

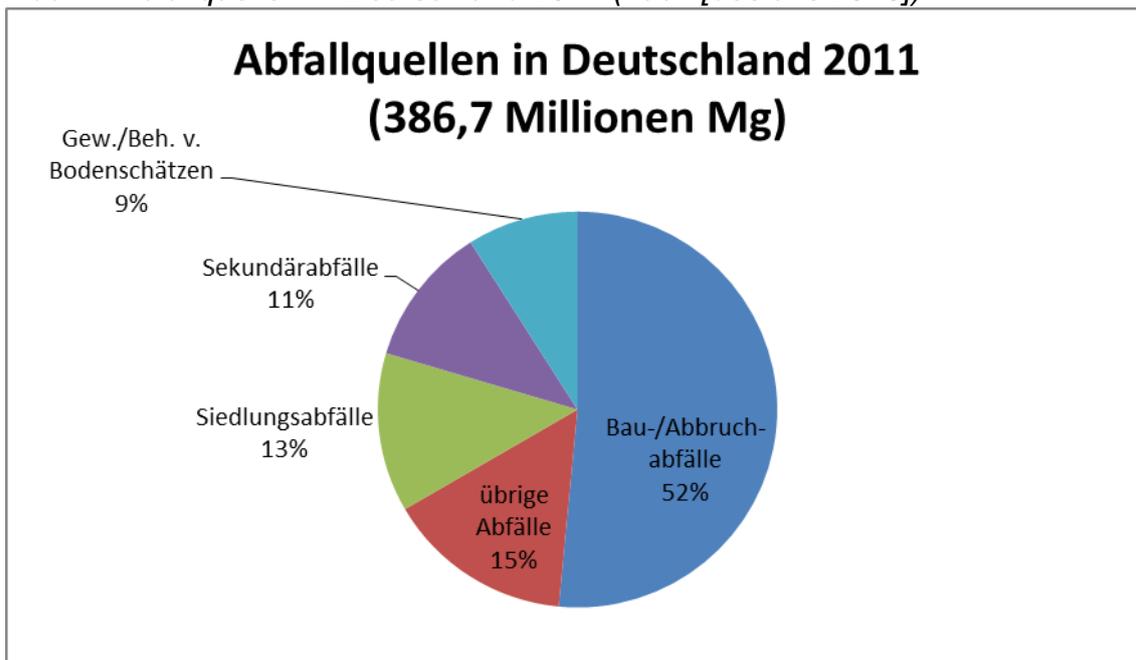
Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky* (Fraunhofer-Institut für chemische Technologie ICT, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7, D-76327 Pfinztal, e-mail joerg.woidasky@ict.fraunhofer.de); Dr. rer. nat. Volker Thome (Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen)

Molecular Sorting – Technologien für die Kreislaufwirtschaft der Zukunft

Einleitung

In Deutschland fielen 2011 insgesamt 386,7 Mio. Mg Abfall an. Hiervon machen die Bau- und Abbruchabfälle mit 51,6 % den größten Anteil aus. Andere Abfallströme sind Produktions- und Gewerbeabfälle (15,1 %), Siedlungsabfälle (13 %) und Sekundärabfälle (11,4 %), die alle etwa in der gleichen Größenordnung anfallen. Daneben machen Abfälle aus der Gewinnung und Behandlung von Bodenschätzen lediglich 9 % aus (siehe Abb. 1). Die Verwertungsrate dieser Abfälle liegt bei 77,6 %, nur noch 17,5 % der Abfälle werden abgelagert [destatis 2013].

