ray diffraction approach using the G-factor method compoared with heat release, Applied Crystallography, Vol. 44, (2011), S. 895-901
- [10] Knoblauch, H.; Schneider, U.: Bauchemie, Werner Verlag, 2006, S. 464

Immissionsschutz



Immissionsschutz, Band 1

Karl J. Thomé-Kozmiensky • Michael Hoppenberg

Erscheinungsjahr: 2010
 ISBN: 978-3-935317-59-7
 Seiten: 632
 Ausstattung: Gebundene Ausgabe
 Preis: 40,00 EUR

Immissionsschutz, Band 2

Karl J. Thomé-Kozmiensky • Matthias Dombert
 Andrea Versteyl • Wolfgang Rotard • Markus Appel

Erscheinungsjahr: 2011
 ISBN: 978-3-935317-75-7
 Seiten: 593
 Ausstattung: Gebundene Ausgabe
 Preis: 40,00 EUR

Immissionsschutz, Band 3

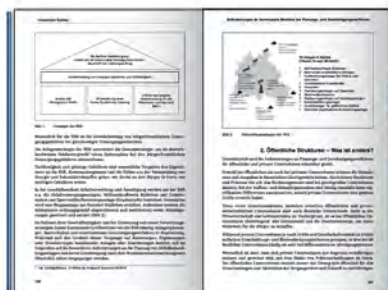
Karl J. Thomé-Kozmiensky
 Andrea Versteyl • Stephanie Thiel
 Wolfgang Rotard • Markus Appel

Erscheinungsjahr: 2012
 ISBN: 978-3-935317-90-0
 Seiten: etwa 600
 Ausstattung: Gebundene Ausgabe
 Preis: 40,00 EUR

110.00 EUR
 statt 120.00 EUR

Paketpreis

Immissionsschutz, Band 1 • Immissionsschutz, Band 2
 Immissionsschutz, Band 3



Bestellungen unter www.vivis.de
 oder

Dorfstraße 51
 D-16816 Nietwerder-Neuruppin
 Tel. +49.3391-45.45-0 • Fax +49.3391-45.45-10
 E-Mail: tkverlag@vivis.de

vivis
 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Aschen • Schlacken • Stäube

– aus Abfallverbrennung und Metallurgie –

Karl J. Thomé-Kozmiensky.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013

ISBN 978-3-935317-99-3

ISBN 978-3-935317-99-3 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2013

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky

Erfassung und Layout: Ginette Teske, Ina Böhme, Petra Dittmann, Cordula Müller,
Fabian Thiel, Martin Schubert

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Foto auf dem Buchdeckel: Dipl.-Ing. Daniel Böni, KEZO Kehrrechtverwertung Zürcher
Oberland

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.