

Eine innovative Prozesskette zur Gewinnung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe aus Aschen und Schlacken

Sebastian Dittrich, Anne Dittmar, Michael Dohlen, Verena Enzner, Amanda Günther,
Stefan Lübben, Matthias Sittard und Volker Thome

1.	Motivation.....	115
2.	Aktuelle Situation.....	116
3.	Projektidee	117
4.	Stand der Technik	118
5.	Projektansatz.....	121
6.	Ergebnisse	122
7.	Ausblick.....	125
8.	Literatur.....	125

1. Motivation

Die immer schnellere Entwicklung von Hochleistungswerkstoffen und High-Tech Anwendungen führt weltweit zu einem steigenden Bedarf an Rohstoffen. Dabei geraten immer mehr Elemente in den Fokus die per se auf der Erde nur in geringen Mengen verfügbar sind, beispielsweise Selten-Erd-Elemente. Eine besondere Abhängigkeit ergibt sich für High-Tech Industrien in Europa. Die natürlichen Vorkommen für einen Großteil der benötigten Rohstoffe liegen in Ländern wie Australien, Südafrika, Brasilien oder China. Somit entstehen zum einen hohe Transportkosten, viel schwerwiegender wiegt jedoch die Abhängigkeit von Handelsabkommen die immer wieder neu verhandelt werden müssen und im schlimmsten Fall aufgekündigt werden könnten. China besitzt beispielsweise fünfzig Prozent der geschätzten Vorkommen aller Selten-Erd Elemente weltweit, Brasilien stellt über neunzig Prozent der weltweiten Niob-Vorkommen [22]. Für eine sichere und langfristige Deckung der benötigten Rohstoffe müssen zum einen bisherige Fertigungsprozesse effizienter gestaltet werden sowie schlagkräftige Strategien zur Rückgewinnung von Primär- und Sekundärrohstoffen entwickelt werden. Als potentielle Quellen für sekundäre Rohstoffe gelten beispielsweise Aschen und Schlacken aus industriellen Prozessen.

Um die Abhängigkeit insbesondere von wirtschaftsstrategischen Rohstoffen in Zukunft zu verringern, wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ein Rahmenprogramm zur Forschung für nachhaltige Entwicklung (FONA) initiiert.

Dabei sollen in der mittlerweile dritten Fortschreibung des FONA Programms etwa zwei Milliarden EUR bis 2019 in verschiedenste Forschungsvorhaben investiert werden [2]. FONA folgt damit den Vorgaben des Koalitionsvertrages der Bundesregierung [6] und Forderungen der Ressourceneffizienzprogramme ProgRess [4] und ProgRess II [5] des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Das Forschungsprojekt ELEXSA (Akronym für *Elektrodynamische Fragmentierung von Schlacken und Aschen mit nachfolgender hydrothormaler Extraktion*) ist Teil des unter FONA laufenden r⁴ Programms [3] zur Sicherung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe durch Forschung an innovativen Technologien zur Ressourceneffizienz.

2. Aktuelle Situation

In Deutschland fallen jährlich 6,3 Millionen Tonnen Rückstände aus der Abfallverbrennung an, davon etwa 4,8 Millionen Tonnen Asche durch die energetische Verwertung von (Haus-)Müll [18, 20]. Durch das Verbrennen kommt es bereits zu einer Aufkonzentration der werthaltigen Metalle und Seltenen Erden, was die Kosten für die Wiedergewinnung im Vergleich zur Abtrennung aus frischen Abfällen erheblich reduziert [17]. Im Sinne einer zielgerichteten Rückgewinnung gelingt es aktuell in Deutschland bis zu 56 Prozent der Nichteisen-Metalle aus den MVA Aschen zu separieren [14]. Deutlich größer sind die Mengen an verschiedenen Schlackenarten die jährlich bei der Metallerzeugung entstehen. Beispielsweise werden in der Deutschen Stahlindustrie jährlich etwa 43 Millionen Tonnen Roheisen und Stahl sowie etwa 13 Millionen Tonnen Eisenhüttenschlacken (Hochofen- und Stahlwerksschlacke) produziert (Bild 1) [16]. Der überwiegende Anteil der genannten Schlacken wird bereits seit Jahrzehnten sinnvoll in unterschiedlichen Anwendungsgebieten, wie z.B. als Zementzusatz, als Gesteinskörnung für den Verkehrswegebau oder als Rohstoff für interne Hüttenprozesse, eingesetzt und schont dadurch natürliche Ressourcen [7, 9].