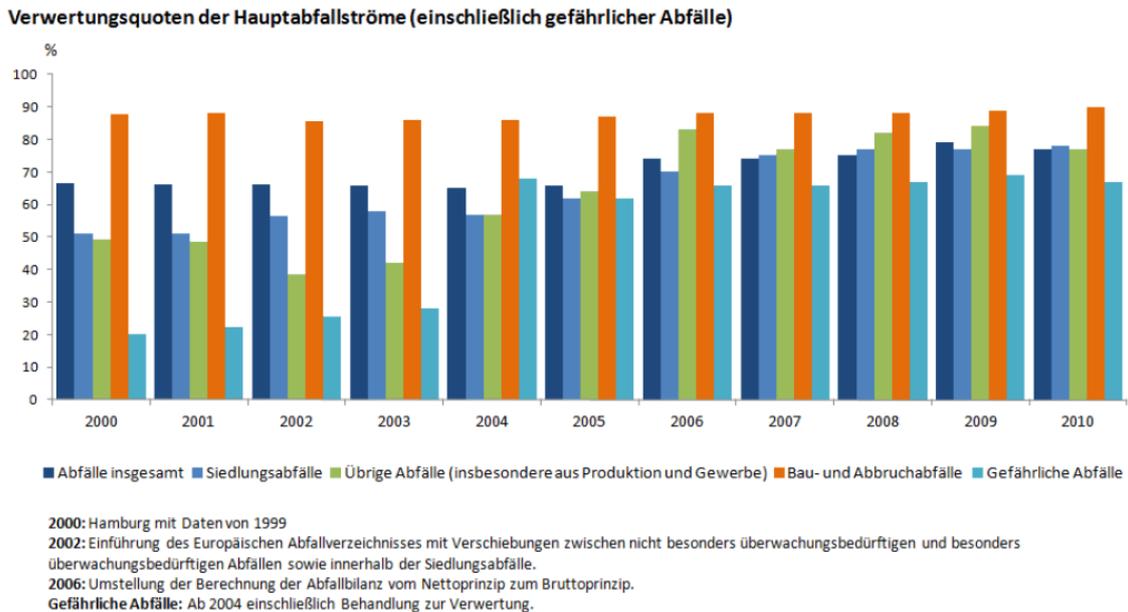
Abb. 1: Abfallquellen in Deutschland 2011 (nach [destatis 2013])



Die Abfallverwertung scheint somit nahezu eine gelöste Herausforderung zu sein. Das ist mit Blick auf die absoluten Massen sicher auch zutreffend (Abb. 2), zumal zum einen die Verwertungsquote der Bau- und Abbruchabfälle stabil bei über etwa 85 % liegt. Dies ist u. a. auf die Aktivitäten der 2011 aufgelösten Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau zurückzuführen. Von 1995 bis 2005 wurde die Verwertungsquote mineralischer Abfälle von etwa 50 bis auf knapp 90 % gesteigert [Euwid 2011]. Eine ähnliche Tendenz lässt sich sogar für

die Verwertung gefährlicher Abfälle feststellen, so dass dauerhaft damit gerechnet werden kann, dass etwa drei Viertel des deutschen Abfalls verwertet werden. Diese Verwertung geschieht vorrangig stofflich; im Jahr 2010 lag die Gesamt-Verwertungsquote bei 77 % (69 % Behandlung und stoffliche Verwertung, 5 % energetische Verwertung) [UBA 2013a]. Damit erscheint die „Recyclingfrage“ in Deutschland gelöst.

Abb. 2: Verwertungsraten der Hauptabfallströme in Deutschland 2011 [UBA 2013]



Quelle: Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Abfallbilanz, verschiedene Jahrgänge; Umweltbundesamt, eigene Berechnungen

Handlungsbedarf

Verbunden mit der Verwertung von Stoffströmen sind in den vergangenen Jahren stets Diskussionen und Rechtsstreite sowohl zum Ende der Abfalleigenschaft als auch zur Qualität der Verwertung geführt worden. Gleichzeitig rückte die Qualität der Stoffströme mehr in den Fokus der Betrachtungen und auch von Forschungsaktivitäten. Ein prägnantes Beispiel hierfür sind die Fördermaßnahmen des BMBF zur Ressourceneffizienz [Mennicken 2012], die sich von „rohstoffintensiven Prozessen“ (BMBF-Fördermaßnahme r²) über „strategische Metalle und Mineralien (BMBF-Fördermaßnahme r³)“ aktuell zu „wirtschaftsstrategischen Rohstoffen“ (BMBF-Fördermaßnahme r⁴) entwickelt haben. Im Ergebnis richtet sich das Augenmerk weniger auf Massenströme, sondern mehr auf die möglichst umfassende Wertschöpfung bzw. den Werterhalt aus anthropogenen Stoffströmen wie Abfällen, Infrastrukturen oder Ablagerungen. Dieser Ansatz wird mittlerweile auch in einer breiteren Öffentlichkeit unter dem Schlagwort „Urban mining“ diskutiert. Die – zumindest teilweise – Substitution von Primärrohstoff- durch Sekundärquellen führt jedoch zu umfangreichem Handlungs- und Forschungsbedarf:

Moderne Produkte weisen eine zunehmende Stoffvielfalt bei gleichzeitig sinkenden Stoffmengen auf. Aus technischer Sicht ergeben sich daher bisher ungelöste Herausforderungen der Kreislaufführung aus der verminderten Verfügbarkeit großer, hochwertiger Stoffströme, so dass stärker vermischte und/oder verschmutzte Stoffströme einzusetzen sind. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Verwertungsquoten.

„Molecular Sorting“ - Forschungsansatz

Mit dem Forschungsvorhaben „Molecular Sorting“ soll diesen divergierenden Entwicklungen gezielt entgegengewirkt werden. Der Ansatz verfolgt die Entwicklung und beispielhafte Anwendung von Verfahren zur Stofftrennung in einer bisher nicht adressierten geometrischen Größenordnung: „Molecular Sorting“ ist definiert als Trennung auf kleinster erforderlicher Ebene, um eine Wiederverwertung möglichst wie Primärrohstoffe zu ermöglichen. Durch diesen innovativen Ansatz soll der veraltete Standard „Bulk sorting“ abgelöst werden.

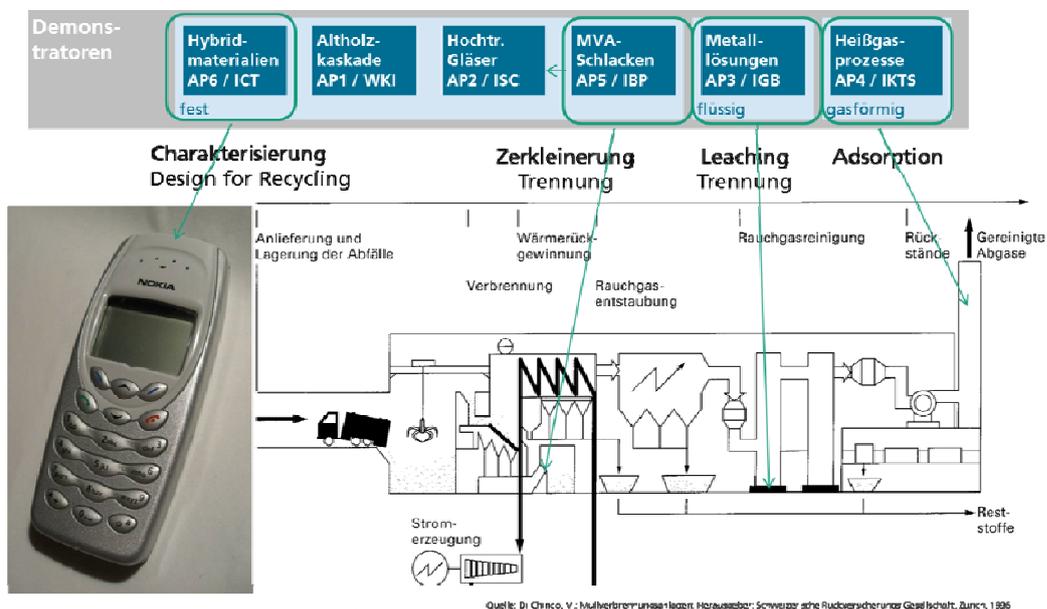
Ziel des Vorhabens ist es, durch eine Kombination von Identifikations- und Analysenverfahren, Aufbereitungsprozessen für Sekundär-Stoffströme und Modifikationen der Herstellungsverfahren hochwertige Stoffströme zu schließen. So kann die Wieder- und Weiterverwertung von Werkstoffen durch Trennprozesse bis auf molekulare Ebene („Molecular Sorting“) nach der Herstellung bzw. Nutzung ermöglicht werden.

Dem Vorhaben liegt ein erweiterter Begriff des „Urban mining“ zugrunde, der neben der Rohstoffrückgewinnung u. a. aus Halden, AbfalldPONien oder bestehenden Infrastrukturen ebenfalls anthropogene feste, flüssige und gasförmige Stoffströme adressiert. Das Vorhaben stellt Methoden und Technologien bereit, die für Urban-Mining-Ansätze nutzbar sind. Es werden wirtschaftlich oder massenmäßig relevante, ausgewählte Stoffströme untersucht. Anhand dieser Stoffströme, im Vorhaben als „Demonstratoren“ bezeichnet, sollen beispielhaft die Molecular-Sorting-Trennmethoden angewandt und auf ihre Leistungsfähigkeit überprüft werden. Abb. 3 zeigt beispielhaft die Anwendung der Trenn- und Aufbereitungsmethoden für feste, flüssige und gasförmige Stoffströme für eine Müllverbrennungsanlage, die so zu einer „weitergehenden Stofftrennanlage“ weiterentwickelt werden kann. Dazu werden zur Zeit im Labor- oder Entwicklungsstadium befindliche Verfahren auf ihre Anwendbarkeit geprüft und bei Eignung weiter ausentwickelt, um später in konkreten Anwendungsfeldern eingesetzt werden zu können. Dabei wird großer Wert auf die Vernetzung der einzelnen Demonstratoren gelegt, um gesamthafte Lösungen anbieten zu können.