Bild 1:

Abguss einer LD-Schlacke von thyssenkrupp in Duisburg

Foto: R. Perret

Hinzu kommen Aschen und Stäube aus anderen Industriebranchen wie der Zementproduktion oder der Verwertung von Elektronikgeräten. All diesen Materialien, oft geringschätzig als Abfälle bezeichnet, ist gemein, dass sie einige Metalle und Elemente enthalten, die von der Europäischen Kommission als *critical raw materials* (Bild 2) eingestuft wurden [12].

Antimony	Cobalt	Germanium	Natural Graphite	REEs (Heavy)
Beryllium	Coking coal	Indium	Niobium	REEs (Light)
Borates	Fluorspar	Magnesite	Pt-Group Metals	Silicon Metal
Chromium	Gallium	Magnesium	Phosphate Rock	Tungsten

Bild 2: *Critical raw materials* laut Bericht der EU-Kommission

geändert nach EU Comission: Report on critical raw materials for the EU – Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Technical report, 2014

Vor allem der Feianteil der genannten Materialien stellt eine beachtliche Quelle dieser Elemente dar, nach welchen sowohl kurz- als auch langfristig eine erhöhte Nachfrage besteht [10]. In den bisherigen Aufbereitungsverfahren werden Feianteile nur selten berücksichtigt wodurch ein großer Anteil an wirtschaftsstrategischen Ressourcen letztendlich ungenutzt auf Deponien abgelagert wird oder bei der Verwendung als Ersatzbaustoff in Tragschichten im Straßen- und Wegebau unterhalb der Deckschicht dem Stoffkreislauf entzogen wird.

3. Projektidee

Im Projekt ELEXSA soll gezielt der Feianteil verschiedener Materialien aus industriellen Prozessen aufbereitet werden. Dabei stehen sowohl Materialien aus der Metallverarbeitung als auch aus der Abfallverbrennung im Fokus, da hier mit einer hohen Konzentration an wirtschaftsstrategischen Rohstoffen zu rechnen ist. Die verschiedenen Aschen, Schlacken und Stäube sollen so aufbereitet werden, dass eine selektive Rückgewinnung am Ende der Prozesskette möglich ist. Für die Umsetzung dieses Vorhabens haben sich sechs Partner aus Industrie und Forschung zusammengeschlossen. Für die Organisation und Beprobung der verschiedenen Materialien, einer Evaluierung hinsichtlich Qualität und Einsatzmöglichkeiten der zurückgewonnenen Rohstoffe sind die Firmen thyssenkrupp MillServices & Systems GmbH und Simet GmbH sowie die Stadtreinigung Hamburg AöR verantwortlich. Die Aufbereitung der einzelnen Materialien sowie die gesamte notwendige Analytik während der Projektlaufzeit erfolgt durch das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, die Ludwig-Maximilians Universität München, das Cutec Forschungsinstitut sowie die Technische Universität Hamburg-Harburg. Auf diese Weise können wissenschaftliche Expertise und industrielle Kontakte wertschöpfend gebündelt werden um eine wirtschaftlich orientierte Problemlösung zu erarbeiten bzw. umzusetzen.