In dem Vorhaben werden neben der Technologieentwicklung gleichzeitig die Umweltauswirkungen entwicklungsbegleitend durch eine Ökobilanzierung quantifiziert. Darüber hinaus wurde bereits mit sehr positivem Ergebnis in einem Foresight-Prozess die Richtung der Technologieentwicklungen methodisch auf Zukunftsfähigkeit überprüft um sicherzustellen, dass die Technologien für einen Einsatz zum Zielzeitpunkt 2030 geeignet sind.

Abb. 3: Methodenentwicklung durch „Molecular Sorting“ - Anwendungsbeispiel

Molecular Sorting - Anwendungsbeispiel



Modell-Anwendungsfelder für „Molecular Sorting“-Technologien

Die „Demonstratoren“ umfassen Müllverbrennungsschlacken, Verbundwerkstoffe, Gläser, metallhaltige wässrige Lösung, heiße Gase sowie Altholz. Durch die Anwendung innovativer Verfahren sowie deren Kombinationen konnte bereits in der ersten Projekthälfte bis Anfang 2013 gezeigt werden, dass es gelingt, aus Müllverbrennungsschlacken nicht nur Eisenmetalle, sondern auch noch weitere metallische und mineralische Wertstoffe zurückzugewinnen, die u. a. das Potential zur Zementsubstitution besitzen. Im Bereich des Altholzes wird überprüft, wie weit die werkstoffliche Verwertung auch von beschichteten Hölzern vorangetrieben werden kann, ohne den Vorsorgegedanken der deutschen Altholz-Verordnung zu unterlaufen. Dazu werden Identifikations- und Entschichtungsverfahren geprüft und fortentwickelt. Im Folgenden werden konkrete Ergebnisse für den Bereich der Müllverbrennungsschlacken vorgestellt.

Müllverbrennung

Im Jahr 2011 wurden 19,7 Mio. Mg Abfälle in Deutschland thermisch verwertet [destatis 2013a]. Der Metallgehalt von Siedlungsabfällen wird mit etwa 2 bis 4 % und von EBS mit etwa 0,9 % angegeben, allerdings erfolgt in Verbrennungsanlagen (in Deutschland 67 Abfallverbrennungsanlagen, 36 Ersatzbrennstoffkraftwerke und etwa 250 Biomasse-Heizkraftwerke [Briese 2012]) die gemeinsame Verbrennung mit anderen Abfallströmen wie z. B. Gewerbe- und Produktionsabfällen. Hinzu kommt, dass diese Metallfraktion sich aus verschiedenen Stahlsorten, Aluminium oder Kupfer und bis hin zu Titan zusammensetzt. Selbst Seltene Erden oder andere können hier – allerdings im Bereich von etwa 20 bis 100 ppm – in Schlacken nachgewiesen werden [Gosten 2013]. Analysen des „Molecular Sorting“-Konsortiums wiesen z. B. in MVA-Schlacken Cer nach.

[Gosten 2013] rechnet mit einem Schlackeanfall aus den vorgenannten thermischen Anlagen von 4,8 Mio. Mg in Deutschland pro Jahr und einem Gesamtmetallgehalt dieser Schlacken von 7 bis 10 %, so dass etwa 340.000 bis 480.000 Metalle aus der thermischen Abfallbehandlung anfallen. [Briese 2012] nennt eine Schlackenmenge von insgesamt etwa 6 Mio. Mg/a und erwartet einen Anstieg auf ca. 8,5 Mio. Mg für 2020. Die als Baustoff verwertete Menge der Schlacken liegt bei etwa 3,9 Mio. Mg [Briese 2012]

Während die „Entschrottung“ von Müllverbrennungsschlacken seit langem Stand der Technik ist, so sind weitergehende Abscheideschritte z. B. zur Entfernung von Kupfer, Aluminium oder anderer Metallanteile noch nicht flächendeckend umgesetzt. Die Rückgewinnung von Metallen geringerer Konzentration, aus der Feinkornfraktion [Gosten 2013] oder gar anderer, potentiell werthaltiger Schlackenanteile steht hingegen noch ganz am Anfang.

Verwertung von Müllverbrennungsschlacken

Nach einer Schätzung [Alwast 2010] werden sich im Jahre 2015 die Mengen an MVA-Schlacken auf ca. 420 Mio. Mg belaufen. Da die Deponieflächen in Deutschland in ungefähr 20 Jahren zur Neige gehen, werden Aufbereitungsmethoden gesucht, welche das Schlackenvolumen reduzieren oder diese derart aufbereiten, daß höherwertige Materialien gewonnen werden können. Bislang wird ca. 10 Prozent des Schlackenvolumens an magnetischen Bestandteilen und NE-Metallen entfernt, ein Großteil (ca. 60 Prozent) der Schlacken findet als sog. Deponiebaustoff Verwendung. Die restliche Schlacke wird als Straßenunterbau bzw. Füllmaterial im Untertagebau eingesetzt. Dabei weist die MVA-Schlacke festigkeitsbildende Eigenschaften ähnlich zementärer Systeme auf. Aufgrund einiger negativer Eigenschaften, wie beispielsweise der Gehalt an metallischem Eisen sowie Chloriden und Sulfaten, wird jedoch ein breiter Einsatz von MVA-Schlacken als Bindermaterial verhindert.

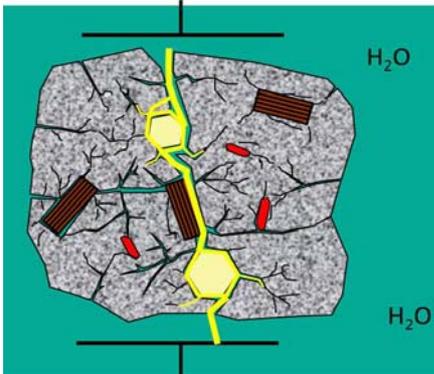
Prinzip der Elektrodynamischen Fragmentierung

Eine vielversprechende Methode, um Verbundwerkstoffe wie z. B. Altbeton [Thome 1998] oder auch Müllverbrennungsschlacken selektiv aufzutrennen, ist die Technik der elektrodynamischen Fragmentierung. Dabei werden mit Hilfe von ultrakurzen Hochleistungsimpulsen die Materialien in ihre Einzelbestandteile zerlegt. Dieses Verfahren beruht auf dem Prinzip, daß die Durchschlagsfestigkeit eines Materials gegenüber elektrischen Impulsen keine physikalische Konstante ist, sondern von der Entladungszeit des Pulses abhängt. Die elektrische Durchschlagsfestigkeit ist umgekehrt proportional zur elektrischen Leitfähigkeit und ist üblicherweise in Festkörpern wie Isolatoren höher als in Flüssigkeiten. Diesen Effekt kann man sich technisch zunutze machen, indem man Festkörper unter Wasser zwischen zwei Elektroden platziert und einen elektrischen Impuls mit einer Entladungszeit von $t < 500$ nsec einwirken läßt. Der Impuls wird durch einen Hochspannungsgenerator, z. B. einem Marx-Generator, erzeugt. Dieser kann Spannungen zwischen $U = 90 - 200$ kV durch eine spezielle Schaltung von mehreren Kondensatoren aufbauen.

Bei einer Impulsentladung durch einen Festkörper verläuft der Blitz entlang des Weges des geringsten Widerstandes und somit entlang von Korngrenzen und

nicht durch das Wasser. Es entstehen zunächst mehrere elektrische Funkenentladungen, von denen diejenige Entladung, welche zuerst die Gegenelektrode erreicht, zur Ausbildung eines Plasmakanals führt. Die Ausdehnung des Plasmakanals im Festkörper erzeugt eine Explosion mit einer Druckwelle von ca. 9-10 GPa. Diese Welle wird von der Gefäßwand reflektiert und generiert zusätzlich eine Kompressionswelle, welche die Freilegung der Komponenten verstärkt. Dadurch wird das Material entlang seiner Korngrenzen selektiv aufgetrennt (Abb. 4).

Abb. 4: Prinzip der elektrodynamischen Fragmentierung



Das Prinzip der elektrodynamischen Fragmentierung wurde bereits in den 1940er Jahren des vergangenen Jahrhunderts an der Universität Tomsk (RUS) entdeckt [Sjomkin 1995]. Das Forschungszentrum Karlsruhe (jetzt: KIT) hat in Zusammenarbeit mit der Polytechnischen Universität Tomsk eine Fragmentierungsanlage mit einem Durchsatz von 1 t/h entwickelt und patentiert [Hoppe 2008].

Am Fraunhofer IBP steht eine Laboranlage zur Durchführung von elektrodynamischen Fragmentierungen im Batch-Verfahren zur Verfügung. Diese arbeitet mit einem 5-Liter-Gefäß und einem Spannungsbereich von 90 – 200 kV bei einer Frequenz von 5 Hz. Es bestehen bereits großtechnische Anlagen, z. B. für das kontaminationsfreie Mahlen von hochreinem Quarz zur Herstellung von Glasfaserkabeln oder für die Freilegung von Kupfererzen aus dem Wirtsgestein. Im laufenden Projekt erforscht das Fraunhofer IBP die Anwendbarkeit der Fragmentierungstechnologie für das Recycling unterschiedlicher Verbundmaterialien.