Auf Grund der Projektlaufzeit von nur drei Jahren ist eine umfassende Betrachtung aller *critical raw materials* nicht möglich. Aus diesem Grund haben die Projektpartner einige Metalle und Elemente ausgewählt anhand derer ein innovativer Rückgewinnungsansatz umgesetzt werden soll. Die betreffenden Elemente samt den dazugehörigen Recyclingquoten sind in Tabelle 1 gezeigt.

Die meisten der genannten Rohstoffe (bis auf Cu und Pb) weisen eine (sehr) geringe Recyclingquote auf, werden also vor allem durch Primärrohstoffe ersetzt. Neben dem wissenschaftlichen Ansporn, eine gesteigerte Verwendung von Sekundärrohstoffen durch entsprechende Aufbereitungsmethoden zu verwirklichen, können durch eine erfolgreiche Projektumsetzung auch industrielle sowie volkswirtschaftliche Bedürfnisse bedient werden.

Tabelle 1: In ELEXSA betrachtete Rohstoffe samt Recyclingquoten

Rohstoffe	Einheit	Cu	Cr	Mo	Nb	Pb	Sb	SEE	Sn	W	Zn
Recyclingquote ¹	%	20	13	17	11	59 ²	11	1	24	37	8

Quellen:

¹ EU Comission: Report on critical raw materials for the EU - Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Technical report, 2010

² Rempel, H.; Schmidt, S.; Schwarz-Schampera, U.: Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. Jahresbericht 2007, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Fassung 17.12.2008

4. Stand der Technik

Noch bis vor wenigen Jahren wurden laut Angaben der Interessensgemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland (ITAD) im Zuge einer Ascheaufbereitung aus Abfallverbrennungsanlagen (MVA) lediglich 7,5 Prozent Fe-Metalle und 0,7 Prozent NE-Metalle zurückgewonnen [1]. Im Einsatz sind dabei meist (elektro-)mechanische Verfahren. Durch die ständige Weiterentwicklung der Technik sowie die Nachrüstung bestehender Anlagen konnte die Recyclingquote für NE-Metalle in Verbrennungsanlagen auf etwa 56 Prozent gesteigert werden [14]. Problematisch gestaltet sich die Rückgewinnung von Metallen welche beispielsweise von silikatischer Matrix ummantelt sind. Herkömmliche Magnet- oder Wirbelstromabscheider geraten dort an ihre Grenzen. Durch zusätzliche vorangeschaltete Maßnahmen könnte eine Erhöhung der Recyclingquoten erreicht werden. Im BMBF geförderten r³ Projekt *Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcen-relevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren – ATR* konnte durch eine Kombination von Hochgeschwindigkeits-Prallbrecher und Wirbelstromabscheider (Bild 3) eine Recyclingquote von über siebzig Prozent realisiert werden [15]. In vorangegangenen Forschungsprojekten konnte nachgewiesen werden, dass es möglich ist enthaltene Metallfraktionen nahezu vollständig durch hydrothermale Lösungsprozesse aus Verbrennungsrückständen heraus zu lösen.



Bild 3: MV-Schlackenaufbereitungsanlage der Firma Tartech in Wiesbaden

Besuchen Sie unsere Website
www.schlackenkantor.de



emvau

Ein Baustoff aus MV-Schlacke

... ein Baustoff mit Zukunft

- UMWELTBEWUSST
- GÜTEÜBERWACHTE QUALITÄT
- HOHE TRAGFÄHIGKEIT
- WITTERUNGSUNABHÄNGIG EINBAUBAR
- PREISWERT

Hanseatisches Schlackenkantor GmbH

Hamburg 040-25407790 • info@schlackenkantor.de • www.schlackenkantor.de



Technische Unterstützung für Anwender

Bestellen Sie kostenfrei unsere Arbeitshilfen für den Einsatz
von Ersatzbaustoffen auf > remex-solutions.de

REMEX Mineralstoff GmbH // Am Fallhammer 1 // 40221 Düsseldorf
Deutschland // T +49 211 17160-0 // F +49 211 17160-420
info@remex.de // remex.de