Fragmentierung von Müllverbrennungsschlacke

Die elektrodynamische Fragmentierung der MVA-Schlacken wurde in einer Laboranlage am Fraunhofer IBP an Proben aus verschiedenen Müllverbrennungsanlagen durchgeführt. Hierfür wurden die Schlacken direkt nach der Nass-Entschlackung entnommen und luftdicht gelagert, so daß die Behandlung an frischen und noch reaktiven Proben erfolgte. Für die Versuchsdurchführung wurde jeweils eine Probenmenge von etwa 1 kg in das mit 5 Litern Wasser gefüllte Prozeßgefäß gegeben. Um eine optimale Auftrennung der Komponenten zu erreichen, wurden die Spannung, der Elektrodenabstand und die Zahl der Impulse probenabhängig variiert. Die behandelten Schlacken wurden anschließend in verschiedene Fraktionen gesiebt, getrocknet und für einen ersten

Überblick sortiert (Abb. 5). Zusätzlich wurde eine Feinstfraktion aus dem Prozeßwasser abfiltriert. Die magnetischen Komponenten wurden danach aus allen Fraktionen mit einem Magneten separiert.

Abb. 5: Überblick über die aus der Fragmentierung einer MVA-Schlacke gewonnenen Bestandteile.



Zur Simulation der in der konventionellen Aufbereitung üblichen 3-monatigen, feuchten Lagerung zur Alterung der Schlacken wurde ein Teil der Proben für vier Wochen unter Wasser gelagert, um diese später mit den Produkten aus der Fragmentierung zu vergleichen.

Untersuchungsmethodik

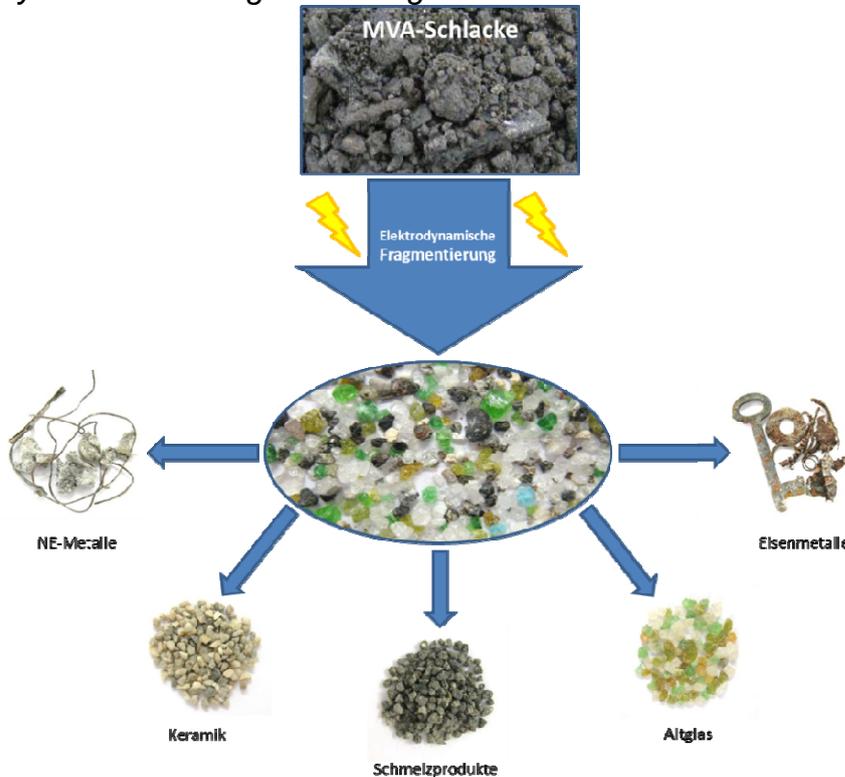
Um die elektrodynamische Fragmentierung als Aufbereitungstechnologie für MVA-Schlacken zu bewerten, wurden die Produkte der fragmentierten Schlacken analysiert. Dafür wurden die entstandenen Kornfraktionen hinsichtlich des chemischen-mineralogischen Phasenbestandes untersucht. Zusätzlich wurde die aus dem Prozeßwasser abgesetzte Feinstfraktion analysiert. Für die Phasenanalyse wurde das gewonnene Material aufgemahlen, präpariert und mit einem Röntgendiffraktometer geröntgt. Die Auswertung der einzelnen Diffraktogramme erfolgte sowohl qualitativ als auch quantitativ mittels Rietveld-Analyse. Für die Bestimmung von röntgenamorphen Phasen wurde bei der Messung Silizium als interner Standard verwendet.

Ergebnisse

Nach der Fragmentierung konnte eine Grobfraktion (> 2 mm) gewonnen werden, welche bei allen untersuchten Schlacken 40 – 60 Prozent des Gesamtvolumens ausmacht. Die Ergebnisse einer ersten Sortierung der Grobfraktion zeigen, daß diese Fraktion der fragmentierten MVA-Schlacken qualitativ aus fünf Stoffgruppen bestehen: Magnetische Fraktion (z. B. Eisenoxide, Messing), NE-Metall-Fraktion (nichtmagnetisch), Keramiken, Altgläser und Schmelzprodukte (Abb. 6). Aus allen bislang untersuchten Schlacken konnten diese fünf Stoffgruppen identifiziert werden, je nach Herkunft der Schlacken in quantitativ unterschiedlichen Volumenanteilen. Gegenüber herkömmlichen Aufbereitungsmethoden (z. B. Grobschrottabseidung, NE-Wirbelstromabscheidung und Schlackesiebung) werden dabei diese Stoffgruppen sehr sauber aus der Schlackematrix freigelegt. Besonders die Metalle werden dabei effektiv von Schlackeres-

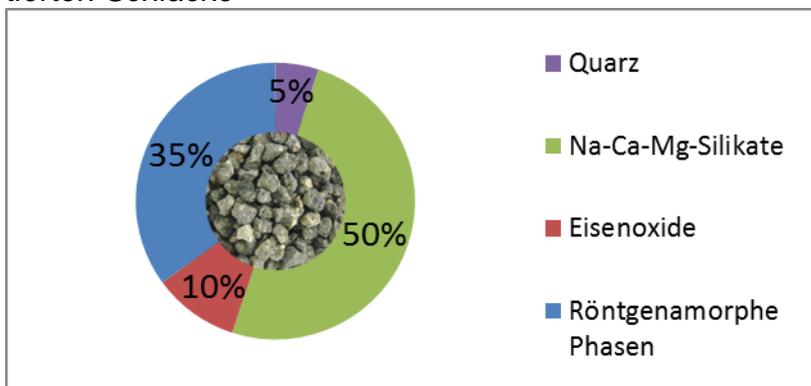
ten befreit, welche sich nach einer elektrodynamischen Fragmentierung in den Feinfraktionen (< 2 mm) wiederfinden.

Abb. 6: Ausgangsmaterial und Endprodukte (Grobfraktion) nach einer elektrodynamischen Fragmentierung von MVA-Schlacken



Um die Stoffgruppe der Schmelzprodukte zu charakterisieren, wurde diese genauer untersucht und der mineralogische Phasenbestand bestimmt. Hierbei ergab sich – qualitativ gesehen – bei allen Schlacken eine sehr einheitliche Zusammensetzung (Abb. 7). Die Schmelzprodukte enthalten als mineralische Phasen überwiegend Quarz (SiO_2), Eisenoxide, Na-Ca-Mg-Silikate (Melilith-Gruppe) und röntgenamorphe Phasen (glasige Schmelze).

Abb. 7: Mineralogische Zusammensetzung der Schmelzprodukte der fragmentierten Schlacke



Weiterhin wurde die Phasenzusammensetzung der kompletten Schlacken nach einer elektrodynamischen Fragmentierung für jede Kornfraktion ermittelt und mit den abgetrennten Fraktionen aus der unterwassergelagerten Schlacke verglichen. Hierbei zeigte sich, daß durch den Fragmentierungsprozeß sowohl Sulfate als auch Chloride in Lösung gehen und mit dem Prozeßwasser ausgewaschen werden können. In den Grob- und der Feinfraktionen der fragmentierten Schlacken können keine sekundär gebildeten Hydratphasen, wie Ettringit, Friedel'sches Salz und Bassanit/Gips, nachgewiesen werden. Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26 \text{H}_2\text{O}$) bildet sich dabei aus aluminathaltigen und sulfathaltigen Lösungen. Das Friedel'sche 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 [Knoblauch 2006]. Nur in der Feinstfraktion, welche sich aus dem Prozeßwasser abgesetzt hat, konnten diese Hydratphasen detektiert werden, was für einen hohen Sulfat- und Chloridgehalt im Prozeßwasser nach der Fragmentierung spricht. In den unterwassergelagerten Schlackenproben konnten hingegen unabhängig von der Korngröße in allen Fraktionen Ettringit und Friedel'sches Salz nachgewiesen werden und es fand keine Abtrennung in die Feinstfraktionen statt.