Anschließend könnten einzelne Elemente und Metalle selektiv durch geeignete Fällungsprozesse wiedergewonnen werden. Ein Vorteil dieser Technologie ist, dass umweltgefährdende polychlorierte Kohlenwasserstoffe und andere organische Substanzen während des Prozesses vollständig zerstört werden [13]. Mit Hilfe der elektrodynamischen Fragmentierung kann *Mehrkomponenten-Material* wie beispielsweise Schlacken aus der Eisen- und Stahlproduktion oder MVA-Asche selektiv in seine Einzelkomponenten zerlegt werden [7]. Dadurch können eingeschlossene Metalle freigelegt und separiert werden. Die Methode ist vor allem für Fraktionen größer zwei Millimeter zweckmäßig einsetzbar.

5. Projektansatz

Im Projekt ELEXSA wird die Methode der elektrodynamischen Fragmentierung mit dem Ansatz der hydrothermalen Extraktion kombiniert. Dadurch sollen zunächst die werthaltigen Zielrohstoffe in die Feinfraktion abgetrennt werden. Anschließend wird der Feinanteil mittels hydrothormaler Extraktion aufbereitet und eine selektive Rückgewinnung der einzelnen Metalle erfolgt. Vorab erfolgte eine Analyse des potentiell zur Verfügung stehenden Materials. Durch die Projektpartner aus der Industrie wurde eine Materialauswahl anhand mehrerer Kriterien getroffen. Dabei standen vor allem das Potential an werthaltigen Rohstoffen sowie die Verfügbarkeit des Materials in Deutschland im Fokus. Der im Projekt zu entwickelnde Prozess soll langfristig großtechnisch angewandt werden und somit müssen entsprechende Materialkapazitäten vorhanden sein um eine effiziente Rückgewinnung von wirtschaftsstrategischen Rohstoffen zu ermöglichen. Aktuell werden im Projekt vier Schlacken aus verschiedenen Prozessschritten der Metallerzeugung verwendet. Dabei wird die Prozesskette von der Roheisenentschwefelung über die Stahlerzeugung bis hin zur sekundärmetallurgischen Weiterverarbeitung abgedeckt [20]. Zudem sind drei Aschen aus der Abfallverbrennung ausgewählt worden, wobei ein *frisches* Produkt (Probennahme etwa zehn Wochen nach Entschlackung), eine zehn Jahre lang deponierte Asche und eine Feinstfraktion kleiner 200 μm aus der Wäsche einer frischen MV-Asche ausgewählt wurden. Des Weiteren wird eine Asche aus Elektronikschrott untersucht, um die in elektrischen Bauteilen wie Platinen verwendeten Rohstoffe zu erfassen.

Diese Materialien – mit Ausnahme des Feinstmaterials aus der Wäsche – werden zunächst mittels elektrodynamischer Fragmentierung aufbereitet. Da die bestehende Anlage zur elektrodynamischen Fragmentierung eine Laboranlage mit Batch-Betrieb ist werden die Materialien vor der Fragmentierung mittels Backenbrecher auf eine einheitliche Körnung (0/32 mm) zerkleinert. Daneben werden im Projekt zahlreiche Stäube untersucht die bei der industriellen Produktion abgeschieden werden. Hier handelt es sich um Stäube aus der Hochofenentstaubung und andere Feinfraktionen aus der Metallverhüttung sowie aus Abfallverbrennungsanlagen. Die Stäube und das Feinstmaterial aus der MV-Aschenwäsche werden direkt der hydrothermalen Extraktion zugeführt. Während des Prozesses werden die Metalle unter Optimierung der Lösungsparameter Temperatur, pH-Wert, Mischungsverhältnis Feststoff-Flüssigkeit und Reaktionsdauer systematisch in Lösung gebracht. Zeitgleich werden bei dem

Prozess Dioxine, Furane und andere umweltschädliche polychlorierte Kohlenwasserstoffe zerstört. Im Anschluss werden die einzelnen Metalle durch gezielte Einstellung von Lösungsgleichgewichten als Anionen- oder Kationenkomplexe ausgefällt und selektiv wiedergewonnen. Abschließend erfolgt eine Evaluation verschiedener Verwertungsstrategien der rückgewonnenen Metalle. Dabei werden verschiedene Aspekte wie Anforderungen der verarbeitenden Industrie an das wiedergewonnene Material (z.B. Reinheitsgrad, verfügbare Mengen, usw.) berücksichtigt.

6. Ergebnisse

Materialbeschaffung

Im bisherigen Verlauf des Projektes konnten sieben grobkörnige Aschen und Schlacken sowie sieben feinkörnige Stäube aus unterschiedlichen Verarbeitungsprozessen gewonnen werden. In Tabelle 2 sind die für das Projekt verwendeten Materialien aufgelistet. Die zu fragmentierenden Materialien wurden, falls notwendig mit einem Backenbrecher auf eine Korngröße < 32 Millimeter gebrochen, was dem Aufbau der Laboranlage zur elektrodynamischen Fragmentierung geschuldet ist.

	Materialliste ELEXSA	Prozesse
Aschen/ Schlacken	Elektroofenschlacke	EDF + HTE
	LD-Schlacke	EDF + HTE
	Roheisenentschwefelungsschlacke	EDF + HTE
	aufbereitete Abfallverbrennungs-Rostasche	EDF + HTE
	abgelagerte Abfallverbrennungs-Rostasche	EDF + HTE
	Elektroschrott-Asche	EDF + HTE
Stäube	Elektroofen-Staub	HTE
	Konverterstahlwerkstaub, Sekundärmetallurgie	HTE
	Impfmittelproduktion-Staub I	HTE
	Impfmittelproduktion-Staub II	HTE
	Staub aus der Hochofenentstaubung	HTE
	Feinmaterial aus MV-Anlage	HTE
Filterstaub Zementproduktion	HTE	

Tabelle 2:

Im Projekt bearbeitete Materialien

EDF – elektrodynamische Fragmentierung, HTE – hydrothermale Extraktion

Analytik

Sämtliche Materialien wurden auf ihre chemische und mineralogische Zusammensetzung hin analysiert bevor eine Aufbereitung erfolgte. Dabei wurden verschiedene Verfahren wie Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), Flammen-/Graphitrohr-Atomabsorptionsspektroskopie (AAS), Röntgenbeugungsanalyse (XRD) und Rasterelektronenmikroskopie gekoppelt mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM-EDX) verwendet.

Da auch die festen Rückstände nach der hydrothermalen Extraktion chemisch und mineralogisch charakterisiert werden sollen, wurde eine Methode entwickelt mit der sehr kleine Probenmengen mittels RFA chemisch analysiert werden können. Dazu werden Pulverpresslinge mit einem Durchmesser von 13 mm aus 160 mg Probenmenge

hergestellt. Die Aschen aus der Abfallverbrennung wurden zudem auf ihre Auslaugbarkeit untersucht. Dazu wurden an den Proben sowohl Schüttelversuche nach DIN EN 12457 und DIN 19529 als auch Säulenversuche nach DIN 19528 durchgeführt. Analysiert wurden die Proben hinsichtlich pH-Wert, Leitfähigkeit, Redoxpotential, Gehalte an Chlorid, Sulfat, TOC (Total Organic Carbon) und DOC (Dissolved Organic Carbon) sowie Schwermetalle bei unterschiedlichen Wasser- Feststoffverhältnissen. Bei den Schüttelversuchen wird Folgendes deutlich: Die frische Rostasche hat einen pH-Wert von 11,5 bis 12. Die gemessenen Werte für Chlorid und DOC sind hoch, die Konzentration an Sulfationen ist im Vergleich niedrig. Bei der zehnjährig deponierten Rostasche pendelt sich der pH-Wert zwischen 8,5 und 9 ein. Chloridionen und DOC sind im Rahmen der Nachweisgrenze nicht zu analysieren. Die Konzentration an Sulfationen übersteigt den Wert der frischen Rostasche um das achtzehnfache.