Zusammenfassung

Müllverbrennungsschlacken fallen in Deutschland als Sekundärabfälle der Abfallentsorgung in einer Masse von ca. 5 Mio Mg/a an. Während Siedlungsabfälle einen Metallgehalt von 2 bis 4 % aufweisen, so wird das Metall auf ca. 7 bis 10 % in Müllverbrennungsschlacken aufkonzentriert. Relevante Bestandteile sind hier neben mineralischen Phasen Massenmetalle (Fe, Cu, Al).

Durch das Verfahren der elektrodynamischen Fragmentierung können diese Bestandteile sehr sauber voneinander separiert und für eine Verwertung bereitgestellt werden. Neben der klassischen Verwertung der Metalle entstehen so neue Möglichkeiten für die Verwertung im Baustoffbereich und auch für die Rückgewinnung seltener Metalle. Diese hochwertige Kreislaufführung ist Gegenstand der des Fraunhofer-Forschungsvorhabens „Molecular Sorting“, das Entwicklungen für die „Märkte von übermorgen“ bereitstellen soll.

Dank

Das Vorhaben „Molecular Sorting“ wird von insgesamt sieben Fraunhofer-Instituten gemeinschaftlich durchgeführt. Es wird gefördert im Rahmen der Internen Programme der Fraunhofer-Gesellschaft (Programm „Märkte von übermorgen“) unter der Fördernummer 823 791. Die Autoren danken für diese Unterstützung ihrer Forschungsarbeiten.

Quellen

- [Briese 2012] Briese, D.; Duill, B.; Westholm, H.: Der Markt für MVA-Schlacken. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Band 5. TK-Verlag, Neuruppin, 2012, S. 811-818
- [destatis 2013] Statistisches Bundesamt: Pressemitteilung vom 22. Mai 2013 – 170/13: Abfallaufkommen in Deutschland bei 387 Millionen Tonnen. Wiesbaden, Mai 2013;

- https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2013/05/PD13_170_321pdf.pdf;jsessionid=D5E3108B61B805A80FC0B11AE59885C6.cae1?__blob=publicationFile; 03.08.2013
- [destatis 2013a] Statistisches Bundesamt: Verbrannte Abfälle: Seit 2001 vierfacht.
https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Aktuell_Feuerungsanlagen.html; 03.08.2013]
- [Euwid 2011] Euwid Recycling und Entsorgung: ARGE Kreislaufwirtschaftsträger Bau kritisiert Mantelverordnung und löst sich auf.
<http://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/einzelansicht/Ansicht/arge-kreislaufwirtschaftstraeger-bau.html>; 03.08.2013
- [Gosten 2013] Gosten, A.: Potential des Metallrecyclings durch Abfallverbrennung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Band 6. TK-Verlag, Neuruppin, 2013, S. 455-470
- [Mennicken 2012] Mennicken, L.; Jacobi, A.; Degenhardt, A.: Forschung sichert Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland. In: Chemie Ingenieur Technik (Zeitschrift) 2012 (84), Nr. 10, S. 1666-1670
- [UBA 2013] Umweltbundesamt: Verwertungsquoten der Hauptabfallströme (einschließlich gefährlicher Abfälle).
<http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do?ident=25001>; 03.08.2013
- [UBA 2013a]. Umweltbundesamt: Verwertungsquoten der Hauptabfallströme.
<http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodent=2663>; 03.08.2013
- [Alwast 2010] Alwast, H. & Riemann, A. (2010): Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen (<http://www.uba.de/uba-info-medien/4025.html>)
- [Thome 1998] Thome, V. (1998): Mineralogische Veränderungen von Glimmer und Zementhydraten nach elektrodynamischer Behandlung, Diplomarbeit, Uni Heidelberg
- [Sjomkin 1995] Sjomkin, B.W.; Ussow, A.F.; Kurez, W.I. (1995): Grundlagen der elektrischen Impulserstörung von Materialien. Russische Akademie der Wissenschaft Forschungszentrum Kola, Forschungsinstitut für physikalische-Technische Probleme der Elektroenergiewirtschaft des Nordens, Polytechnische Universität Tomsk, Red.: Tussow, N.P., S. 249
- [Hoppe 2008] Hoppe, P. et al. (2008): Prozessreaktor und Betriebsverfahren für die elektrodynamische Fragmentierung. Patent Nr.: EP1673172, [FZK GmbH, 76133 Karlsruhe](#) (D)

[Knoblauch 2006] Knoblauch, H. & Schneider, U. (2006): Bauchemie, Werner Verlag