Fragmentierung

Von den sieben Grobfractionen wurden bisher vier mittels elektrodynamischer Fragmentierung aufbereitet. Für die Aufbereitung wurden verschiedene Parameter wie angelegte Spannung, Elektrodenabstand und Materialmenge variiert um ein optimales Resultat zu gewährleisten. Für die bisher untersuchten Proben erwies sich eine Spannung zwischen 160 kV und 180 kV bei einem Elektrodenabstand von 25 bis 30 Millimetern als gut geeignet. Zur Aufbereitung der Materialien aus der Metallerzeugung wurden je 300 Milliliter, für die Aschen aus der Abfallverbrennung etwa 500 Milliliter an Probenmaterial verwendet. Nach der Fragmentierung wurde das Prozessgefäß mit dem Probenmaterial über einem Analysensieb mit Maschenweite zwei Millimeter abgekippt. Nach der Sedimentation des Feinanteils wurde dieser getrocknet und durch Siebanalyse auf seine Kornverteilung hin analysiert. In Bild 4 sind die Siebkurven fragmentierter Schlacken aus der Metallerzeugung und Aschen aus der Abfallverbrennung miteinander verglichen. Grundsätzlich sind die Proben anhand der Sieblinien nach der Fragmentierung nicht mehr zu unterscheiden. Es zeigt sich, dass durch die Fragmentierung eine Fraktion kleiner 2 Millimeter in der Größenordnung 70 Ma.-% entsteht. Dies trifft für alle bisher untersuchten Proben zu.

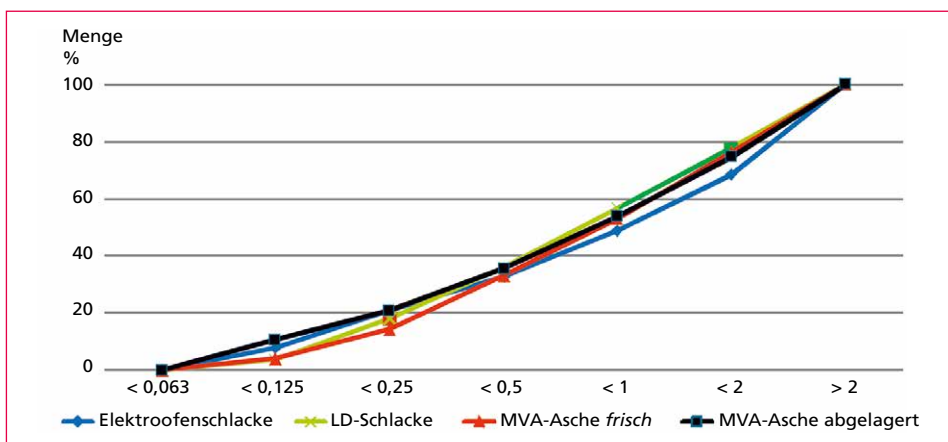


Bild 4: Vergleich ausgewählter Siebkurven für Schlacken aus der Metallerzeugung und Aschen aus der Abfallverbrennung

Es wurden etwa sechs Kilogramm Material kleiner zwei Millimeter je Probe hergestellt. In Bild 5 ist beispielhaft eine Probe vor und nach der Fragmentierung gezeigt. Nach einer Siebturmanalyse wurden die einzelnen Fraktionen ($< 2 \text{ mm}$, $< 1 \text{ mm}$, $< 500 \mu\text{m}$, $< 250 \mu\text{m}$, $< 125 \mu\text{m}$, $< 63 \mu\text{m}$) jeder Probe zur weiteren Aufbereitung mittels hydrothormaler Extraktion vorbereitet.



Bild 5: Ausgewählte Probe vor (linkes Bild) und die abgeseibte Fraktion kleiner zwei Millimeter nach der elektro-dynamischen Fragmentierung (rechtes Bild)

Zusätzlich erfolgte eine Analyse des Prozesswassers. Dabei wurde zum einen der pH-Wert vor und nach der Fragmentierung erfasst, zum anderen wird die Ionenkonzentration bestimmter Elemente im Prozesswasser analysiert. Es konnte ein leichter Anstieg des pH-Wertes von 7,5 (Mittelwert) auf 8,5 (Mittelwert) nach der Fragmentierung detektiert werden. Dieser ist im Falle von Proben aus der Metallherzeugung signifikanter ausgeprägt. Die Ergebnisse zur Prozesswasseranalytik liegen aktuell noch nicht vor.

Die Lösungsmechanismen während der hydrothermalen Extraktion werden von der Löslichkeit der Mineralphasen bestimmt. Da die SEE-führenden Phasen aufgrund ihrer geringen SEE-Gehalte mittels Röntgenpulverdiffraktometrie nicht ermittelt werden konnten, wurden die Analysen mittels REM-WDX durchgeführt. Bild 6 zeigt die rasterelektronische Aufnahme der Probe F03 (Staub aus der Impfmittelproduktion) sowie das zugehörige Elementspektrum.

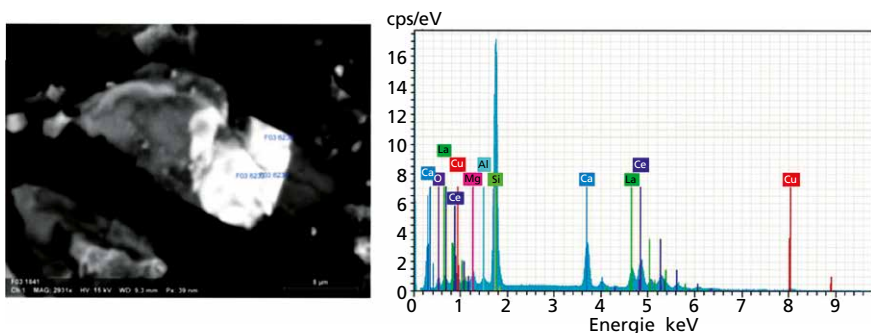


Bild 6: Aufnahme per REM-WDX der Probe F03, mit zugehörigem Elementspektrum

Die SEE-führenden Phasen erscheinen aufgrund ihrer hohen Ordnungszahlen im Elektronenbild sehr hell. Bei der in Bild 6 gezeigten, weiß erscheinenden Phase handelt es sich um ein Calcium-Silikat, wobei ein Teil des Calciums durch Lanthan und Cer ersetzt ist.

7. Ausblick

In den ersten Arbeiten des Projektes konnte gezeigt werden, dass die Aufbereitung der Materialien mittels elektrodynamischer Fragmentierung gut realisierbar ist. Eine Abschätzung, ob die Rückgewinnung der Zielrohstoffe mit der vorgestellten Prozesskette möglich ist, kann derzeit allerdings noch nicht gesichert erfolgen. Untersuchungen zur hydrothermalen Extraktion von Pb, Zn, Cd und Cu an einem E-Filterstaub aus der Hausmüllverbrennung haben ergeben, dass diese Metalle unter definierten Bedingungen nahezu vollständig aus dem E-Filterstaub extrahiert werden können. Im r³ Projekt ATR (Aufschluss, Trennung, Rückgewinnung) konnte gezeigt werden, dass unterschiedliche MVA-Rostaschen ein unterschiedliches Extraktionsverhalten für Pb und Zn aufweisen. Die Extraktionsraten sind abhängig von Korngröße, vom mineralogischen Phasenbestand, von Extraktionstemperatur und -zeit, sowie vom eingestellten pH-Wert. Um die jeweils höchsten Extraktionsraten zu erhalten, müssen die Parameter daher für jede MVA-Rostasche ermittelt und angepasst werden.

8. Literatur

- [1] Alwast, H.; Riemann, A.: Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes UBA-FB 001409, UBA-Texte 50/2010
- [2] Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.): Forschung für nachhaltige Entwicklung – FON³, Stand: 2016, Bonn
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Bekanntmachung des Bundesministeriums von Richtlinien zur Fördermaßnahme r4 – *Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe* für Bildung und Forschung, <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung.php?B=870> vom 17.07.2013, aufgerufen: 03.02.2017
- [4] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes), Stand: 2012, 2. Auflage, Berlin, 2015
- [5] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) II: Fortschrittsbericht 2012-2015 und Fortschreibung 2016-2019, Stand: 10.08.2015
- [6] Deutsche Bundesregierung: Koalitionsvertrag 18. Legislaturperiode, Berlin; Dezember 2013
- [7] Dittrich, S.; Thome, V.; Seifert, S.; Maier, M.: Effektive Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacken mittels Hochspannungsimpulsen. Chem. Ing. Tech. 88, No. 4, 2016, S. 461-468
- [8] Dohlen, M.: Metamorphism – vom Monte Schlacko zur Industrielava. In: stahl und eisen 137 (1), 2017, S. 80-81
- [9] Dohlen, M.: Verwendung von LD-Schlacke im Wege- und Flächenbau. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2016, S. 323-339

- [10] Erdmann, I.; Behrendt, S.; Feil, M.: Kritische Rohstoffe für Deutschland. Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte – Abschlussbericht. Berlin: Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZB), 2011
- [11] EU Comission: Report on critical raw materials for the EU – Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Technical report, 2010
- [12] EU Comission: Report on critical raw materials for the EU – Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Technical report, 2014
- [13] Hu, Y.; Zhang, P.; Chen, D.; Zhou, B.; Li, J.; Li, X. W.: Hydrothermal treatment of municipal solid waste incineration fly ash for dioxin decomposition. *Journal of hazardous materials* 207, 2015, S. 79-85
- [14] Kuchta, K.; Enzner, V.: Metallrückgewinnung aus Rostaschen aus Abfallverbrennungsanlagen – Bewertung der Ressourceneffizienz. EdDE-Dokumentation Nr. 17, 2015
- [15] Lübben, S.: Treatment of bottom ash, metal recovery and recycling of minerals. ISWA Beacon Conference Hamburg, Oktober 2015
- [16] Merkel, T.: Eisenhüttenschlacken im Jahr 2014 – Erhebungen zu Produktion und Nutzung. Report des FEHS-Instituts, 22, 2015
- [17] Morf, L.S.; Gloor, R.; Haag, O.; Haupt, M.; Skutan, S.; Di Lorenzo, F.; Böni, D.: Precious metals and rare earth elements in municipal solid waste-sources and fate in a Swiss incineration plant. *Waste management* 33 (3), 2013, pp 634-644
- [18] Reichenberger, H.P.; Gleis, M.; Quicker, P.; Mocker, M.; Faulstich, M.: Feste Rückstände aus Verbrennungsanlagen Teil I. In: *Müll und Abfall* 8. 2008, S. 386-393
- [19] Rempel, H.; Schmidt, S.; Schwarz-Schampera, U.: Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. Jahresbericht 2007, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Fassung 17.12.2008
- [20] Stahlinstitut VDEh: *Stahlfibel*. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 2015
- [21] Umweltbundesamt: Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen. Dessau-Roßlau, 2010
- [22] Zepf, V.; Reller, A.; Rennie, C.; Ashfield, M.; Simmons, J. BP: *Materials critical to the energy industry. An introduction*. 2nd edition, 2014